

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(53), МАРТ 2013

Издается с января 2000 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – заместитель главного редактора, д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., БЕЛЯШОВА Н.Н., к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В., к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А., к.ф.-м.н. КОЗТАЕВА У.П., д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф., д.г.-м.н. КРАСНОПЕРОВ В.А., ЛУКАШЕНКО С.Н., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.г.-м.н. НУРМАГАМБЕТОВ А.Н., д.б.н. ПАНИН М.С., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., д.т.н. САТОВ М.Ж., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(53) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2013 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 1(53), MARCH 2013

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

СЕЧЕНИЯ ВЫХОДА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ Батырбеков Э.Г., Горлачев И.Д.	5
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ¹⁰ В, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЯДЕРНОМ, ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРАХ И В АСТРОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Буртебаев Н., Бактыбаев М.К., Зазулин Д.М., Керимкулов Ж.К., Артемов С.В., Игамов С.Б., Ярмухамедов Р.	9
ИНКЛЮЗИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ (³ He,xd), (³ He,xt) И (³ He,xa) НА ЯДРЕ ²⁷ АІ ПРИ ЭНЕРГИИ ³ He 50,5 МэВ Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М.	18
ТОРОИДНЫЙ МОМЕНТ В ПОИСКАХ НАРУШЕНИЙ ДИСКРЕТНЫХ СИММЕТРИЙ И В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРИМЕНЕНИЯХ	24
РЕГУЛЯТОР СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА КОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ Лисицын В.Н., Асанов А.Б.	31
ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕЙТЕРИЯ С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ Тажибаева И.Л., Кенжин Е.А., Кульсартов Т.В., Гордиенко Ю.Н., Понкратов Ю.В., Барсуков Н.И., Гныря В.С., Заурбекова Ж.А., Муканова А.О., Тулубаев Е.Ю., Чихрай Е.В., Шестаков В.П.	34
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТРИТИЯ И ГЕЛИЯ В ОБЛУЧЕННОМ БЕРИЛЛИИ Прозорова И.В.	41
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА КОРИУМА В КОРПУСЕ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА (ПРОЕКТ INVECOR) Бакланов В.В., Васильев Ю.С., Жданов В.С., Колодешников А.А., Кукушкин И.М., Paul David W. Bottomley, Christophe Journeau	47
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ Колодешников А.А., Зуев В.А., Игнашев В.И., Соколов И.А., Туленбергенов Т.Р.	58
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕВитюк В.А., Вурим А.Д., Пахниц А.В.	65
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ УСТАНОВКИ ПОЛУЧЕНИЯ ХЛОРИДА БЕРИЛЛИЯ Котов В.М., Супрунов В.И., Бакланова Ю.Ю., Витюк Г.А., Сураев А.С.	70
СОЛНЕЧНАЯ ТЕРМОТЕХНОЛОГИЯ И ФОТОВОЛЬТАИКА – КОМПОНЕНТЫ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ Жарекешев И.Х.	77
БАЛАНСИРОВКА ВЗРЫВА Григорьев С.И.	88

БАЗА ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМ РЕАКТОРАМ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ Горин Н.В., Корнеев А.А., Липилина Е.Н., Чуриков Ю.И., Архангельский Н.В.	94
КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 МАЯ 2011 ГОДА Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н.	102
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОДЕРЖАНИЯ ¹³⁷ Сs В СКВАЖИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ГАММА-КАРОТАЖА Гринштейн Ю.А., Мурзадилов Т.Д., Логвинов О.В.	111
ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ 1220 СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА Русинова Л.А., Беляшов А.В., Ларина Т.Г.	116
ПАМЯТИ ДИАСА КЕНЖЕБЕКОВИЧА ДАУКЕЕВА	126
СПИСОК АВТОРОВ	129

СЕЧЕНИЯ ВЫХОДА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ

¹⁾ Батырбеков Э.Г., ²⁾ Горлачев И.Д.

¹⁾ Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан ²⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

При финансовой поддержке Министерства образования и науки РК в 2012 году в ИЯФ начата серия исследовательских работ, направленных на измерение сечений выхода характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), возникающего при взаимодействии ускоренных частиц с атомами мишеней. В настоящей работе представлены данные выхода ХРИ при возбуждении К-, L- и М-оболочек атомов мишеней в диапазоне масс от Mg до Bi протонами с энергией 1 МэВ. При этом использовался подход, основанный на расчете сечений выхода ХРИ через сечение Резерфордовского обратного рассеяния, которое может быть рассчитано из формулы Резерфорда с высокой точностью. Такой подход позволяет уменьшить ошибки измерения сечений выхода ХРИ и, таким образом, повысить точность получаемых данных. В дальнейшем предполагается расширить область исследований на протоны других энергий и тяжелые заряженные частицы в диапазоне энергий 0.5 – 1.7 МэВ/нуклон.

Введение

Задача повышение точности количественного определения элементного состава образцов методом рентгеновской флуоресценции с ионным возбуждением (РІХЕ) требует получения максимально надежных данных, используемых в качестве фундаментальных основ метода, таких как сечение выхода характеристического излучения, возникающего при взаимодействии ускоренных частиц с атомами мишеней [1]. В настоящее время существует несколько теоретических моделей с разной степенью надежности описывающие процессы, происходящие при взаимодействии ускоренных ионов с внутренними электронными оболочками атомов мишени. Поскольку генерация характеристического рентгеновского излучения является следствием нескольких процессов, происходящих на атомарном уровне, начиная от первичной ионизации заряженными частицами, вплоть до последующего заполнения вакансий электронами внешних оболочек, при теоретических расчетах необходимо все это аккуратно описывать. Наиболее удовлетворительное описание сечений выхода ХРИ для диапазона энергий протонов 0.5 – 1.7 МэВ и отношения зарядов атомов налетающей частицы и атомов мишени 0.03<Z₁/Z₂<0.3 позволяет получить приближением возмущенного стационарного состояния (ECPSSR теория) [2-4]. ECPSSR модель является следствием усовершенствования Борновского приближения плоских волн (PWBA) учитывающая энергетические потери налетающей частицы, Кулоновское отклонение иона, поляризацию и изменение энергии связи электронов в атомах (посредством метода возмущенных стационарных состояний) и релятивистскую коррекцию массы электронов. Используя ECPSSR теорию, были получены удовлетворительные данные по сечениям ионизации К-оболочек атомов мишеней [5]. Из-за большей сложности менее надежные рассчитанные значения сечений ионизации для L- оболочек представлены в работах [2, 6]. В то же время, учитывая значимость повышения точности определения сечений выхода флуоресценции, до настоящего времени в разных аналитических лабораториях продолжаются работы по получению эмпирических данных с использованием ускорителей заряженных частиц.

Эксперимент

Для получения ускоренного протонного пучка в экспериментах использовался ускоритель тандемного типа [7] с возможностью вариации энергии в диапазоне от 300 кэВ до 1.7 МэВ. Мишень в экспериментах располагалась перпендикулярно к пучку.

Образцы были подготовлены в виде металлических пленок, напыленных методом магнетронного плазменного осаждения на органическую подложку. Толщина используемых пленок варьировалась в диапазоне от 29 до 200 мкг/см². Расчет сечений выхода ХРИ производился через сечение Резерфордовского обратного рассеяния, поэтому в экспериментах при облучении мишеней одновременно регистрировались и рентгеновские кванты, и обратно рассеянные частицы. Детектирование рентгеновского излучения осуществлялось Si(Li) детектором площадью 12 мм² и разрешением 145 эВ на линии 6.4 кэВ, расположенного под углом 135° к направлению движения пучка. Детектор оснащен защитным бериллиевым окном толщиной 8 мкм. При регистрации К-линий Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb и Lлиний Та, W, Pb, Bi перед детектором располагался Al поглотитель толщиной 25 мкм для уменьшения вклада в регистрируемый спектр низкоэнергетичного рентгеновского излучения. Для расчета эффективности системы регистрации ХРИ использовался набор калибровочных источников Eu-152, Eu-154, Eu-155, Na-22, Mn-54, Ba-133, Cd-109, Co-57, Zn-65, Am-241 и Fe-55. При регистрации обратно рассеянных частиц использовался поверхностно барьерный детектор площадью 20 мм², расположенный под углом 142° к направлению движения пучка. Угол, стягиваемый детектором, в экспериментах составлял 9.1 мсрад.

Расчет сечений выхода характеристического рентгеновского излучения производился по формуле:

$$\sigma_{\chi} = \frac{N_{\chi} D_{\chi} \Omega_R \sigma_R}{\varepsilon_{\chi} N_R D_R} \left[\frac{\mu_t t}{1 - e^{-\mu_t t}} \right]$$
(1)

В выражении (1) N_X и N_R – число зарегистрированных рентгеновских квантов и обратно рассеянных частиц соответственно; D_X и D_R - коэффициенты, учитывающие мертвое время при наборе рентгеновского спектра и спектра обратно рассеянных частиц соответственно; Ω_R (срад) – телесный угол, стягиваемый поверхностно барьерным детектором; ε_X (E_X) – эффективность Si(Li) детектора, зависящая от энергии рентгеновских квантов; $\mu_t (cm^2/r) (E_x)$ – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения в облучаемом образце, зависящий от энергии рентгеновских квантов; t (г/см²) – толщина напыленной пленки и σ_R – сечение обратного рассеяния для заданного угла и энергии первичного пучка. Член в квадратных скобках в выражении (1) учитывает самопоглощение рентгеновского излучения в мишени. В случае использования фильтра выражение (1) принимает вид:

$$\sigma_{\chi} = \frac{N_{\chi} D_{\chi} \Omega_R \sigma_R}{\varepsilon_{\chi} N_R D_R e^{-\mu_f \rho_f \chi}} \left[\frac{\mu_t t}{1 - e^{-\mu_t t}} \right],$$

где μ_f (см²/г) (E_X) – массовый коэффициент ослабления рентгеновского излучения в фильтре, зависящий от энергии рентгеновских квантов, ρ_f (г/см³) – плотность материала фильтра и x (см) – толщина фильтра.

Результаты и обсуждение

Для определения погрешности отношения количества зарегистрированных рентгеновских квантов к количеству обратно рассеянных частиц, используемых в выражении (1) была проведена серия из пяти измерений, выполненных при разных интегралах тока пучка на мишени и разных условиях обработки спектров рентгеновского излучения и обратно рассеянных частиц. В результате проведенных исследований были получены средние значения сечений выхода флуоресценции для 12 серий К-линий, 14 серий L-линий и 4 М-линий при возбуждении атомов мишени протонным пучком с энергией 1 МэВ.

В таблицах 1 (К-линии), 2 (L-линии) и 3 (Млинии) представлены выходы флуоресценции, как для отдельных линий, так и суммарные выходы серий (соответственно K_{tot} , L_{tot} и M_{tot}), являющиеся суммой отдельных линий. Погрешности, приведенные в таблицах 1 – 3, включают помимо погрешности отношения N_X к N_R также погрешности определения телесного угла детектора заряженных частиц, эффективности регистрации рентгеновского излучения и сечений обратного рассеяния.

Таблица 1. Измеренные сечения выхода флуоресценции
для К-оболочек атомов мишеней (в барнах)

Элемент	Κα	Κβ	K _{tot}
Mg			470±37
Al			442±33
Ti	38.2±3.5	4.9±0.4	43.1±3.9
Cr	23.0±1.8	3.1±0.2	26.1±2.0
Cu	6.0±0.7	0.85±0.09	6.8±0.7
Zn	4.7±0.5	0.66±0.05	5.3±0.5
Zr	0.39±0.05	0.080±0.014	0.46±0.06
Nb	0.27±0.03	0.053±0.009	0.31±0.03
Мо	0.25±0.02	0.051±0.010	0.29±0.02
Ag	0.078±0.007	0.016±0.003	0.093±0.009
Cd	0.061±0.005	0.010±0.002	0.070±0.006
In	0.045±0.003	0.0077±0.0013	0.053±0.003
Sn	0.036±0.002	0.0068±0.0014	0.042±0.004
Sb	0.031±0.003	0.0056±0.0005	0.036±0.004

Таблица 2. Измеренные сечения выхода флуоресценции для L-оболочек атомов мишеней (в барнах)

Элемент	L _α +L _I	Lβ	Lγ	L _{tot}
Cu				865±75
Zn				710±47
Zr				471±44
Nb				373±25
Мо				344±22
Ag				204±15
Cd				175±15
In				149±14
Sn				146±12
Sb				122±13
Та	7.3±0.7	3.7±0.4	0.53±0.05	11.7±1.1
W	6.7±0.5	3.1±0.3	0.44±0.06	10.2±1.0
Pb	2.7±0.2	1.6 ±0.2	0.25±0.04	4.4±0.4
Bi	2.2±0.3	1.4±0.1	0.20±0.02	3.7±0.3

Таблица 3. Измеренные сечения выхода флуоресценции для М-оболочек атомов мишеней (в барнах)

Элемент	M _{tot}
Та	688±58
W	649±53
Pb	447±50
Bi	433±30

На рисунке 1 показаны в графическом виде зависимости сечений выхода ХРИ для $K_{tot},\ L_{tot}$ и M_{tot} от атомного номера ядра мишени.



Рисунок 1. Зависимости сечений выхода ХРИ для K_{tob} L_{tot} и M_{tot} от атомного номера ядра мишени

Литература

- Johansson, S.A.E. PIXE: A novel technique for element analysis / S.A.E. Johansson, J.L. Campbell Chichester: John Wiley, 1988.
- Brandt, W. Energy-loss effect in inner-shell Coulomb ionization by heavy charged particles / W. Brandt, G. Lapicki // Phys. Rev. - 1981 - A 23 - p. 1717.
- Lapicki, G. Monopole Coulomb-deflection factor for heavy-particles inner-shell ionization cross section / G. Lapicki, M. Goldstein, W. Brandt // Phys. Rev. 1981 A 23 p. 2727.
- Lapicki, G. The status of theoretical K-shell ionization cross section by protons /G. Lapicki // X-ray spectrometry 2005 № 34 – p. 269.
- Paul, H. Fitted empirical reference cross sections for K-shell ionization by protons / H. Paul, J. Sacher // Atom. Data Nucl. Data Tables - 1989 - vol. 42 - p. 105-156.
- 6. Brandt, W. L-shell Coulomb ionization by heavy charged particles / W. Brandt, G. Lapicki // Phys. Rev. 1979 A 20 p. 465.
- 7. Ускорительный комплекс тяжелых ионов УКП-2-1: Труды XII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1990 г., 139 с.

1 МЭВ ЭНЕРГИЯЛЫ ПРОТОНДАРДАН РЕНТГЕНДІК СӘУЛЕЛЕНУГЕ ТӘН ШЫҒУ ҚИМАЛАРЫ

¹⁾ Батырбеков Э.Г., ²⁾ Горлачев И.Д.

¹⁾ Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов, Қазақстан ²⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

ҚР Білім және ғылым министрлігінің қаржылық қолдауымен 2012 жылы ЯФИ-де шапшаң бөлшектердің нысана атомдарымен өзара әрекеттескен кезде туындайтын рентгендік сәулеленуге тән (ХРИ) шығудың қималарын өлшеуге бағытталған зерттеу жұмыстарының легі басталды. Бұл жұмыста нысана атомдарының К-, L- және Мқабықшаларын 1 МэВ энергиялы протондармен Mg -ден Bi -ге дейінгі массалар диапазонында қоздыру кезіндегі ХРИ шығуының деректері берілген. Бұл ретте Резерфорд формуласы бойынша жоғары дәлдікпен есептелу мүмкіндігі бар Резерфордтық кері шашырау қимасы арқылы ХРИ шығу қималарын есептеуге негізделген тәсіл қолданылды. Мұндай тәсіл ХРИ шығуының қималарын өлшеудегі қателіктерді азайтуға, сөйтіп алынатын деректердің дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді. Алдағы уақытта зерттеу саласын өзге энергиялар протондарына және 0.5 – 1.7 МэВ/нуклон энергия диапазонында ауыр зарядталған бөлшектерге кеңейту көзделіп отыр.

Благодарности

Работы, результаты которых представлены в статье, выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РК в рамках договора 0608/ГФ по программе Грантового финансирования научных исследований Г.2012.

CHARACTERISTIC X-RAY RADIATION YIELD CROSS-SECTIONS OF 1 MeV PROTONS

¹⁾ E.G. Batyrbekov, ²⁾ I.D. Gorlachev

¹⁾ National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan ²⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

In 2012 INP with financial support from the Ministry of Education and Science of RK initiated a series of researches aimed at measurement of characteristic x-ray radiation (CXR), arising from accelerated particles-target atoms interaction. The report presents data on CXR yield under excitation of K-, L- and M-shells of target atoms within the mass range from Mg to Bi protons of 1 MeV energy. In the research an approach was applied based on calculation of CXR yield cross-section per Rutherford backscattering, which could be precisely calculated using Rutherford formula. The approach enables to reduce errors in CXR yield cross-section measurement, and thus improve data accuracy. In future it is proposed to enlarge the field of research to protons of other energies and heavy ions within the energy range 0.5 - 1.7 MeV/nucleon.

УДК 539.172.12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ¹⁰В, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЯДЕРНОМ, ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРАХ И В АСТРОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

¹⁾ Буртебаев Н., ¹⁾ Бактыбаев М.К., ¹⁾ Зазулин Д.М., ¹⁾ Керимкулов Ж.К., ²⁾ Артемов С.В., ²⁾ Игамов С.Б., ²⁾ Ярмухамедов Р.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ²⁾ Институт ядерной физики, Ташкент, Узбекистан

С точностью около 10% получены дифференциальные сечения процессов упругого ¹⁰B(p,p)¹⁰B рассеяния в интервале энергии $E_{p, na6.} = 400 - 1400$ кэВ под углами $\theta_{na6.} = 10 - 168^{\circ}$ с шагом 10°. На основе этих результатов и анализа имеющихся литературных данных выполнен расчет в рамках феноменологической и полумикроскопической оптической модели для области низких энергий. Найдены оптимальные параметры оптического потенциала взаимодействия протона с ¹⁰B при низких и сверхнизких энергиях. Измерены функции возбуждения процесса ¹⁰B(p,p)¹⁰B в интервале энергий от 340 до 1400 кэВ с шагом 10 кэВ для угла 168°. Получены экспериментальные значения дифференциальных сечений радиационного захвата протонов ядрами ¹⁰B (переход на основное состояние) при $E_{p, na6.} = 1200$ кэВ для углов 0°, 45°, 90° и 135° с погрешностью около 10%, найдено интегральное сечение этого процесса. Проведено вычисление астрофизического S- фактора и скорости реакций радиационного захвата ¹⁰B(p, γ)¹¹C на основное состояние ¹¹C при низких и сверхнизких энергиях. Найдены новые значения параметров резонансов реакции ¹⁰B(p, γ)¹¹C расположенных в области $E_{p, na6.} = 0 - 1.41$ МэВ. Расчеты проводились в рамках R – матричного подхода, который позволяет учитывать корректным образом вклады как резонансного, так и прямого радиационных захватов. В этом подходе были использованы асимптотические нормировочные коэффициенты (АНК), которые определяют нормировку нерезонансных частей амплитуд радиационного захвата и амплитуды приведенных радиационных ширин каналов.

1 Введение

Подбор типов реакций для термоядерного синтеза, проблемы диагностики температуры плазмы, а также современные задачи ядерной астрофизики можно успешно решить только при наличии достаточно надежных экспериментальных данных по сечениям ядерных реакций, индуцированных легкими заряженными частицами на ядрах 1s-, 1p- и 2s1dоболочек при низких и сверхнизких энергиях.

На настоящий момент реакция радиационного захвата ¹⁰В(р, γ)¹¹С в области энергий 50 – 2000 кэВ наиболее полно экспериментально изучена в [1]. Известно, что изотоп ¹⁰В входит в состав конструкционных элементов новейших ядерноэнергетических установок, являются кандидатами в альтернативное топливо в перспективных термоядерных реакторах - JET, ITER в которых реакция ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ несет важную информацию о количестве ¹⁰В и динамике его горения. В качестве компонентов конструкционных элементов, которые обеспечивают эффективное поглощение нейтронов во внутренних стенках ядерных и термоядерных реакторов и радиационную стойкость этих стенок также широко используются изотопы бора. Однако имеющиеся в литературе экспериментальные данные по сечениям этой реакций имеют достаточно большой разброс, поэтому в настоящей работе было проведено дополнительное измерение сечения этой реакции при энергии Ер. лаб.=1200 кэВ.

Кроме того, изучение процессов упругого рассеяния протонов на легких ядрах при низких энергиях важно для определения оптимальных параметров потенциалов протон-ядерного взаимодействия. Эти потенциалы используются для расчетов определенных параметров ядерных, термоядерных реакторов и процессов, происходящих при астрофизических условиях. Имеющиеся в литературе [2-5] экспериментальные данные по сечениям упругого ¹⁰В(p,p)¹⁰В рассеяния были получены в диапазоне энергий налетающих частиц от 5.3 до 49.5 МэВ. Между тем значимые для приложений процессы протекают при энергиях менее 10 кэВ и для более надежных расчетов в этой области необходимо измерить сечения ${}^{10}B(p,p){}^{10}B$ при энергиях менее 500 кэВ.

Экстраполяция экспериментально измеренных сечений (астрофизического S- фактора S(E)) в область сверхнизких энергий является сложной и до конца не решенной проблемой. Предлагаемое в настоящей работе решение этой проблемы основывается на идее о том, что из-за сильного кулоновского отталкивания сталкивающихся заряженных частиц и относительно слабо связанного состояния образуемых ядер при астрофизических и термоядерных энергиях процесс прямого радиационного захвата протекает на больших расстояниях. Следовательно, важную роль в определении сечении реакции радиационного захвата играет периферия волновой функции связанного состояния, определяемая асимптотическим нормировочным коэффициентом (АНК) и энергией связи. В связи с этим, для расчета реакции прямого радиационного захвата ¹⁰В(р, γ)¹¹С и радиационного захвата, идущего через резонансные состояния ¹⁰В(р, γ)¹¹С в настоящей работе использовался R-матричный подход, позволивший использовать для корректного расчета Sфакторов вышеупомянутой реакции данные об АНК, которые были найдены при анализе реакции ¹⁰В(³He,d)¹¹С.

2 Эксперимент

Экспериментальная часть настоящей работы была проведена с использованием протонного канала ускорителя УКП-2-1 Института ядерной физики НЯЦ РК. Калибровка энергии пучка протонов осуществлялась с помощью реакций, имеющих узкие, хорошо выделенные резонансы [6,7]. Для этой цели использовались реакции ²⁷Al(p, γ)²⁸Si при E_{p, лаб.} = 632, 773, 992, 1089 кэВ и ¹⁹F(p, $\alpha\gamma$)¹⁶О при E_{p, лаб.} = 340 кэВ. Точность калибровки при этом составляла ±1 кэВ. Энергетический разброс пучка протонов не превышал 1.2 кэВ.

В качестве мишеней применялись тонкие пленки 10 В, изготовленные с помощью электронно-лучевого напыления на установке ВУП-2. Были получены самоподдерживающаяся пленка для экспериментов по изучению упругого рассеяния толщиной 200 мкг/см² и одна пленка на медной подложке для изучения (р, γ) – реакции с толщиной 120 мкг/см². Определение толщин мишеней проводилось с точностью 5% ядерно-физическим методом, разработанным ранее [8, 9].

2.1 Измерение дифференциальных сечений и функции возбуждения упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁰В при низких энергиях

Для регистрации рассеянных протонов использовался поверхностно-барьерный кремниевый детектор заряженных частиц фирмы ORTEC (диаметр чувствительной области 8 мм, толщина – 0.2 мм). Детектор был расположен на расстоянии 24 см от области рассеяния и имел возможность перемещаться в угловом диапазоне от 10° до 170° в лабораторной системе отсчета. Энергетическое разрешение детектора составляло 15 кэВ. Типичный спектр упруго рассеянных протонов, полученный с помощью детектора заряженных частиц, показан на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что мишень, использовавшаяся в эксперименте, достаточно чистая и не содержит заметной доли какой-либо примеси.

Пучок протонов формировался с помощью двух коллиматоров диаметром 3 мм и фокусировался на мишени в пятно диаметром ≈ 3.5 мм. Для того чтобы минимизировать вероятность разрушения мишеней, ток пучка составлял не более 50 нА.



Рисунок 1. Пример спектра упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁰В, полученного с помощью поверхностнобарьерного кремниевого детектора, расположенного на расстоянии 24 см от области рассеяния

Было выполнено подробное измерение с точностью 10% дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁰В в диапазоне углов от 10° до 168° с шагом 10° при $E_{p, na6.} = 400, 600, 900,$ 1150 и 1400 кэВ (см. рисунок 2). Измерения функций возбуждения проводились при угле 168°, в интервале энергий от 360 до 1400 кэВ с шагом 10-20 кэВ и точностью 10% (см. рисунок 3). Измерения проводились в центральной камере рассеяния ускорителя УКП-2-1 [9].



Рисунок 2. Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на ¹⁰В, полученные при Е_{р. лаб.} = 400-1400 кэВ. Погрешность экспериментальных данных не превышает размеров показанных точек и составляет 10%. Сплошными кривыми приведены расчеты в рамках однократной фолдинг-модели с параметрами, взятыми из таблицы 2

Рисунок 3 демонстрирует, что в упругом канале в области энергий налетающих протонов от 350 до 1400 кэВ резонансы очень слабо выражены, что не исключает возможность вполне корректного извлечения из данных по упругому рассеянию эффективных параметров оптического потенциала взаимодействия протона с ¹⁰В в этой области энергий.



Рисунок 3. Функции возбуждения упругого ¹⁰ B(p,p)¹⁰ B рассеяния. Погрешность экспериментальных данных не превышает размеров показанных точек и составляет 10%

2.2 Измерение дифференциальных сечений реакции радиационного захвата протонов на ядрах ¹⁰В в интервале энергий 350-1200 кэВ

Проведены измерения угловых распределений гамма-квантов от реакции ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ для перехода на основное состояние ${}^{11}C$ при $E_{p, \text{ лаб.}} = 1200$ кэВ. Ток пучка на мишени был около 5 мкА.

На рисунке 4 показан пример γ -спектра, полученного во время изучения реакции ¹⁰B(р, γ)¹¹C при $E_{p, \ лаб.} = 1200 \ \kappa ЭВ, \ \theta_{\gamma, \ лаб.} = 45^{\circ}$. На рисунке хорошо видны линия реакции ¹⁰B(р, γ)¹¹C для перехода на основное состояние ¹¹C и линии реакции ¹¹B(р, γ)¹²C для переходов на основное состояние и на уровень 4.44 МэВ ядра ¹²C. Хорошо известные энергии γ -переходов для этих линий позволяли контролировать энергетическую калибровку при наборе каждого спектра. Пики полного поглощения и пики одинарной и двойной утечек для всех γ -переходов также хорошо видны на рисунке.

В результате обработки экспериментальных данных с точностью 10% были получены дифференциальные сечения ${}^{10}\text{B}(p,\gamma){}^{11}\text{C}$ реакции под углами $\theta_{\gamma, \, \text{паб.}} = 0^{\circ}$, 45°, 90° и 135° при энергии $E_{p, \, \text{паб.}} = 1200$ кэВ для перехода на основное состояние ${}^{11}\text{C}$. Найдено интегральное сечение процесса ${}^{10}\text{B}(p,\gamma){}^{11}\text{C}$. Примеры полученных экспериментальных результатов представлены на рисунке 5.

Из рисунка 5 б) видно, что интегральное сечение, полученное в настоящей работе, находится в хорошем согласии с результатом работы [1]. На основании этого было сделано заключение о надежности экспериментальных данных [1] и эти данные были использованы нами при расчете астрофизических Sфакторов реакции ¹⁰B(p, γ)¹¹C в рамках Rматричного подхода для области сверхнизких энергий. Рисунок 5 показывает, что резонансы реакции ¹⁰B(p, γ)¹¹C в области энергий налетающих протонов < 1.2 МэВ достаточно слабо выражены, что также не исключает возможности описать эту реакцию и в рамках потенциальной модели.



Рисунок 4. Пример γ-спектра реакций ^{10,11}B(p,γ)^{11,12}C, полученного с GEM20P детектора объемом 111 см³, расположенного на расстоянии 6 см от области реакции



Рисунок 5. (а) угловое распределение реакции ¹⁰В(р, у)¹¹С для перехода на основное состояние ¹¹С, (б) интегральные сечения реакции ¹⁰В(р, у)¹¹С для перехода на основное состояние ¹¹С (сплошной кружок – результат настоящей работы) в сравнении с данными работы [1] (открытые квадраты)

З РАСЧЕТ

3.1.1 Расчет параметров потенциала взаимодействия протона с¹⁰В в рамках оптической модели (ОМ) для средних и низких энергий

Для нахождения оптимальных параметров оптического потенциала при сверхнизких энергиях нами была использована программа ECIS-88. В оптической модели ядра существуют неоднозначности определения потенциалов. Эта проблема особенно актуальна при энергиях налетающих частиц ниже 10 МэВ/нуклон. Для исключения неоднозначностей были предварительно выполнены расчеты дифференциальных сечений процесса ¹⁰В(p,p)¹⁰В при более высоких энергиях Е_{р, лаб.} = 5.3; 8; 13; 17.9; 33.6; 49.5 МэВ [2-5] в рамках феноменологической оптической модели (OM), причем в качестве стартовых параметров были использованы геометрические параметры, полученные для упругого рассеяния ¹⁰В(p,p)¹⁰В при наиболее высокой рассмотренной нами энергии Е_{р, лаб.} = 49.5 МэВ [5], где дискретная неоднозначность легче всего устраняется. Для каждой энергии получены по два набора потенциалов. Результирующие наборы параметров приведены в таблице 1.

На рисунке 6 показаны результаты расчета сечений для вышеприведенных энергий.



Рисунок 6. Угловые распределения упруго рассеянных протонов ядром¹⁰В при различных значениях энергии. Сплошные кривые – расчет с учетом объемного поглощения W_V (набор А из таблицы 1); пунктирные – расчет с учетом поверхностного поглощения W_S (набор В из таблицы 1); символы – экспериментальные точки из работ [2-5]

Таблица 1. Параметры оптических потенциалов для упругого рассеяния протонов на ядре ¹⁰В, полученные в рамках феноменологической оптической модели

Энергия Е _р , МэВ	Наб.	V _R , МэВ	r _v , Фм	а _v , Фм	W, МэВ	r _ı , Фм	а _і , Фм	V _{so} , МэВ	r _{so} , Фм	а _{so} , Фм	Эксп. данн.
5.2	A	53.9	1.1	0.548	6.22	1.21	0.644	6.31	1.09	0.644	[0]
5.5	В	53.9	1.1	0.646	5.97	1.81	0.600	6.31	1.09	0.644	[2]
0.0	A	53.3	1.1	0.759	5.02	1.44	0.644	6.31	1.09	0.644	[0]
0.0	В	54.5	1.1	0.702	6.76	0.96	0.600	6.31	1.09	0.644	[2]
12.0	Α	56.7	1.1	0.607	9.05	1.20	0.644	6.31	1.09	0.644	[0]
13.0	В	56.7	1.1	0.598	6.19	1.20	0.600	6.31	1.09	0.644	[2]
17.0	A	53.9	1.1	0.587	6.22	1.60	0.644	8.0	0.90	0.400	[2]
17.9	В	53.9	1.1	0.572	6.03	1.15	0.600	8.0	0.90	0.400	[3]
22.6	A	54.9	1.1	0.618	8.48	1.42	0.644	8.0	0.90	0.400	[4]
33.0	В	54.7	1.1	0.567	6.36	1.21	0.600	8.0	0.90	0.400	[4]
	Α	40.66	1.1	0.580	5.34	1.68	0.644	6.44	0.750	0.590	
49.5		40.37	1.12	0.650	15.85	1.23	0.600	8.0	0.90	0.400	[6]
	В	47.7	1.1	0.668	7.08	1.19	0.600	-	-	-	[၁]
		46.64	1.1	0.680	20.93	0.78	0.530	-	-	-	

Из рисунка видно, что расчеты с объемным (набор А) и с поверхностным (набор Б) поглощением различаются только для $E_{p, na6.} = 5.3$ и 8 МэВ и при углах рассеяния больших 60°. С увеличением энергии все различия нивелируются, и расчеты с обоими наборами параметров становятся одинаковыми. Из рисунка 6 также видно, что при самой низкой энергии (5.3 МэВ) экспериментальные данные невозможно описать в полном угловом диапазоне используя разумные параметры потенциала оставаясь лишь в рамках феноменологической оптической модели. Поэтому для описания данных при энергии (5.3 МэВ), а также наших экспериментальных данных была применена однократная фолдинг-модель.

3.1.2 Анализ дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁰В в рамках оптичес-кой модели с использованием фолдинг-потенциала

Полумикроскопическая однократная фолдингмодель (модель свертки) [10] определения потенциала взаимодействия протонов с ядрами исходит из относительно хорошо известной информации о нуклон-нуклонных силах и распределении плотности ядерной материи. В отличие от феноменологического потенциала, потенциал однократной фолдингмодели не содержат свободных параметров, и это обстоятельство позволяет существенно сократить неоднозначности в величинах его параметров, извлекаемых из анализа данных по упругому рассеянию на основе ОМ ядра. Появляется также возможность хорошо описывать экспериментальные данные, получаемые при очень низких энергиях в полном угловом диапазоне при физически обоснованных величинах параметров. Однако такая модель позволяет вычислить только реальную часть потенциала, мнимую же часть невозможно получить, исходя из каких-либо первопринципов, и таким образом, для этой части она по-прежнему остается феноменологической.

Анализ выполненных в настоящей работе измерений упругого рассеяния протонов на ядре ¹⁰В в рамках оптической модели проводился с использованием фолдинг-потенциала также с помощью расчетной программы ECIS 88. Фитирование проводилось с использованием параметров таблицы 1, взятых в качестве стартовых. Вариации подвергались параметризованного как глубина фолдингпотенциала V_o (реальная часть), так и параметры мнимой части потенциала. Окончательные результаты приведены в таблице 2 и на рисунке 2. Из таблицы 2 следует, что глубина действительной части потенциала плавно уменьшается с увеличением энергии. Из рисунка 2 видно, что параметры потенциала, найденные по модели однократной свертки (см. таблицу 2) хорошо описывают полученные в настоящей работе экспериментальные данные во всем диапазоне энергий и углов.

Е _{р,лаб,} МэВ	Тип	V₀, МэВ	r₀, Фм	а₀, Фм	W⊳, M∋B	r _D , Фм	а _D , Фм	V _s , МэВ	r _s , Фм	а _s , Фм	Ј _R , МэВ∙Фм³	Ј _w , МэВ∙Фм³
0.4	ΦП	62	1.25	0.62	0.104	1.15	0.57	16.46	1.15	0.40	747.97	11
0.6	ΦП	59	1.25	0.65	0.65	1.15	0.770	12.5	1.15	0.55	760.87	11
0.9	ΦП	55.98	1.25	0.65	0.95	1.15	1.050	10.5	1.15	0.50	721.20	47
1.15	ΦП	51	1.25	0.78	1.54	1.15	0.48	5.50	1.15	0.65	693.64	77
1.4	ΦП	54	1.25	0.65	1.50	1.15	0.74	10.0	1.15	0.50	709	44
5.3	ΦП	48.5	1.25	0.65	2.00	1.15	0. 54	12.50	1.15	0.84	631.65	38

Таблица 2. Параметры оптических потенциалов для упругого рассеяния протонов на ядре ^{10}B

3.2 Расчет сечений радиационного захвата протонов и вычисления астрофизических S-факторов и скоростей реакций ¹⁰B(p, γ)¹¹C

Проведен расчет астрофизического S- фактора и скоростей реакций радиационного захвата 10 B(p, γ) 11 C. Поскольку в этой реакции происходят радиационные захваты через резонансные состояния, расчеты проводились в рамках R-матричного подхода. Следует отметить еще раз, что основной особенностью данного подхода является то, что он позволяет учитывать корректным образом вклады как резонансного, так и прямого радиационных захватов. Последнее осуществляется благодаря нормировке вклада прямой части амплитуды радиационного захвата через АНК.

3.2.1 R-матричный подход

Согласно R – матричной теории вся область взаимодействия частиц делится на две части: внутренняя часть ($0 \le r \le r_c$), где взаимодействия между частицами происходит за счет ядерных сил и внешняя часть ($r \ge r_c$), где преобладает кулоновские силы. Полная амплитуда реакции также будет состоит из суммы резонансной части (внутренняя область), нерезонансной части (внешняя область) и их интерференции. В R-матричном подходе сечение радиационного захвата $A(a, \gamma)B$ в связанное состояние ядра *B* со спином J_t дается соотношением [11-13]

$$\sigma_{J_f}(E) = \frac{\pi}{4k^2} \sum_{I_i, J_i, L} (2J_i + 1) \left| M_{I_i, J_i, J_i, L} \right|^2$$
(1)

Здесь J_i – полный угловой момент сталкивающихся (*a* и *A*) ядер в начальном состоянии, *I* и l_i – спин и относительный орбитальный момент начального канала, соответственно, *L* – мультипольность электромагнитного перехода, $k^2 = 2\mu_{aA}E$ и μ_{aA} – приведенная масса *a* и *A* частиц. $M_{ll_iJ_iJ_iL}$ – амплитуда перехода из начального состояния (*I*, l_i , J_i) к конечному состоянию (J_f , *I*, *L*).

Амплитуда перехода $M_{II_i,J_i,L}$ представляется в виде суммы резонансной ($M_{II_i,J_i,J_fL}^{(R)}$) и нерезонансной $\left(M_{II_i,J_i,J_fL}^{NR}\right)$ амплитуд. В одноуровневом приближении амплитуду резонансного захвата можно представить в виде: [11-13]

$$M_{I_{l},J_{i},J_{f},L}^{(R)} = ie^{(\varpi_{i_{l}},\delta_{i_{l}})} \frac{\left[\Gamma_{I_{l},J_{i}}^{(p)}(E)\right]^{1/2} \left[\Gamma_{J_{i},J_{f},L}^{(\gamma)}(E)\right]^{1/2}}{E - E_{\lambda}^{(R)} + i\frac{\Gamma_{J_{i}}}{2}}$$
(2)

Здесь $\overline{\varpi}_{l_i}$ – кулоновская aA – фаза рассеяния, δ_{l_i} – фаза aA рассеяния на непроницаемой сфере, $\Gamma_{ll_i,l_i}^{(p)}(E)$ - протонная парциальная ширина резонанса в (a+A) – канале, $\Gamma_{J_iJ_jL}^{(\gamma)}(E)$ – радиационная ширина для распада резонанса, Γ_{J_i} – полная ширина резонансного уровня ядра B, определяемая как $\Gamma_{J_i} \approx \sum_{ll_i} \Gamma_{ll_iJ_i}^{(p)}$. Энергетическая зависимость парциальных ширин определяется соотношением [11-13]

$$\Gamma_{Il_{i}J_{i}}^{(p)}(E) = \frac{2P_{l_{i}}(E)(\gamma_{Il_{i}J_{i}}^{(p)})^{2}}{1 + (\gamma_{Il_{i}J_{i}}^{(p)})^{2} \left(\frac{dS_{c}}{dE}\right)_{E=E_{\lambda}^{(R)}}},$$
(3)

$$\Gamma_{J_{r}J_{f}L}^{(\gamma)}(E) = \frac{2k_{\gamma}^{2L+1}(E)(\gamma_{J_{r}J_{f}L}^{(\gamma)})^{2}}{1 + (\gamma_{I_{r}J_{i}}^{(p)})^{2} \left(\frac{dS_{c}}{dE}\right)_{E=E_{\lambda}^{(R)}}},$$
(4)

где k_{γ} – импульс фотона, $P_{l_i}(E)$ – фактор проницаемости [11], S_c – фактор сдвига [11]. Амплитуда приведенной радиационной ширины состоит из внутренней и внешней (канальной) частей т.е.:

$$\gamma_{J_i J_f L}^{(\gamma)} = \gamma_{J_i J_f L}^{(\gamma)}(\text{int}) + \gamma_{J_i J_f L}^{(\gamma)}(ext) .$$
 (5)

Явный вид внутренней и внешней приведенных ширин приведены в [13]. Наблюдаемые значения протонной и радиационной ширин резонансных уровней *В* определяются как

$$\Gamma_{\exp}^{(p)} = \left| \Gamma_{l_l,J_i}^{(p)}(E_{\lambda}^R) \right| \quad \mathbf{M} \quad \Gamma_{\exp}^{(\lambda)} = \left| \Gamma_{J_i,J_f L}^{(\gamma)}(E_{\lambda}^R) \right| \tag{6}$$

Нерезонансная амплитуда $M_{II_iJ_iJ_fL}^{NR}$ в длинноволновом приближении для EL – мультипольного перехода дается выражением

$$M_{ll_{i}J_{i}J_{f}L}^{NR,EL} = i^{l_{i}+L-l_{f}} \sqrt{\frac{2\mu}{k_{i}}} k_{\gamma}^{L+1/2} \left[\frac{Z_{a}}{m_{a}^{L}} + (-1)^{L} \frac{Z_{A}}{m_{A}^{L}} \right] \times \\ \times \left[\frac{(L+1)(2L+1)}{L} \right]^{1/2} \frac{1}{(2L+1)!!} C_{l_{i}0L0}^{l_{f}0} \times \\ \times \sqrt{(2l_{i}+1)(2J_{f}+1)} W(Ll_{f}J_{i}I;l_{i}J_{f}) C_{l_{f}I} \int_{r_{c}}^{\infty} d\mathrm{rr}^{L} \times \\ \times W_{-\eta_{ad},l_{f}+1/2} (2\chi_{aA}\mathrm{r}) \left[I_{l_{i}}(\mathrm{r}) - e^{2i(\varpi_{l_{i}}-\delta_{l_{i}})} O_{l_{i}}(\mathrm{r}) \right]$$

где $I_{l_i}(\mathbf{r})(O_{l_i}(\mathbf{r}))$ – входящая (выходящая) кулоновская волновая функция aA-рассеяния, $W_{\alpha;\beta}(x)$ – функция Уиттекера, $C_{l_i0l_20}^{l_30}$ – коэффициент Клебша – Гордона, W(abcd:ef) – коэффициент Рака и C_{l_fl} – асимптотический нормировочный коэффициент (АНК) интеграла перекрытия волновых функций связанной состояний ядер B и A. Отсюда видно, что амплитуда нерезонансного радиационного захвата нормируется через АНК, C_{l_fl} . Это позволяет фиксировать вклад амплитуды нерезонансной части, что облегчает процесс подгонки резонансных ширин.

3.2.2 Астрофизический S – фактор прямого радиационного захвата ¹⁰ B(p, y)¹¹ C и скорость реакции

Проведен расчет астрофизического S – фактора реакции радиационного захвата ¹⁰В(р, γ)¹¹С с учетом вкладов как резонансных радиационных распадов так и прямого радиационного захвата в основное состояние $(J_f^{\pi} = 3/2^-, 0)$ ядра ¹¹С. Было использовано значение АНК (8.9±0.8 Фм⁻¹), полученное из анализа реакции ¹⁰В(³He,d)¹¹С. Значение радиуса канала r_c (r_c=4.2 Фм) было выбрано таким, чтобы радиальные части волновых функций связанного состояния и состояния рассеяния одновременно вышли на свои асимптотики. В качестве экспериментальных данных по астрофизическому S – фактору были рассмотрены результаты работы [1]. В таблице 3 приведены параметры резонансных состояний, учтенных в данном расчете.

Значения полных ширин и радиационных выходов подбирались так, чтобы наилучшим образом описать экспериментальные астрофизические Sфакторы в области сверхнизких энергий, $0 \le E \le 2$ МэВ. Значения радиационных мощностей (4-я колонка) для электромагнитных переходов из соответствующих резонансных состояний в основное состояние ядра ¹¹С являются новым результатом, полученным в данном проекте.

	Полная ширина	Γ_i (кэВ)	Радиационная мощность
Резонансное состояние J_i^*, E_{res} (МэВ)	адаптированные нами значения	[1]	$ig(2J_i+1ig)\Gamma^{(p)}_{I_l_iJ_i}\Gamma^{(\gamma)}_{J_iJ_fL}/\Gamma_i$ (эВ)
5/2 ⁺ , 0.010	15.	14.55	4.68×10 ⁻¹⁷
5/2 ⁺ , 0.56	550.	550.	0.5591
3/2 ⁻ , 1.0	230.	230.	3.2174
5/2 ⁻ , 1.2	160.	260.	0.61875
7/2, 1.41	230.	130.	0.1587
5/2 ⁺ , 2. (фоновый)	200.	-	2.4

Таблица 3. Параметры резонансных состояний для реакции ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$



Рисунок 7. Астрофизический S – фактор для реакции ¹⁰B(p, γ)¹¹C. Штрихами показан вклад прямого радиационного захвата.

Следует отметить, что наилучшее описание экспериментальных данных было достигнуто тогда, когда вклад других резонансных радиационных распадов через резонансные состояния, находящиеся выше по энергии, был учтен путем замены их одним фоновым резонансным радиационным распадом (последняя строка).

На рисунке 7 приведен результат расчета астрофизического S-фактора радиационного захвата для реакции 10 B(p, γ) 11 C. Штриховой линией показан вклад прямого радиационного захвата.

Как видно из рисунка 7, вклад прямого радиационного захвата в полный астрофизический S – фактор является довольно заметным. Последнее указывает на необходимость учета вклада прямого радиационного захвата при расчете скорости рассматриваемой реакции.

Нами была рассчитана также скорость реакции радиационного захвата ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ с радиационным переходом в основное состояние ядра ${}^{11}C$. Результат данного расчета приведен на рисунке 8. Для сравнения на этом же рисунке приведены данные о скорости реакции из работы [14] (штриховая линия). Как видно из рисунка 8 наши расчеты являются заниженными относительно результатов работы [14]. Это разногласие возникает из за того, что расчеты астрофизического S-фактора радиационного захвата



Рисунок 8. Скорость реакции радиационного захвата ¹⁰B(p, γ)¹¹C. Штриховой линией представлены результаты работы [14].

учитывают переходы только в основное состояние ядра ¹¹С без учета других связанных состояний.

Заключение

Для расчетов характеристик перспективных ядерно-энергетических установок и параметров эволюций астрофизических объектов в настоящей работе были выполнены с точностью 10% измерения дифференциальных сечений упругого рассеяния протонов на ядрах ¹⁰В в диапазоне энергии 400-1400 кэВ в широком интервале углов. Ход кривой функции возбуждения ¹⁰В(р,р)¹⁰В измеренной в энергетическом интервале $E_{p,лаб.} = 360$ до 1400 кэВ с шагом 10-20 кэВ для угла $\theta_{лаб.} = 168^{\circ}$ и с точностью 10% показал, что резонансы в упругом канале и расположенные ниже $E_{p, лаб.} = 1400$ кэВ выделяются очень слабо. Это не исключает возможность достаточно корректного извлечения эффективных параметров оптического потенциала взаимодействия протона с ¹⁰В в этой области энергий.

Интегральное сечение реакции ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$, найденное в настоящей работе для $E_{p, na6.} = 1200$ кэВ, находится в хорошем согласии с данными [1] которые и были проанализированы нами в рамках Rматричного подхода.

Анализ экспериментальных данных по упругому рассеянию, полученных в настоящей работе и в ра-

ботах [2-5], выполненный в рамках оптической модели позволил определить оптимальные параметры ядерного потенциала для системы p+¹⁰B в области низких и сверхнизких энергий. Анализ в частности показал, что при энергиях налетающих протонов менее 5.3 МэВ экспериментальные данные невозможно описать в полном угловом диапазоне используя разумные параметры потенциала оставаясь лишь в рамках феноменологической оптической модели. Поэтому описание данных при энергии 5.3 МэВ и экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, проводилось с использованием фолдинг-потенциала.

При расчете астрофизического S – фактора реакции ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ с учетом вкладов как резонансных радиационных захватов так и прямого радиационно-

го захвата в основное состояние ¹¹С было использовано значение АНК ($8.9\pm0.8 \, \Phi M^{-1}$), полученное из анализа реакции ¹⁰В(³He,d)¹¹С. При описании данных [1] в области энергий менее 2 МэВ были найдены новые значения полных ширин и радиационных выходов. Впервые в настоящей работе получены значения радиационных мощностей для электромагнитных переходов из соответствующих резонансных состояний в основное состояние ¹¹С.

Также было показано, что вклад прямого радиационного захвата в полный астрофизический S – фактор является довольно заметным.

Проведен расчет скоростей реакции радиационного захвата 10 B(p, γ) 11 C с радиационным переходом в основное состояние ядра 11 C.

Литература

- 1. Wiescher M., Boyd R.N., Blatt S.L., Rybarcyk L.J., Spiruoco J.A. 11C level structure via the 10B(p,γ) reaction // Phys. Rev. C. 1983. V.28, №4. P.1431.
- Watson B.A., Singh P.P., Segel R.E. Optical-model analysis of nucleon scattering from 1p-shell nuclei between 10 and 50 MeV // Phys.Rev. – 1969. – V.182. – P.977-989.
- Schrank G., Warburton E.K., Daehnick W.W. Inelastic scattering of 17 MeV protons from 9Be, 10B, 20Ne, 25Mg and 26Mg. // Phys. Rev. – 1962. – V.127. – P.2159-2179.
- 4. Kull L.A. and Kashy E. Study of reactions 10B(p,d)9B and 11B(p,d)10B. // Phys.Rev. 1968. V.167. P.963-970.
- Squier G.T.A, Johnston A.R., Spiers W., Harbison S.A., Stewart N.M. Cross section measurements for the reactions 10B(p,d)9B and 10B(p,t)8B. // Nucl.Phys. – 1970. – V.A141. – P.158 – 168.
- 6. Butler J.W. // U. S. Naval Research Laboratory. NRL Report. 1959. P.5282.
- 7. Lyons P.B., Toevs J.W., Sargood D.G.. Total yield measurements in 27Al(p,γ)28Si. // Nucl. Phys. A. 1969. V.130. P.1.
- 8. N. Burtebayev, S.B. Igamov, R. J. Peterson, R. Yarmukhamedov and D.M. Zazulin. New measurements of the astrophysical S-factor for the $12C(p,\gamma)13N$ reaction at low energies and the asymptotic normalization coefficient (nuclear vertex constant) for the $p+12C \rightarrow 13N$ // Phys. Rev. C. -2008. V.78. 035802.
- 9. Зазулин Д.М. Экспериментальные исследования радиационного захвата протонов ядрами 1р-оболочки при низких энергиях // Вестник НЯЦ РК. 2007. вып.3. С.22-31.
- 10. Zelenskaya N.S., Teplov I.B. // Exchanges processes in nuclear reaction. 1985 Moskow.
- 11. F.C. Barker and T.Kajino Aust. J. Phys. 44 (1991) 369
- 12. Sattarov, A.M. Mukhamedzhanov et al. Phys. Rev. C 60 (1999)
- 13. C.Angulo, P. Descouvemont. Nucl. Phys. A 690 (2001) 755
- 14. Angulo at all. Nucl. Phys. A 656 (1999)3-183.

ЯДРОЛЫҚ, ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРЛАРДА ЖӘНЕ АСТРОФИЗИКАЛЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДА ¹⁰В-МЕН ӨТЕТІН ПРОЦЕСТЕРДІ ЕСЕПТЕУ ҮШІН ҚАЖЕТТІ ПРОТОНДАРДЫҢ ӨЗАРА ІС-ӘРЕКЕТІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН АНЫҚТАУ

¹⁾ Бөртебаев Н., ¹⁾ Бақтыбаев М.К., ¹⁾ Зазулин Д.М., ¹⁾ Керімқұлов Ж.Қ., ²⁾ Артемов С.В., ²⁾ Игамов С.Б., ²⁾ Ярмухамедов Р.

¹⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан ²⁾ Ядролық физика институты, Ташкент, Өзбекстан

 $E_{p, 3epr.} = 400 - 1400$ кэВ энергия аралықтарында $\theta_{3epr.} = 10 - 168^{\circ}$ бұрыштарда 10° қадаммен серпімді ¹⁰B(p,p)¹⁰B шашырау үрдістерінің дифференциалдық қималарының 10%-ға жақын дәлдігі алынды. Осы нәтижелер негізінде және қолдағы әдеби мәліметтерді талдау барысында төмен энергиялар аумағына арналған феноменологиялық және жартылай микроскоптық оптикалық моделдері шеңберіндегі есептеулер жүзеге асырылды. Протонның төмен және аса төмен энергияларда ¹⁰B-мен өзара әрекеттесуінің оптикалық потенциалының оңтайлы параметрлері табылды. 168° бұрышы үшін 340-тан бастап 1400 кэВ энергиялары аралықтарында 10 кэВ қадаммен ¹⁰B(p, p)¹⁰B үрдісінің қозу функциясы өлшенді. $E_{p, 3epr.} = 1200$ кэВ кезінде 10%-дық қателіктегі 0°, 45°, 90° және 135° бұрыштары үшін протондарды ¹⁰B ядроларымен (негізгі күйге өткен) радиациялық басып алуының дифференциалды қималарының эксперименттік мәндері алынды, бұл үрдістің интегралдық қимасы табылды. Төмен және аса төмен энергиялар кезіндегі ¹¹С-ның негізгі күйінде ¹⁰B(p, γ)¹¹С

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОНОВ С ¹⁰В, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЯДЕРНОМ, ТЕРМОЯДЕРНОМ РЕАКТОРАХ И В АСТРОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

 $E_{p, 3ept.} = 0 - 1.41$ МэВ энергиялары аумағында орналасқан ¹⁰В(р, γ)¹¹С реакциясының резонанс параметрлерінің жаңа мәндері табылды. Есептеулер R-матрицалық әдісі шеңберінде өткізілді, ол радиациялық басып алулардың түзу де, резонанстық та салымының дұрыс бейнесін ескеруге мүмкіндік берді. Бұл әдісте асимптотикалық нормалық коэффициенттер (АНК) пайдаланылды, ол радиациялық басып алудың бейрезонанстық амплитудаларының бір бөлігінің мөлшерленуін және арналардың берілген радиациялық ендерінің амплитудасын анықтайды.

DETERMINATION OF THE PROTONS WITH ¹⁰B INTERACTION PARAMETERS ESSENTIAL FOR CALCULATIONS OF PROCESSES IN NUCLEAR, THERMONUCLEAR REACTORS AND IN ASTROPHYSICAL CONDITIONS

¹⁾ N. Burtebaev, ¹⁾ M.K. Baktybaev, ¹⁾ D.M. Zazulin, ¹⁾ Zh.K. Kerimkulov, ²⁾ S.V. Artemov, ²⁾ S.B. Igamov, ²⁾ R. Yarmuhamedov

¹⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan ²⁾ Institute of Nuclear Physics, Tashkent, Uzbekistan

With an accuracy of about 10%, the differential cross sections of elastic ${}^{10}B(p,p){}^{10}B$ scattering in the energy range of $E_{p, lab.} = 400 - 1400$ keV at the angles $\theta_{lab.} = 10 - 168^{\circ}$ in steps of 10° have been measured. On the basis of these results and analysis of the available literature data the calculations in terms of the phenomenological and semi-microscopic optical model have been made for low energies. Optimal parameters of the optical potential of the interaction between protons and ${}^{10}B$ at low and very low energies have been found. The ${}^{10}B(p,p){}^{10}B$ process excitation function in the energy range from 340 to 1400 keV in steps of 10 keV and at the angle $\theta_{lab.} = 168^{\circ}$ have been measured. The experimental values of the differential cross sections of the ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ reaction (for the transition to the ${}^{11}C$ ground state) for $E_{p, lab.} = 1200$ keV at the angles of 0°, 45°, 90° and 135°, with an error of about 10% have been obtained and the integral cross section of the process have been found. The calculation of the astrophysical S-factor and the rate of the radiative capture reaction ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ (for the transition to the ${}^{11}C$ ground state) at low and ultralow energies has been made. The new values of the resonances of the reaction ${}^{10}B(p,\gamma){}^{11}C$ located in the area of $E_{p, lab.} = 0 - 1.41$ MeV have been found. The calculations were performed within the R - matrix approach, which takes correctly into account the contributions of both resonance and direct radiative captures. In this approach the asymptotic normalization coefficient (ANC) which defines the normalization of the non-resonant part of the amplitude of the radiative capture and reduced radiative width amplitude of channel was used.

УДК 539.172.15.

ИНКЛЮЗИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ (³He,xd), (³He,xt) И (³He,xa) НА ЯДРЕ ²⁷АІ ПРИ ЭНЕРГИИ ³He 50,5 МэВ

Дуйсебаев А., Дуйсебаев Б.А., Жолдыбаев Т.К., Садыков Б.М.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Роль новых ядерно-физических экспериментов в создании базы ядерных данных и развитии теоретических моделей в соответствии с современными подходами является ключевой как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях, связанных, в частности, с разработкой электро-ядерных установок (Accelerator Driven System, ADS) для ядерной трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов атомной промышленности и производства энергии. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование инклюзивных спектров дейтронов, тритонов и α -частиц, испускаемых в реакциях, инициируемых налетающими ионами ³ не с энергией 50,5 МэВ на ядре ²⁷ Al в широком угловом и энергетическом диапазоне. Анализ экспериментальных сечений реакций осуществлялся в рамках экситонной модели предравновесного распада ядер, позволяющей описать вылет из составного ядра частиц с массовыми числами от 1 до 4. Также рассчитаны вклады процессов, ответственных за реакции прямых передачи и выбивания нуклонов с учетом кластерных степеней свободы.

«Если атомная энергетика не станет абсолютно безопасной, она вовсе перестанет существовать... Поиск конструкции реактора, в котором все подчинено одной идее – безопасности обладает абсолютным приоритетом, пусть даже в ущерб некоторым другим экономическим и техническим показателям».

> Лауреат Нобелевской премии академик Басов

Введение

Исследования по разработке принципиально нового поколения ядерно-энергетической системы с высоким уровнем безопасности (Accelerator Driven System (ADS)), состоящей из ускорителя протонов (дейтонов) с энергией 0,8-1,5 ГэВ и током 30-100 мА, нейтронопроизводящей мишени мощностью 30-100 МВт и подкритического реактора (бланкета) с потоком тепловых нейтронов $(1-5)10^{15}$ см⁻² с⁻¹ [1, 2] развернуты в США - программа «ABC\ATW», Японии – «ОМЕГА», Франции – «SPIN», «SATURNE», в России «Energy and Transmutation», SNEPT - Европейская стратегическая технологическая платформа устойчивого развития атомной энергетики с программой «MYRRHA» -Бельгия, являющейся составной частью Европейского комплекса перспективных исследовательских реакторов ADS [3, 4].

Согласно физическому сценарию работы ADS, высокоэнергичные протоны при прохождении мишенной сборки порождают не только нейтронный поток, но и спектр более сложных нуклидов^{2,3} H,^{3,4} Не и т.д., которые выступают в качестве агентов инициирующих реакции с испусканием вторичных нейтронов. Диапазон нуклонного состава и энергий возбуждения в системе ADS существенно шире чем в традиционных реакторах, что требует качественно нового ядерного константного обеспечения, которые могут быть получены из экспериментальных данных реакций инициированных нуклидами и легчайшими ядрами с конструкционными элементами бридера. Физически и экономически невозможно измерить в столь широком диапазоне энергий и масс все необходимые сечения ядерных реакций с точностью не более 15% для элементов ADS. В этой ситуации крайне важны получение экспериментальных «реперных» сечений реакций и разработка и развитие ядерных моделей механизма реакций, повышение их предсказательной силы. В этом аспекте, особое значение имеет развитие концепции предравновесного распада ядер, отражающей динамику образования и эволюции возбужденной системы к равновесному состоянию [5-8]. Интерес представляет исследование инклюзивных распределений легких заряженных частиц и ядер, инициированных ионами ³He, ⁴He, где к настоящему времени экспериментальная информация крайне ограничена [9-12].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Измерения сечений ядерных реакций (³He,xd), (³He,xt) и (³He,xa) выполнены на изохронном циклотроне У–150М ИЯФ НЯЦ РК [13, 14]. Энергия налетающих ионов ³He составила 50,5 МэВ. Измерения инклюзивных спектров d, t, a проведены в угловом диапазоне 15-135°. В качестве исследуемого ядра выбран ²⁷Al (моноизотопная мишень толщиной 3,65 мг/см²), как кандидат на конструкционный элемент ядерно-энергетических установок.

Идентификация продуктов исследуемых реакций по массам и энергии на основе ($\Delta E - E$) метода осу-

ществлялась системой многомерного программируемого анализа с использованием спектрометрических линеек на основе электроники фирм ORTEC и POLON, блок-схема которой представлена на рисунке 1. При этом реализована новая интегрированная схема, включающая в себя амплитудноцифровой преобразователь, счетчики импульсов и крейт-контроллер с последующим выходом на ПК. Сигналы от $\Delta E-$ и E-детекторов поступают по двум спектрометрическим трактам («Е», «dE») на двумерный анализатор, выполненный на микроконтроллерах и представляющий собой выносной блок, подключаемый к USB-порту персонального компьютера. Системная программа задает режимы работы анализатора и передачу данных в компьютер, в программу для графической визуализации данных и сохранения их в его файлах.

Амплитуды сигналов фиксируются пиковыми детекторами. При поступлении сигнала *Строб* зафиксированные амплитуды входного сигнала преобразуются в цифровой код синхронно по обоим каналам. Сигнал *Строб* формируется вне выносного блока при одновременном (в пределах разрешающего времени схемы совпадений) поступлении сигналов ΔE – и E–детекторов, что соответствует прохождению заряженной частицы через оба детектора. Оцифрованные значения «*E*»и «*dE*» определянот индексы матрицы типа MATRIX [*E*, *dE*].

Выносной блок содержит также счетчик управляющих импульсов для оценки величины просчетов в набираемой двумерной матрице путем сопоставления их числа с интегральным количеством событий, зарегистрированных в поле матрицы, и два счетчика внешних событий (сигналов от интегратора тока пучка ускорителя и монитора мишени).



ЗЧПУ – зарядово-чувствительный предусилитель, УСИЛ – усилитель, ЛЗ – линия задержки, СС – схема совпадений, ЛВ – линейные ворота, БЗ – блок задержки

Рисунок 1. Блок-схема системы регистрации и идентификации заряженных частиц

При измерении спектров заряженных частиц в большом энергетическом диапазоне возникают трудности с выбором детекторов полного поглощения (Е-детекторов). Для измерения однозарядных частиц нами используется в качестве стопового детектор на основе сцинтиллятора CsI(Tl). В качестве пролетных детекторов установлены кремниевые детекторы толщиной 100 – 200 мкм. При измерении вторичных α -частиц толщины тонких dE-детекторов составляли 25 – 50 мкм. Стоповым детектором служил толстый кремниевый детектор толщиной 1 мм.

Полученные в результате обработки экспериментальных спектров дважды–дифференциальные сечения реакции (³He,xd), (³He,xt) и (³He,xa) на ядре ²⁷Аl при энергии налетающих ионов ³He = 50,5 MэB представлены на рисунках 2 – 4. В спектрах дейтронов, измеренных под передними углами проявляется широкий бамп в сечениях, связанный с развалом ³He в поле ядра мишени.

Из качественного рассмотрения полученных инклюзивных спектров следует, что сечения высокоэнергетических частиц с ростом угла падают при сохранении корреляции с направлением первичной частицы во входном канале. Такая зависимость на примере дважды-дифференциальных сечений реакций ²⁷Al(³He,xd) при $E_{3He} = 50,5$ МэВ для различных диапазонов энергий вылетающих дейтронов приведена на рисунке 5.



Рисунок 2. Дважды дифференциальные сечения реакции ²⁷Al(³He,xd) при E(³He) = 50,5 МэВ при различных углах регистрации дейтронов



Рисунок 3. Дважды–дифференциальные сечения реакций ²⁷Al(³He,xt) при E(³He) = 50,5 МэВ при различных углах регистрации тритонов



Рисунок 4. Дважды–дифференциальные сечения реакций ²⁷Al(³He,xα) при E(³He) = 50,5 МэВ при различных углах регистрации α–частиц

Экспериментальные данные по дважды– дифференциальным сечениям реакции (³He,xd), (³He,xt) и (³He,xa) на ядре ²⁷Al при энергии налетающих ионов ³He 50,5 МэВ проинтегрированы в измеренном угловом диапазоне. Полученные интегральные сечения, усредненные в диапазоне энергий 0,5 МэВ, представлены на рисунках 6-8. Величины экспериментальных парциальных сечений соответствующих реакций приведены в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные парциальные сечения реакций (³He,xd), (³He,xt) и (³He,xa) на ядре ²⁷Al при $E_{3He} = 50,5 M_{2}B$

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	Сечение, мбн
(³ He,xd)	11,5 – 46,0	61,4 ± 0,2
(³ He,xt)	16,5 – 38,5	5,4 ± 0,1
(³ He,xα)	26,5 - 48,0	6,2 ± 0,1

Теоретический анализ экспериментальных результатов был выполнен в рамках модифицированной версии экситонной модели предравновесного распада ядер [15 – 18]. В рамках этой модели принимается, что ядро имеет набор эквидистантных одночастичных состояний. Взаимодействие, в результате которого ядро переходит из одного состояния в другое, считается двухчастичным и достаточно слабым, что позволяет применить теорию возмущений при вычислении вероятностей переходов. Энергия системы сохраняется. В двухкомпонентной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются раздельно.

Состояние ядра характеризуется четырьмя параметрами p_{π} , h_{π} , p_{ν} и h_{ν} , где p и h обозначают частичные и дырочные, а π и ν протонные и нейтронные степени свободы, соответственно. Компаунд ядро формируется с частично–дырочной конфигурацией, которая учитывает налетающие нуклоны как частичные степени свободы и не учитывает дырочные степени свободы. Такая конфигурация обозначается как (p_{π} , h_{π} , p_{ν} , h_{ν})=(Z_a , 0, N_a , 0), где a относится к бомбардирующей частице.



Нижние треугольники – 15 МэВ, кружки – 20 МэВ, квадраты– 30 МэВ, верхние треугольники – 40 МэВ.

Рисунок 5. Зависимость дважды–дифференциальных сечений реакций ²⁷Al(³He,xd) при E(³He) = 50,5 МэВ от угла регистрации для различных диапазонов энергии вылетающих дейтронов

Предполагается, что разность между числом частиц и дырок в процессе перехода в равновесное состояние остается постоянной и для компаунд ядра $p_{\pi} - h_{\pi} = Z_a, p_v - h_v = N_a$ и $p - h = A_a$, где A_a – массовое число налетающей частицы. Это условие не всегда выполняется, особенно при приближении к состоянию равновесия, но вполне адекватно для вычисления предравновесной компоненты спектра.

В двух-компонентной экситонной модели используется два набора одночастичных состояний, отдельно для протонов и нейтронов и определяются плотностью одночастичных состояний соответственно $g_{\pi 0}$ и g_{v0} , пропорциональных Z и N рассматриваемого ядра:

$$g_{\pi 0} = \frac{Z}{K_g},\tag{1}$$

$$g_{\nu 0} = \frac{N}{K_{\sigma}}.$$
 (2)

Плотность частично-дырочных возбужденных состояний ядра бралась согласно Вильямсу [19]:

$$\omega_{ESM}(p, p_{\pi}, E) = \frac{(g_{\pi 0})^{n_{\pi}} (g_{\nu 0})^{n_{\nu}} (E - A(p, p_{\pi}, E))^{n-1}}{p_{\pi}! h_{\pi}! p_{\nu}! h_{\nu} (n-1)!}, (3)$$

где $A(p,p_{\pi}E)$ поправка, определяемая принципом Паули.

Во всех расчетах в качестве исходной бралась $(p_{\pi}, h_{\pi}, p_{\nu}, h_{\nu}) = (2, 0, 1, 0)$ частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент K_g принимался равным 15 МэВ. При параметризации квадрата матричных элементов использовались значения нормировочных констант: $K_{\pi\pi} K_{\pi\nu} K_{\nu\nu} = 2200: 900:$ $900 M_{3}B^{2}$, рекомендованные в PRECO-2006 [20], использованной нами в качестве основной расчетной программы.

Для полного описания эмиссии частиц в ядерных реакциях, в дополнение к вычислениям в рамках экситонной модели, были проведены расчеты в рамках механизма Вайскопфа распада из составного ядра и учтен вклад прямых процессов (передача – выбивание нуклонов).

На рисунке 6–8 совместно с экспериментальными результатами представлены рассчитанные вклады механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакций (³He,xd), (³He,xt) и (³He,x\alpha) на ядре ²⁷Al при энергии ³He ионов 50,5 МэВ. В таблице 2 приведены численные значения вкладов различных механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров.

Из сравнения экспериментальных и теоретически рассчитанных интегральных спектров следует, что предравновесный механизм является определяющим в формировании сечений (³He,xd) в середине энергетического диапазона (рисунок 6). Высокоэнергетическая (с E>35 MэB) часть спектра определяется одноступенчатыми прямыми механизмами. В низкоэнергетической части спектра, в дополнение к предравновесному значительный вклад вносят распады из составного ядра.



Символы – эксперимент, 1 – одноступенчатые процессы, 2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение

Рисунок 6. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций ²⁷Al (³He,xd) с расчетами в рамках экситонной модели



2 – предравновесная компонента, 3 – равновесная эмиссия, 4 – суммарное интегральное сечение

Рисунок 7. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций ²⁷Al(³He,xt) с расчетами в рамках экситонной модели



Рисунок 8. Сравнение экспериментальных интегральных сечений реакций ²⁷Al(³He,xα) с расчетами в рамках экситонной модели

_	Энергетический	Механизмы ядерных реакций						
Реакция	диапазон, МэВ	прямой, мбн	предравновесный, мбн	равновесный, мбн	сумма, мбн			
(³ He,xd)	2 – 43	25,3 (9%)	170 (60%)	88,4 (31%)	283,7 (100%)			
(³ He,xt)	2 – 36	14,3 (44,5%)	10,9 (34%)	6,9 (21,5%)	32,1 (100%)			
$(^{3}$ He,x $\alpha)$	3 – 40	12,1 (9,7%)	47,8 (38,5%)	64,4 (51,8%)	124,3 (100%)			

Таблица 2. Вклады механизмов ядерных реакций в формирование интегральных спектров (³He,xd), (³He,xt) и (³He,xa) на ядре ^{27}Al при $E_{3He} = 50,5$ МэВ

На рисунке 7 с экспериментальными результатами представлены рассчитанные вклады механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакций (³He,xt) на ядре ²⁷Al. Из сравнения экспериментальных и теоретически рассчитанных интегральных спектров следует, что образование вторичных тритонов в диапазоне энергий 18 – 35 МэВ идет преимущественно через одноступенчатые прямые механизмы. Низкоэнергетическая часть спектра тритонов формируется двумя конкурирующими процессами – предравновесным и составным.

При рассмотрении вкладов механизмов, формирующих инклюзивные сечения реакций (³He,x α) (рисунок 8), следует, что образование α -частиц низких энергий идет преимущественно через равновесное излучение. Начиная с энергии 15 МэВ преобладающим процессом становится вылет предравновесных α -частиц. За высокоэнергетическую часть спектра (более 25 МэВ) ответственны одноступенчатые прямые механизмы.

Заключение

При анализе дважды–дифференциальных и интегральных сечений реакций в рамках действующих теоретических подходов, установлено, что сечения в реакциях (³He,xd) и (³He,xa) на ядре ²⁷Al при энергии ³He ионов 50,5 МэВ преимущественно формируются механизмами предравновесного распада и распада через составное ядро. В реакции (³He,xt) значительный вклад в инклюзивные сечения вносят одноступенчатые прямые механизмы.

Полученные экспериментальные результаты восполняют отсутствующие величины сечений исследованных реакций и могут быть использованы при разработке новых подходов теории ядерных реакций, а также при конструировании гибридных ядерно—энергетических установок, ядерной медицине, в радиационном материаловедении, космической технике.

Работа выполнена при поддержке программы Грантового финансирования научных исследований МОН РК, грант 0606/ГФ.

Литература

- Carminati F. An energy amplifier for cleaner and inexhaustible nuclear energy production driven by a particle beam accelerator / F. Carminati, C. Geles, R. Klapisch, J.P. Revol, Ch. Roche, J.A. Rubio, C. Rubbia. – CERN report CERN/AT/93-47(ET).
- Bowman C. D. Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator-driven intense thermal neutron source / C. D. Bowman, E.D. Arthur, P.W. Lisowski, G.P. Lawrence, R.J. Jensen et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1992. – A.320 – P.336-367.
- 3. Leray S. Spallation neutron production by 0.8, 1.2, and 1.6 GeV protons on various targets / S.Leray, F. Borne, S. Crespin, J. Fréhaut, X. Ledoux, E. Martinez, Y. Patin, E. Petibon, P. Pras et al. // Phys. Rev. 2002. C65 P.044621.
- It Abderrahim H. A. MYRRHA: A multipurpose accelerator driven system for research & development / H. A. It Abderrahim, P Kupschus, E Malambu, Ph Benoit, K Van Tichelen, B Arien, F Vermeersch, P D'hondt, Y Jongen, S Ternier, D Vandeplassche // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2001. – A.463 – P.487-494.
- 5. Зайдель, К. Предравновесный распад в ядерных реакциях / К. Зайдель, Д. Зелигер, Райф // ЭЧАЯ. 1976. Т.7, вып.2. С.499-552.
- 6. Blann, M. Pre-equilibrium decay / M. Blann // Ann. Rev. Nucl. Sci. 1975. Vol.25. P.123-166.
- 7. Gadioli E. Pre-equilibrium Nuclear Reactions / E. Gadioli, P.E. Hodgson New York : Oxford Univ. Press, 1992. 328 p.
- Герасимов, А.С. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) / А.С. Герасимов, Г.В, Киселев // ЭЧАЯ. – 2001. – Вып.1 (32). – С.143-188.
- Bisplinghoff, J. Continuous particle spectra and angular distributions from different entrance channels forming ⁶⁵Zn at 37,4 MeV excitation / J. Bisplinghoff, J. Ernst, R. Lohr, T. Mayer–Kickuk, P. Meyer // Nucl. Phys. 1976. Vol. A269. P.147-158.
- Chevarier, A. Pre-equilibrium alpha emission induced by different incident channels: evidence for alpha preformation in nuclei / A. Chevarier, N. Chevarier, A. Demeyer, G. Hollinger, P. Petrosa and Tran Minh Duc // Phys. Rev. – 1975. – Vol. C11, №3. – P.886-894.
- Chevarier, A. Nistor M.E. Neutron, proton and α-particle emission from ³He induced reactions / A. Chevarier, N. Chevarier, A. Demeyer, A. Alevra, I.R. Lucas, M.T. Magda, M.E. Nistor // Nucl. Phys. 1974. Vol. A231. P.64-76.

- Дуйсебаев А.Д. Исследование реакций на ядрах ²⁷Al, ⁵⁹Co, ¹¹²Sn под действием ускоренных ионов ³He с энергией 34,8 МэВ с вылетом протонов, дейтронов, тритонов и α-частиц / А.Д. Дуйсебаев, Н. Буртебаев, Г.Н. Иванов, В.И. Канашевич, Э.И. Кэбин, В.А. Личман, Ю.И. Нечаев, В.А. Хаймин, В.Г. Сухаревский //Ядерная физика.- 1982.-Т.26, вып.1 (17).- С.32.
- 13. Арзуманов, А.А. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов / А.А. Арзуманов, Л.М. Неменов, О.И.
- Анисимов и др.// Изв. АН КазССР, сер. физ. -мат. 1973. № 4. С.6-15.
- 14. Дуйсебаев, А.Д. Камера рассеяния для исследования продуктов ядерных реакций на пучке циклотрона / А.Д. Дуйсебаев, Г.Н. Иванов, С.Н. Рыбин // Изв.АН КазССР, сер. физ. –мат. 1983. № 2. С.80-81.
- 15. Griffin J. J. Statistical model of intermediate structure / J. J. Griffin// Phys. Rev. Lett. 1966. Vol.17, № 9. P.478-481.
- Kalbach C. Two-component exciton model: Basic formalism away from shell closures / C. Kalbach // Phys. Rev. 1986. Vol. C33. - P.818-833.
- Kalbach C. Shell-corrected particle-hole state densities for pre-equilibrium reaction calculations / C. Kalbach / J. Phys. 1995. - Vol. G21. - P.1499-1518.
- Kalbach C. Pre-equilibrium reactions with complex particle channels / C. Kalbach // Phys. Rev. 2005. Vol. C71. P.034606-1 – 034606-23.
- 19. Williams F. C. Particle-hole state density in the uniform spacing model // Nucl. Phys. 1971. Vol.A166. P.231-240.
- 20. Kalbach C. PRECO-2006: Exiton model preequilibrium nuclear reaction code with direct reaction / C. Kalbach Durham NC 27708–0308, 2007. 184 p.

Е_{3HE}=50.5 МэВ КЕЗІНДЕ ²⁷АІ ЯДРОДА (³He,xd), (³He,xt) ЖӘНЕ (³He,xa) РЕАКЦИЯЛАРДЫҢ ИНКЛЮЗИВТІ ҚИМАЛАРЫ

Дүйсебаев А., Дуйсебаев Б., Жолдыбаев Т.К., Садықов Б.М.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Ядролық деректер базасын жасауда және қазіргі заманғы тәселдерге сай теориялық моделдерді дамытуда жаңа ядро-физикалық эксперименттердің атқаратын міндеті, жеке алғанда, атомдық өнеркәсіп пен энергия өндірудің ұзақ ғұмырлы радиоактивтік қалдықтарының ядролық трансмутациясы үшін электр-ядролық қондырғыларды (Accelerator Driven System, ADS) әзірлеумен байланысты іргелі, солай-ақ қолданбалы зерттеулерде кілттік болып табылады. Ядролық Физика Институтының изохронды циклотронында 15-135° бұрыштық ауқымда 15° адыммен Е_{зне}=50,5 МэВ кезінде ²⁷Аl ядроларында протондармен индукцияланған реакциялардан алынған протондардың инклюзивтік спектрлерін эксперименттік зерттеу осы жұмыстың мақсаты болып табылды. Реакциялардың эксперименттік қималарын талдау тепе-теңдік алдындағы ядролық реакциялар үшін экситондық моделіне сәйкес орындалған, бұл теңдестікке келуші құрама ядродан шыққан 1-ден 4-ке дейінгі массалық саны бар бөлшектердің эмиссиясын сипаттайды. Қосымша құраушылар тура нуклондық беріліс реакцияларын және тура соғып шығару процестерін ескере отырып, кластерлік еркіндік дәрежелерін қоса, жартылай эмпирикалық түрде есептелген.

THE INCLUSIVE CROSS SECTIONS OF REACTIONS (³He,xd), (³He,xt) AND (³He,xα) ON ²⁷AI NUCLEUS AT 50,5 MeV ENERGY OF ³He

A. Duisebaev, B. Duisebaev, T.K. Zholdybayev, B.M. Sadykov

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

The role of new nuclear-physics experiments in the creation of nuclear databases and development of theoretical models in accordance with modern approaches is key in both fundamental and applied researches related in particular to the development of electro-nuclear plants (Accelerator Driven System, ADS) for nuclear transmutation of long-lived radioactive nuclear wastes and energy production. The purpose of this work has been the experimental investigation of inclusive spectra of deuterons, tritons and α -particles emitted from ³He induced reactions on ²⁷Al nucleus at E_{3He}=50,5 MeV in angular range 15÷135° with the step 15° on isochronous cyclotron in Institute of Nuclear Physics. The analysis of experimental cross-sections of reactions is carried out in accordance with exciton model for pre-equilibrium nuclear reactions that describes the emission of particles with mass numbers of 1 to 4 from an equilibrating composite nucleus. Additional components are calculated semi-empirically to account for direct nucleon transfer reactions and direct knockout processes involving cluster degrees of freedom.

ТОРОИДНЫЙ МОМЕНТ В ПОИСКАХ НАРУШЕНИЙ ДИСКРЕТНЫХ СИММЕТРИЙ И В ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРИМЕНЕНИЯХ

Карташов В.М., Алдияров Н.У., Талпакова К.А.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Объектом исследования являлся анализ с современных теоретических позиций результатов 15 летнего эксперимента по изучению электронов внутренней конверсии на прецизионном магнитном β-спектрометре, в том числе 7 летним экспериментом без изменения его геометрии и источника излучения электронов. В процессе проведения работ наблюдались нестационарные процессы в радиоактивных оксидах лютеция объясненные как обусловленные тороидной поляризацией проявления нарушений дискретных симметрий. Достаточно убедительные экспериментальные данные свидетельствуют о сегнетизации диэлектриков, что можно использовать как доказательство возможного проявления нарушений временной инвариантности (образования тороидных квадруполей) и использовать для попыток наладить информационные технологии в некоторых радиоактивных средах.

Вскоре после экспериментального обнаружения нарушения пространственной четности при β- распаде В.Г. Вакс и Я.Б. Зельдович обратили внимание на возникновение при этом в непереходящей в себя при зеркальном отражении системе своеобразного распределения магнитного поля: оно выглядит как поле, возникающее в тороидальной обмотке с током и отличается от полей обычных электромагнитных мультиполей: диполей, квадрополей и т.д

Если в исходном состоянии $s_{1/2}$ спин был направлен вдоль оси z, то по мере удаления от начала координат r=0 (а $R_1(0) = 0$) в плоскости xy y спина появляется проекция на эту плоскость, направленная по касательной к окружности. Возникающая конфигурация (рисунок 1) есть не что иное, как спиновая спираль.



Рисунок 1. Спиновая спираль

Знак этой спирали (правая она или левая) не зависит от того, как именно ориентирован спин при r=0. Именно поэтому той же спиралью характеризуется и неполяризованное состояние атома. Ясно, что и магнитный момент электрона приобретает вместе с его спином компоненту, лежащую в плоскости ху. Подобная компонента возникает и у создаваемого электроном магнитного поля. Что же касается распределения тока в такой системе, то наряду с обычным циркулярным током, протекающим в плоскости, ортогональной моменту, имеется компонента, соответствующая току в обмотке, навитой на тор (рисунок 2). Внешний ток J проникая в тор, создает вращающий механический момент $K = \mu[txj]$, где μ – магнитная постоянная, t – дипольный тороидный момент, j – плотность внешнего тока.



Рисунок 2. Конфигурация токов, создающих тороидный момент

Атом, имеющий такую структуру, спиновую спираль, по-разному взаимодействует с право- и левополяризованным светом, подобно хорошо известной молекуле сахара, обладающей спиральной структурой в обычном смысле слова. Но между ними есть разница: молекулы сахара имеют две формы, правую и левую, а атомы – только одну.

В [2] была выяснена суть третьего семейства мультипольных моментов и дано название тороидного дипольного момента первому члену соответствующего разложения. Авторы в [2] показали, что тороидный дипольный момент более «физичная» характеристика, чем анаполь, так как по всем его свойствам он более отвечает простому классическому аналогу - «точечному» тороидальному соленоиду, который указывался сначала для анаполя. При мультипольном подходе анаполь оказался составной величиной: разностью первой производной по времени от электрического дипольного момента и тороидного дипольного момента, заданных в одной точке и направленных по одной оси. В связи с этим анаполь не может характеризовать переходный процесс (например, превращение тяжелой частицы в легкую с испусканием фотона, переход ядра из одного возбужденного состояния в другое и т.д.). А это порождает большую путаницу в литературе. Именно поэтому третьей дипольной характеристикой в электромагнитном токе должен приниматься только тороидный дипольный момент.

Обоснованность введения этой характеристики микромира подтверждена экспериментально. Например, для ряда ядер разными методами определены ее значения, хорошо согласующиеся с теоретически ожидаемыми [3,4].

В математике различные режимы точечных динамических систем классифицируется по типу поведения. Теория бифуркаций (разветвлений), анализ устойчивости стационарных решений и теория катастроф позволяют исследовать поведение нелинейных динамических систем, далеких от равновесия, при изменении их параметров. Сегодня для сосредоточенных систем известны стационарные состояния в виде периодических, квазипериодических и хаотических колебаний, математическим выражением которых служат предельный цикл, тор и странный аттрактор.

В 1986 г. Дубовик В.М. с сотрудниками ввели понятие тороидного диполя электрического происхождения как замкнутой круговой цепочки электрических диполей. Тем самым были определены уже четыре фундаментальные поляризации в рамках электродинамики сплошных сред: электрическая, магнитная, полярная тороидная и аксиальная тороидная. Развитие электродинамики тороидных моментов привело к тому, что электромагнетизм как теория, описывающая среды, превратилась, по сути, в электротороидо-магнетизм, а ряд магнитных кристаллов, обладающих магнитоэлектрическими свойствами, кристаллографы стали называть тороиками [5].

В ядерной физике, например, ожидаемые эффекты нарушения С,-Р,-Т- симметрий в поляризованном упругом электрон - протонном (электрослабом) рассеянии считаются с учетом тороидного и электрического дипольных моментов [8,9]. Можно привести и множество других примеров учета этой характеристики в планировании ядерных экспериментов. Корюкин В.М. [6] пытается из анализа эффекта Казимира, увязываемого с квантовой гравитацией, и реликтовыми нейтрино, найти новую возможность ограничения выбора сценария развития Вселенной и дает в то же время оценку соотношения между тороидным моментом нейтрино, гравитационной и ферми - постоянными.

Уже имеются примеры объяснения особенностей материалов, используемых в новых информационных технологиях, их тороидными свойствами [7].

Несомненно, все это свидетельствует об актуальности исследования тороидных моментов в фундаментальных и прикладных задачах современной физики.

В физике нейтрино до сих пор нет ответов на самые фундаментальные вопросы теории нейтрино: какой природы является эта частица, дираковской или майорановской, каковы массы у нейтрино различных ароматов и, наконец, какие у них электромагнитные свойства. В принципе дираковское нейтрино может иметь магнитный и электрический дипольный моменты. В 1972 году Л.Б. Окунь и И.Ю. Кобзарев впервые установили: если нейтрино майорановская частица, то ее единственной электромагнитной характеристикой является тороидный дипольный момент.

Изучение аномальной конверсии в ядрах редкоземельных элементов привело к определению значений как переходных дипольных тороидных моментов (таблица 1), так и статических (таблица 2).

В таблице 1 приведены значения ядерного параметра $\lambda^{(2)}$ в обозначении М.Е. Войханского и М.А. Листенгартена. Значения переходных и статических моментов определялись по их же формулам. Полученные значения статических дипольных тороидных моментов определялись из анализа аномальных КВК М1-переходов внутри ротационной полосы и сравнивались с модельными расчетами для нечетных деформированных ядер.

Ядро	li ^π →lf ^π	Е _ү , кэВ	<uγ> ₃·10³</uγ>	$\lambda_{\mathfrak{d}}^{(2)}$	t₁₃ я.м.фм.
¹⁶⁹ Tm	$7/2^{-} \rightarrow 7/2^{+}$ $7/2^{-} \rightarrow 7/2^{+}$	63,12 240,33	18,3(4) 0,15(1)	-40(25) 300(40)	0,040(25) 0,04(1)
¹⁷³ Yb	$7/2^{+} \rightarrow 9/2^{-}$ $7/2^{+} \rightarrow 7/2^{-}$ $7/2^{-} \rightarrow 7/2^{+}$ $7/2^{+} \rightarrow 5/2^{-}$	171,40 271,97 285,32 350,67	26,5(5) 30,8(5) 23,4(5) 3,1(2)	-20(7) 41(13) 88(34) 270(100)	0,5(2) 1,2(4) 2,0(6) 0,8(3)
¹⁷⁵ Lu	9/2 ⁻ →9/2 ⁺ 9/2 ⁻ →7/2 ⁺	282,6 396,32	7,8(5) 6,2(2)	-410(35) 650(30)	3,2(5) 3,5(3)
^{,177} Hf	9/2 ⁺ →9/2 ⁻ 9/2 ⁺ →7/2 ⁻	208,34 321,32	62,5(5) 4,8(2)	35,3(170) 1020(50)	2,1(11) 4,6(4)
¹⁸² W	$2^{-} \rightarrow 2^{+}$ $3^{-} \rightarrow 2^{+}$	67,75 152,43	215(5) 8,9(2)	-20(20) -140(70)	4(4) 1,2(6)

Таблица 1. Экспериментальные величины дипольных тороидных моментов ядерных переходов

Ядро	Значение тороидного момента ядра t ₁ , я.м.фм.		к _э	к _р	
	Экспериментальное	Расчетное	Na	Na	(N ₀ / N _a) [*]
¹³³ Cs	1,3(2) ·10 ⁻⁶	1,14·10 ⁻⁶	0,18(3)	0,16	-
¹⁶⁹ Tm	2,0(7) ·10 ⁻⁵	8,8·10 ⁻⁶	0,9(3)	0,41	-
¹⁷⁵ Lu	4(1) ·10 ⁻⁴	1,1·10 ⁻⁵	56(14)	2,8	0,10
¹⁷³ Yb	5,2(25) ·10 ⁻⁵	2,0·10 ⁻⁶	5,6(27)	0,22	1,4
¹⁷⁷ Hf	-2,3(3) ·10 ⁻⁶	-1,0·10 ⁻⁶	-0,32(4)	-0,14	0,9
¹⁸³ W	8(5) ·10 ⁻⁸	3,7·10 ⁻⁷	0,004(2)	0,017	-

Таблица 2. Значения тороидных моментов ядер ряда нуклидов

Наилучшее согласие экспериментального значения тороидного момента ¹⁸³W с расчетным получается при учете отмеченных нами [10] особенностей формы и знака деформации для ядра ¹⁸²W из анализа несущих информацию о форме ядер параметров смешивания и силового для Е0-переходов.

Теорема СРТ (читается «цэ-пэ-тэ»), теорема квантовой теории поля, согласно которой уравнения теории инвариантны относительно СРТ-преобразования, т.е. не меняют своего вида, если одновременно провести три преобразования: зарядового сопряжения С (замены частиц античастицами), пространственной инверсии Р (замены координат частиц r на -r) и обращения времени T (замены времени t на -t). Теорема СРТ была сформулирована и доказана немецким физиком Г. Людерсом (1951) и швейцарским физиком В. Паули (1955). Она вытекает из основных принципов квантовой теории поля. В силу теоремы СРТ, если в природе происходит некоторый процесс, с той же вероятностью в ней может происходить и процесс, в котором частицы заменены соответствующими античастицами, проекции их спинов имеют противоположный знак, а начальные и конечные состояния процесса поменялись местами. Из теоремы СРТ, в частности, следует, что массы и времена жизни частицы и античастицы равны; электрические заряды и магнитные моменты частицы и античастицы отличаются только знаком; взаимодействие части и античастицы с гравитационным полем одинаково (нет «антигравитации»). Для распадов нестабильных частиц в тех случаях, когда взаимодействие частиц в конечном состоянии пренебрежимо мало, теорема СРТ требует, чтобы энергетические спектры и угловые распределения продуктов распадов для частицы и античастицы были одинаковы, а проекции спинов противоположны.

Обращение времени (Т-отражение) – операция замены времени t на –t, сопоставляющая какомулибо движению (или эволюции) системы другое движение, в котором система последовательно в обратном порядке проходит те же состояния, что и в исходном движении (но с измененными на противоположные значениями векторов скорости частицы, моментов, напряженности магнитного поля и других величин, меняющих знак при такой операции). Если взаимодействия, определяющие эволюцию системы, таковы, что обращенное по времени движение является одним из допустимых движении системы, то говорят о Т-инвариантности движения при наличии данных взаимодействий. В классической механике (в классической теории поля) условием Тинвариантности является инвариантность Лагранжа функции относительно обращения времени. Так, уравнения классической механики, как и Максвелла уравнения, обладают свойством инвариантности.

О СЕГНЕТИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И НАРУШЕНИИ ВРЕМЕННОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ

Эффекты нарушения инвариантности по отношению к обращению времени (Т-инвариантности) или, точнее, эквивалентные им вследствие СРТтеоремы СР-неинвариантные эффекты наблюдались только в экспериментах с К- и В-мезонами. В результате этих измерений в лагранжиан стандартной модели был введен член, нарушающий Т- инвариантность, или, конкретнее, фазовый множитель $e^{i\delta}$ в матрицу Кобаяши – Маскавы, приволяший, в случае $\delta \neq 0$, к появлению мнимой добавки в амплитуды смешивания кварков различных поколений. Среди Т- неинвариантных амплитуд существуют и Р- нечетные. Последние отвечают за нарушение инвариантности по отношению к обращению времени с одновременным нарушением пространственной четности (РТ- инвариантности). Упомянутый фазовый фактор входит универсально как в Р-четные, так и в Р- нечетные амплитуды. Вследствие этого в процессах, идущих за счет сильных и электромагнитных взаимодействий, где нарушающие четность слабые амплитуды малы сами по себе, эффекты нарушения РТ- инвариантности в стандартной модели оказываются предельно малыми. Следовательно, наблюдение даже очень малой РТ- неинвариантной корреляции на фоне сильных и (или) электромагнитных процессов оказалось бы надежным свидетельством ее происхождения за счет эффектов, выходящих за рамки стандартной модели. Именно это делает проблему поиска эффектов нарушения РТ-инвариантности актуальной.

Следует добавить, что если СРТ-теорема справедлива, то знание величин констант Р-, Т-, и РТнарушающих амплитуд позволяет полностью определить структуру нарушающей фундаментальную симметрию части лагранжиана. В настоящее время наиболее жесткое ограничение на величину эффектов РТ-нарушения устанавливают измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона: $d_n \le 0, 6 \cdot 10^{-25}$ е см; $d_n/er_n \le 10^{-12}$. Более точные измерения ЭДМ атомов и молекул не дают столь малого верхнего предела на ЭДМ составляющих их ядер и электронов. Если принять естественную гипотезу, что основной вклад в амплитуды нарушения РТ-инвариантности вносит нуклон-мезонная вершина $N \rightarrow N + \pi$, то полученное из этого предела ограничение на изовекторную константу нарушающей *РТ*-инвариантность вершины оказывается наименее жестким: $g_{ph}^{\Delta T}(\pi) \le 10^{-10}$.

Эффекты нарушения РТ-инвариантности в ядерных процессах остаются малоисследованными даже на уровне верхних пределов. В то же время структура матричных элементов РТ-нарушающего нуклоннуклонного взаимодействия здесь может существенно отличаться от структуры амплитуд, определяющих ЭДМ нейтрона и атомов. Поэтому и установление менее жесткого, чем полученный при измерении ЭДМ, верхнего предела обсуждаемой константы в каком-либо ядерном процессе представляется актуальной задачей. Важно, что в процессах на ядрах именно изовекторная вершина является доминирующей, поскольку только эффект от этой вершины является объемным, т. е. растет пропорционально массе ядра. Наконец, для ядерных процессов с нарушением РТ-инвариантности характерны те же самые эффекты усиления, что и для процессов с нарушением пространственной четности.

К настоящему времени известно три эксперимента обсуждаемого типа. На выстроенном ядре ^{180m}Нf в үү-совпадениях изучалась РТ-неинвариантная корреляция $a_{pl}((k_1 \cdot [Jxk_2])(J \cdot k_2))$, где k₁ и k₂ – импульсы первого и второго фотонов, J – направление вектора поляризации образца. Получены ограничение на коэффициент корреляции $a_{pl} = -(0,9\pm1,1) \cdot 10^{-3}$ и верхняя оценка РТ-неинвариантной части амплитуды ядерного взаимодействия к Р-нечетной: 0,6-0,7.

В работе [11] на компонентах сверхтонкой структуры линии 23,7 кэВ, возникающей при раз-рядке изомерного состояния ^{119m}Sn, с помощью мессбауэровской методики (за счет которой выделяются у-переходы в определенных состояниях ядерной поляризации возбужденного состояния ¹¹⁹Sn*) исследовалась *PT*-неинвариантная корреляция $a_{nt}(k_{y}$. $J x e_{\gamma})$, где k_Y – направление вылета γ -кванта, е, – вектор линейной поляризации излучения, J- направление оси квантования. Получена оценка $a_{pt} = -(0,4\pm1,1) \cdot 10^{-6}$ и, соответственно, ограничение на отношение РТ-неинвариантного эффекта к Рнечетному на уровне 4·10⁻². На сегодняшний день это самый низкий верхний предел на РТнеинвариантность, полученный в ядерных процессах. В отношении данного измерения следует, однако, отметить, что эффект несохранения пространственной четности, полученный в данной и предшествующей [11] работах авторов в рамках мессбауэровской методики (порядка 10⁻³), не удается объяснить общепринятыми механизмами усиления Рнечетного эффекта. В связи с этим требуется, видимо, дополнительная экспериментальная проверка этой величины более традиционным (не мессбауэровским) методом. В случае подтверждения результата, необходима теоретическая работа по интерпретации столь неожиданного результата.

Поиск эффектов нарушения РТ-инвариантности в ядерных процессах с нейтронами несмотря на продолжительное время исследований дал довольно скромные результаты. Был проведен только один эксперимент - измерение РТ-неинвариантной асимметрии *a_{pt}(* σ_n ·[k_n x J]) (k_n – направление движения нейтрона, σ_n – направление вектора спина нейтрона, J – направление спина ядра-мишени), соответствующей повороту спин нейтрон при прохождении быстрых поляризованных нейтронов с энергией $E_n =$ 7-12 МэВ через поляризованную мишень ¹⁶⁵Но. Для коэффициента РТ-неинвариантной асимметрии *a_{pt}* были получены следующие результаты: $a_{pt} =$ $-(0.9\pm2.0)\cdot10^{-3}$ (E_n = (7,1±0.9) M₃B), $-(0.4\pm2.9)\cdot10^{-3}$ $(E_n = (11\pm0.5) M_{2}B)$ [2]. Разрешение по энергии нейтронов составляло 0,5-1,0 МэВ, кроме того, нейтронные резонансы имеют большую ширину в данной области энергий. Таким образом, вклад в эффект дают одновременно несколько резонансов, возникает усреднение возможного эффекта, что приводит к уменьшению его величины и крайне затрудняет теоретическую интерпретацию экспериментального результата в смысле получения соответствующих ограничений на амплитуду РТ-неинвариантного взаимодействия, поскольку в этом случае не работает двухуровневое приближение. Независимо от этого очевидно, что ограничение на отношение этой амплитуды к Р-нечетной, которое, в принципе, может быть получено из экспериментов [2], заведомо намного превышает единицу.

Что касается изучения РТ-неинвариантности в других процессах с нейтронами, то следует заметить, что основные усилия прилагаются к измерению аналогичной корреляции $a_{pt}(\sigma_n \cdot [k_n x J])$ при прохождении резонансных нейтронов через поляризованный образец ¹³⁹La. Этот выбор определяется, прежде всего, уникальным масштабом усиления здесь эффекта нарушения пространственной четности – примерно 10⁶. Усиление эффектов нарушения РТ-инвариантности имеет ту же самую природу, и поэтому его масштаб, как предполагается, должен приблизительно совпадать с масштабом усиления нарушения Р-четности. За счет этого в данном случае есть надежда получить ограничение величины РТ-неинвариантной амплитуды на уровне 10-7 эВ [5]. Поскольку величина Р-нечетной амплитуды в составном ядре ¹⁴⁰La составляет 1,3 · 10⁻³ эВ, обсуждаемая схема может позволить, в принципе, устано-

ограничение на амплитуду РТ-неинвавить риантного взаимодействия на уровне 10⁻⁴ по отношению к Р-нечетному. В экспериментах по вращению спина нейтрона при прохождении через поляризованную мишень существует ряд серьезных проблем, связанных с компенсацией ложных эффектов от псевдомагнетизма, Р-нечетной и лево-правой симметрий. Не полностью решена и проблем поляризации образца La. Требуется пучок резонансных нейтронов (E_n = 0,75 эВ), причем рабочий диапазон энергий, соответствующий ширине резонанса, составляет около 40 мэВ, что резко уменьшает скорость набора статистики предполагаемого эффекта. Несмотря на более чем десятилетние усилия по развитию методики и постановке данных измерений до настоящего времени ни один эксперимент не проведен.

Следует добавить, что методика измерения совпадений продуктов реакции, вызываемой тепловыми нейтронами (в этом случае — үү-совпадений), уже использовалась для поиска *P*-четных эффектов нарушения *T*-инвариантности.

Наконец в работе [3] обсуждается схема, включающая в себя регистрацию совпадений альфачастицы и последующего гамма-кванта с измерением его циркулярной поляризации, как возможный метод обнаружения *PT*-неинвариантного эффекта. Выбрана реакция ¹⁰В(n, $\alpha_1\gamma$)⁷Li (E_{γ} = 478 кэВ) на пучке продольно поляризованных тепловых или холодных нейтронов. Этот процесс весьма удобен для экспериментов, он хорошо исследован с точки зрения нарушения пространственной четности. С другой стороны, это хорошая «лаборатория», где могут быть развиты методы, полезные для дальнейшего изучения эффектов нарушения фундаментальной симметрии в других ядерных процессах, вызываемых нейтронами и заряженными частицами.

Подводя итоги, можно констатировать, что достигнутый в настоящее время верхний предел эффектов нарушения РТ-инвариантности в ядерных процессах довольно высок и сильно уступает пределу, достигнутому при измерении ЭДМ. Поэтому совершенствование методики измерения и поиск других примеров ядерных процессов, где нарушение РТ-инвариантности удобно для измерения, представляется важным.

ОБНАРУЖЕНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР В ТОНКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ПЛЕНКАХ ПО ВРЕМЕННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ СПЕКТРОВ

При длительном экспонировании пленочных источников электронов внутренней конверсии было замечено постепенное смещение конверсионных линий. Это иллюстрируется рисунок 3. Мы интерпретируем этот эффект с постепенным накоплением зарядов в объеме источника и переходом их в состояние сегнетоэлектрика.



Рисунок 3. Смещение во времени линий триплетов L76 и L78 из распада ¹⁷²Lu и ¹⁷³Lu

Рисунок 3 иллюстрирует постепенные изменения диэлектрика источника ¹⁷³Lu под действием накопившихся зарядов в сегнетоэлектрик. Особенно ярко это проявляется на рисунках 4 и 5. Рисунок 6 наглядно демонстрирует проявление во времени линий триплета L100,7 и K272 в распаде ¹⁷³Lu из-за параметрического эффекта Доплера в связи с установившимся состоянием диэлектрик-сегнетоэлектрик. Рисунок 4 демонстрирует только как малый пример отклонение интенсивности во времени для ряда конверсионных линий распада ¹⁷³Lu \rightarrow ¹⁷³Yb.



Рисунок 4. Две серии наших измерений области К-линии уперехода с энергией 272 кэВ в дочернем ядре¹⁷³Yb



Рисунок 5. Интенсивности некоторых конверсионных линии распада¹⁷³Lu во времени: a) L₁78.6 и L₁100.7; б) К272.0





Известно, что тороидные конфигурации эффективнее иных защищены от влияния внешних электрических и магнитных полей. Можно предположить, что это ослабляет воздействие на них процесса синхронизации в среде, что обеспечивает их продолжительную статичность и. в некоторой степени, - усиление проявления нарушений симметрии. Тороидный квадруполь наглядно демонстрирует роль слабых взаимодействий в нарушении не

ЛИТЕРАТУРА

только пространственной, но и временной симметрии, а электромагнитных - по меньшей мере - в стабилизирующем воздействии на эту систему.

При исследовании дробного квантового эффекта нашли применение развитые в теории поля представления о «топологическом» взаимодействии Черна-Саймонса, нарушающем временную симметрию. Сравнение обнаруживает много общего между рассматриваемыми в этом случае и нами твердотельных системах.

В перспективе можно ожидать новых более точных результатов по исследованию нарушений СРТинвариантности в распаде нейтральных каонов, в определении предела значения электрических дипольных моментов нейтрона, протона и электрона [11], оценок значений магнитных квадрупольных и шиффовских моментов ядра. В итоге, возможно, это позволит сделать более согласованные и обоснованные выводы о нарушении дискретных симметрий в микромире.

Задачи прецизионного исследования нестационарных процессов в редкоземельных радиоактивных оксидах, экспериментально исследованных ранее на прецизионном β-спектрометре в течении 15 лет, в том числе 7 лет без изменения геометрии установки и с одним и тем же источником излучения. Объектом настоящего исследования являлся анализ с современных теоретических позиций результатов этого эксперимента, полученных методами электронной ядерной спектроскопии. Участники проекта как сотрудники института, где в числе первых были выполнены работы по экспериментальному определению значений тороидных моментов ядер, тем самым подтвердив закономерность введения этой характеристики, нестационарные процессы в радиоактивных оксидах лютеция объяснены как обусловленные тороидной поляризацией, предположив, что они могут свидетельствовать о проявлении нарушений временной инвариантности (образования тороидных квадруполей) и могут быть использованы для попыток наладить информационные технологии в некоторых радиоактивных средах. Стало ясно, что необходимо ставить дальнейшие эксперименты и значительно усовершенствовать технику экспериментов, так как оценочные значения параметров нарушения Т-инвариантности ожидаются чрезвычайно малыми. Данные проведенных экспериментов свидетельствуют об образовании в изученных средах не только магнитных тороидных образований, но и в силу сегнетизации диэлектриков электрических дипольных тороидов, что значительно повышает реальность проявления тороидных квадруполей.

 Листенгартен. М.А // Аномальная внутренняя конверсия в электромагнитных переходах атомных ядер. // Сборник Современные методы ядерной спектроскопии.- 1986.- С142 -197.

- Дубовик В.М., Чешков А.А. // Мультипольные разложения в классической и в квантовой теории поля и излучение. // ЭЧАЯ. - 1974. - Т.5. - С. 791.
- 3. Карташов В.М., Троицкая А.Г. // Экспериментальные значения переходных и статических тороидных моментов и параметров формы ядер. Изв. РАН. сер. физ. 2009. Т.73, №2. С.253.
- 4. Wood C.S. et al. // Science. 1997. Vol.275. P. 1759.
- 5. Букина Е.Н., Дубовик В.М. // Вклады поляризуемостей в четыре базисные поляризации электромагнитных сред. Журнал технической физики. 2001. Т.71, №2. С.1.
- 6. Корюкин В.М. // Изв. высших уч. заведений. Физика. 1996. №10. С.119.
- 7. Naumov Ivan I. et al. // Nature. 2004. Vol.432. P.737.
- Керимов Б.К., Сафин М.Я. // Спиновые асимметрии в упругом электрослабом υ(ü)p(S) –рассеяния с учетом нейтрального слабого магнитного, анапольного и электрического дипольного моментов в протона. Ядерная физика. 2009. - Т.72, №11. - С.2022
- 9. Керимов Б.К., Сафин М.Я. // Эффекты нарушения С-,Р-,Т-симметрий в поляризованном упругом электрон-протонном электрослабом рассеянии.Изв. РАН. серия физ. 2010. Т.74, №6. С.854
- 10. Карташов В.М., Оборовский А.И., Троицкая А.Г. // Изв. АН СССР. сер. физ. -
- 11. 1990. T.54. C. 169.

12. Хриплович И.Б. Анапольный момент ядра открыт! // УФН.- 1997.-Т.167,№ 11. -С.1213- 218.

ДИСКРЕТТІК СИММЕТРИЯЛАРДЫҢ БҰЗЫЛУЛАРЫН ІЗДЕСТІРУДЕГІ ЖӘНЕ ҚОЛДАНБАЛЫ ЗЕРТТЕУЛЕР МЕН ҚОЛДАНУЛАРДАҒЫ ТОРОИДТІК СӘТ

Карташов В.М., Алдияров Н.У., Талпақова К.А.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Зерттеу нысаны магниттік бета – спектрометрінде 15 жыл бойы жүргізілген ыдырауының ішкі конверсия электрондарын зерттеуге арналған тәжірибе нәтижелерін сараптау болып табылады. Оның ішінде 7 жыл тәжірибе электрондардың сәулелену көзі мен геометриясы өзгеріссіз болғанын көрсетті.

Жұмысты орындау барысында радиоактивті оксидтерде байқалған стационар емес құбылыстар тороидтік поляризацияға негізделген дискретті симметрияның бұзылуымен түсіндірілді. Тәжірибенің айтарлықтай сенімді нәтижелері диэлектриктердің сегнеттелуін көрсетеді, оны уақыт инвариаттылығының пайда болуының дәлелі ретінде қолдануға болады (тороидтік квадрупольдердің қалыптасуы). Сонымен қатар бұл дәлелдерді кейбір радиоактивтік орталардағы ақпараттық технологияларды реттеу үшін пайдалана аламыз.

TOROIDAL MOMENT IN SEARCHING FOR DISCRETE SIMMETRY VIOLATION AND IN APPLIED RESEARCHES AND APPLICATIONS

V.M. Kartashov, N.U. Aldiyarov, K.A. Talpakova

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

The object of the study was to analyze the current theoretical positions with 15-year results of the experiment to study the internal conversion electrons in the β -precision magnetic spectrometer, including 7 years of the experiment without changing the geometry of the radiation source of electrons.

In the course of the investigation we observed time-dependent processes in radioactive lutetium oxide explained as due to toroidal polarization manifestations of violations of discrete symmetries. Sufficiently convincing experimental evidence of dielectrics ferroelectricityzation that can be used as evidence of possible violations of the temporary manifestation of invariance (the formation of toroidal quadrupoles) and used for attempts to establish information technology in some radioactive environments.

УДК 621.316.718.5

РЕГУЛЯТОР СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА КОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Лисицын В.Н., Асанов А.Б.

Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Описан регулятор скорости вращения коллекторного электродвигателя постоянного тока, построенный с использованием микросхем серий 155 и 561 по схеме сравнения частоты и фазы сигналов от опорного генератора и от тахогенератора обратной связи. Обеспечивает 99 фиксированных значений стабилизированной скорости вращения, которые устанавливают встроенным переключателем. Отличается заданием скорости вращения посредством переключения значений коэффициента деления частоты сигнала тахогенератора. При этом двузначное десятичное число на шкале переключателя соответствует значению основного технического параметра электропривода.

В электроприводах экспериментальных, а также технологических установок повышенной мощности часто необходимо задавать скорость движения с достаточной точностью и в широком интервале стабилизированных значений. В подобных электроприводах обычно используют коллекторные электродвигатели, для которых, однако, характерна нестабильность оборотов при изменении нагрузки или питающего напряжения, что требует принятия мер по стабилизации регулируемой скорости вращения [1]. При этом сервисные компоненты регулятора со стабилизацией скорости вращения должны быть надежными, удобными и простыми в эксплуатации.

Предлагаемый регулятор использовали с коллекторным электродвигателем постоянного тока с потребляемой мощностью 1,5 кВт при выпрямленном напряжении питания сети 220 В. Особенностью регулятора является наличие в цепи обратной связи тахогенератора, вал которого соединен с валом электродвигателя. Сигналы, вырабатываемые тахогенератором (ТГ), поступают на делитель с переменным коэффициентом деления (ДПКД). Значение коэффициента деления выставляют двоично-десятичными переключателями ПК1 и ПК2. Каждый из них имеет 10 положений, поэтому шкалы переключателей вместе составляют двузначное десятичное число. Импульсы с ДПКД поступают на частотнофазовый детектор (ЧФД), где сравниваются частоты и фазы сигналов обратной связи и опорного генератора (ОГ). Получаемая при этом информация позволяет обеспечить 99 фиксированных значений скорости вращения двигателя, а также стабилизацию скорости с любым фиксированным значением.

Частоты сигналов ОГ и ТГ взаимосвязаны так, что непосредственно на шкале переключателей можно выставить значения основного технического параметра электропривода. Таким параметром, например, является скорость перемещения с повышенной точностью движущихся элементов привода (ленты транспортера) в м/мин. В этом случае два знака численного значения скорости перемещения выставляют непосредственно на двух шкалах переключателей. Наглядность переключения скорости вращения является дополнительным преимуществом регулятора.

Информация с выхода ЧФД поступает на широтно-импульсный модулятор (ШИМ), который формирует импульсы управления оптотиристором, включенным в цепь выпрямленного сетевого напряжения питания коллекторного электродвигателя. В схеме регулятора возможна замена переключателей ΠK_1 и ΠK_2 восьмиразрядным регистром. Этот вариант предоставляет возможность использовать компьютер для управления электроприводом.

Схема регулятора приведена на рисунке. Регулирование скорости вращения происходит в цепи сигнала обратной связи. В качестве тахогенератора использован шаговый двигатель, работающий в режиме генератора переменного тока, частота которого пропорциональна скорости вращения вала ТГ. В частности, при вращении вала со скоростью 10 с⁻¹ частота тока равна 480 Гц. Сигнал от ТГ поступает на формирователь, вход которого снабжен схемой защиты R_1, J_1, J_2 . Схема на элементах $M_{1-1}, M_{1-2}, M_{1-2}$ 3 формирует короткие по фронту сигнала импульсы, которые поступают на счетные входы двоичнодесятичных счетчиков M_2 и M_3 . Элементы M_2 , M_3 , М₄₋₁ и М₁₋₄ составляют делитель с переменным коэффициентом деления частоты следования импульсов обратной связи.

На информационные входы счетчиков делителя переключателями ΠK_1 и ΠK_2 подают значения входных данных в двоичном коде, которые отображаются на шкалах переключателей в виде двузначного десятичного числа. Значения низшего разряда этого числа задают на шкале переключателя ΠK_1 , а значения высшего разряда – на шкале переключателя ΠK_2 . С выхода переноса счетчика M_2 импульсы поступают на вход переноса счетчика M_3 , а с выхода переноса счетчика M_3 импульсы поступают на триггер M_{4-1} , с выхода которого поступает разрешение установки входных данных на счетчики M_2 и M_3 . Частота следования импульсов с выхода триггера $M_{4-1} f_{abax}$ меньше частоты следования импульсов от тахогенератора f_{m^2} в (100 - n) раз в соответствии со значением переменного коэффициента деления n, которое задано переключателями ΠK_1 и ΠK_2 . Значение n изменяется от 1 до 99.

Импульсы обратной связи после выхода с делителя ДПКД поступают на ЧФД (элементы M_{10-5} , M_{5-1} , M_{5-2} и M_6), на счетный вход двоичного реверсивного счетчика M_6 . На второй счетный вход этого счетчика с инвертора M_{10-3} с частотой следования 14 Гц поступают импульсы опорного генератора на элементах M_{10-1} , M_{10-2} . Число на счетчике увеличивается по импульсу ОГ и уменьшается по импульсу обратной связи. Изменение фазового соотношения между сигналами на счетных входах также изменяет число на счетчике. Триггеры на элементах M_{5-1} и M_{5-2} блокируют переход счетчика из состояния "0" в состояние "15" и из "15" в "0". При поступлении сигналов переноса с выхода счетчика на триггеры элементы M_{9-1} и M_{9-2} включают светодиоды \mathcal{I}_3 и \mathcal{I}_4 , которые сигнализируют о крайних состояниях оптотиристора – соответственно полностью закрытом или полностью открытом.



 $\begin{array}{l} M_{1}, M_{10}-561\Pi H2, M_{2}, M_{3}-561\Pi E14, M_{4}-561TM2, M_{5}, M_{6}, M_{7}-74LS193, M_{8}-74LS74, M_{9}-155\Pi A12; M_{11}-7805; \\ T_{1}-KT630, T_{2}-KT315; \mathcal{J}_{1}, \mathcal{J}_{2}-KJ503, \mathcal{J}_{3}, \mathcal{J}_{4}-A\Pi 102\Gamma, \mathcal{J}_{5}\div\mathcal{J}_{9}-KJ203J; \mathcal{J}_{10}, \mathcal{J}_{11}-KL405E; TO-TO132-40-10 \end{array}$

Рисунок. Принципиальная схема регулятора

С выхода счетчика M_6 данные поступают на ШИМ (элементы M_{10-6} , M_7 , M_{8-1} и T_1), а именно – на информационные входы двоичного счетчика M_7 . На суммирующий счетный вход этого счетчика с инвертора M_{10-6} поступают с частотой следования 1,5 кГц импульсы генератора на элементах M_{10-3} и M_{10-4} . Это значение частоты задает 15 градаций среднего значения напряжения на электродвигателе ЭД. Импульсы 100 Гц перехода сетевого напряжения через нуль, сформированные на элементах $Д_{11}$ и T_1 , разрешают установку входных данных на счетчик M_7 и производят сброс в ноль триггера на элементе M_{8-1} . После этого происходит увеличение содержимого счетчика M_7 с частотой 1,5 кГц, сигнал переноса счетчика устанавливает триггер M_{8-1} в единицу и этим через транзистор T_2 включает светодиод оптотиристора *TO*. Таким образом, значение кода счетчика M_7 определяет момент включения оптотиристора.

Разработанный регулятор удобен в эксплуатации и позволяет с высокой точностью стабилизировать задаваемую скорость вращения коллекторного электродвигателя. Наглядная связь шкал переключателей скорости с основным техническим параметром электропривода делает регулятор привлекательным для использования в технологических целях.

ЛИТЕРАТУРА

^{1.} Белов О.А., Красильников Н.И. / Приборы и техника эксперимента. - 1985. - № 5. - С. 212.

КОЛЛЕКТОРЛЫҚ ЭЛЕКТРҚОЗҒАЛТҚЫШ БІЛІГІНІҢ АЙНАЛУ ЖЫЛДАМДЫҒЫН ТҰРАҚТАНДЫРУЫ БАР РЕТТЕУІШ

Лисицын В.Н., Асанов А.Б.

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Тірек генераторы мен кері байланысты тахогенератордан алынған сигналдардан жиілік пен фазаны салыстыру сүлбесі бойынша 155 және 561 сериялы микросүлбелерді пайдалана отырып жасалған, тұрақты токтың коллекторлық электрқозғалтқышының айналу жылдамдығын реттеуіш сипатталған. Ол айналудың тұрақталған жылдамдығының 99 бекітілген мәндерін қамтамасыз етеді, оларды ішке орнатылған ауыстырып қосқыш қояды. Ол айналу жылдамдығын тахогенератор сигналының жиілігін бөлу коэффициентінің мәндерін ауыстырып қосу арқылы берумен ерешеленеді. Мұнда ауыстырып қосқыш шкаласындағы екі ондық сан электржетектің негізгі техникалық параметрінің мәніне сәйкес келеді.

REGULATING STABILIZER OF COMMUTATOR ELECTRIC MOTOR SHAFT ROTATION RATE

V.N. Lisitsyn, A.B. Asanov

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

It provides description of DC commutator electric motor rotation rate regulator, constructed using the microcircuits of 155 and 561 series based on the circuit of signals frequency and phase comparison from the reference generator and the feedback tachogenerator. It provides 99 fixed values of the stabilized rotation rate set with the built-in switch. It is characterized by setting the rotation rate by switching the coefficient values of tachogenerator signal frequency scaling. The two-digit decimal number on the switch scale corresponds to the value of main technical parameter of the electric drive.

ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕЙТЕРИЯ С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

¹⁾ Тажибаева И.Л., ²⁾ Кенжин Е.А., ¹⁾ Кульсартов Т.В., ¹⁾ Гордиенко Ю.Н., ¹⁾ Понкратов Ю.В., ¹⁾ Барсуков Н.И., ¹⁾ Гныря В.С., ¹⁾ Заурбекова Ж.А., ³⁾ Муканова А.О., ¹⁾ Тулубаев Е.Ю., ³⁾ Чихрай Е.В., ³⁾ Шестаков В.П.

¹⁾ Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан ²⁾ Семипалатинский государственный Университет им. Шакарима, Семей, Казахстан ³⁾ НИИ Экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Работа посвящена обзору результатов исследований взаимодействия изотопов водорода с материалами термоядерных реакторов (ТЯР) в условиях, моделирующих их реальную работу. На основе полученных экспериментальных данных определены основные параметры взаимодействия изотопов водорода (коэффициенты диффузии, проницаемости, растворимости) с вольфрамом, безкислородной медью и нержавеющей сталью SS316IG (ITER Grade).

Введение

При эксплуатации ТЯР возникает опасность утечки трития через защитные барьеры, поэтому существует необходимость изучения процессов диффузии трития через материалы, планируемые к использованию в качестве функциональных и конструкционных материалов ТЯР.

Более того известно, что под воздействием интенсивного излучения конструкционные материалы способны менять свою структуру и физикомеханические свойства, что естественно приводит к изменению их рабочих характеристик. Для обеспечения тритиевой безопасности перспективный материал конструкции реактора предварительно необходимо подвергнуть испытанию условиям, сочетающим все воздействующие факторы эксплуатации, которые присутствуют при реальной работе ТЯР. В работе отражены результаты экспериментальных исследованию взаимодействия изотопов водорода с перспективными материалами ТЯР (вольфрам, безкислородная медь, сталь SS316IG (ITER Crade)) в условиях реакторного излучения.

Экспериментальная часть

1 Экспериментальная установка и метод

Реакторные эксперименты по водородопроницаемости проводились на реакторе ИВГ.1М (Курчатов, Казахстан) на экспериментальном стенде ЛИАНА (рисунок 1), предназначенном для изучения взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами ЯР и ТЯР при различных температурах и давлениях газов при воздействии реакторного излучения [1]. Эксперименты по насыщению и ТДС эксперименты проводились на установке ВИКА (рисунок 2), позволяющей исследовать выделение газов из исследуемых образцов в различных режимах нагрева [2]. Для исследования взаимодействия изотопов водорода с исследуемыми материалами применялись методы термодесорбции [3] и водородопроницаемости [4].



центр активной зоны; 2 - магниторазрядный насос;
 вентиль; 4 - механический насос; 5 - ампула с образцом;
 датчик давления; 7 - масс-спектрометр; 8 - металлорукав;
 палладий-серебрянный фильтр; 10 – азотная ловушка

Рисунок 1. Схема экспериментальной установки ЛИАНА



РА - вакуумметр ионизационный; РТ - вакуумметр термопарный; NS1 - магниторазрядный насос НОРД-100; V - вакуумный кран; NS2 - магниторазрядный насос НОРД-250; NL - форвакуумный насос HBP-5 ДМ; BL - азотная ловушка; S1 - омегатронный датчик РМО-13 масс-спектрометра ИПДО-2; S2 - датчик квадрупольного анализатора остаточных газов (RGA-100); CV - рабочая камера

Рисунок 2. Схема экспериментальной установки ВИКА

2 Эксперименты по насыщению и термодесорбции вольфрама

В настоящее время в особо энергонапряженных узлах дивертора строящегося термоядерного реактора ИТЭР (зоны приема отработанной D/T/He плазмы) предполагается использовать вольфрам. Вольфрам известен своими преимуществами перед другими материалами: высокий порог физического распыления и отсутствие химического распыления водородом. В частности в термоядерном реакторе ДЕМО вольфрам предполагается использовать в качестве материала некоторых узлов дивертора, как наиболее энергонапряженного узла термоядерной установки, т.е. определяющего безопасность ее работы. Условия работы дивертора предполагают одновременное воздействие изотопов водорода и нейтронов, поэтому необходимо иметь экспериментальные данные о параметрах этого взаимодействия именно в комплексе.

В работе исследовались образцы поликристаллического вольфрама, которые предварительно были оттожены при температуре 1600 °С в течении 1 часа [1].

Эксперименты заключались в следующем: исследуемые образцы закладывались в реакторное ампульное устройство, после чего проводилось их насыщение в атмосфере дейтерия при определенной исследуемой температуре. Исследования проводились в 2 этапа: внереакторные эксперименты и реакторные эксперименты на различных мощностях реактора.

Условия проведенных реакторных экспериментов по насыщению дейтерием вольфрамовых образцов:

- исследуемый температурный
- интервал от 850 до 950 °С;
- давление насыщения дейтерия 10⁴-10⁵ Па;
- размер образцов.....0,5×5×5 мм.

Далее с полученными насыщенными образцами вольфрама проводились термодесорбционные исследования.

Условия проведения ТДС исследований насыщенных образцов вольфрама:

- скорость нагрева......5, 10, 15 °С /мин;
- остаточное давление10⁻⁵ Па.

2.1 Результаты экспериментов и их обсуждение На рисунке 3 проиллюстрирован эффект влияния реакторного излучения на выделение дейтерия из отожженных образцов вольфрама. Видно, что выделение дейтерия из образцов, насыщенных при реакторном облучении, больше. При этом наблюдается дозовая зависимость – чем больше мощность реактора, тем больше выделяется дейтерия.



Рисунок 3. Термодесорбционные спектры выделения D₂ из отожженных образцов вольфрама, насыщенных при реакторном облучении и без него (температура насыщения 850 °C, скорость нагрева 10 °C/мин)

ТДС спектры были описаны классической моделью диффузии, с помощью которой был определен коэффициент диффузии дейтерия в вольфраме.

Рассчитанное для классической диффузии выражение для коэффициента диффузии дейтерия в вольфраме имеет вид:

$$D_D = (1, 3 \pm 0, 2) \cdot 10^{-4} \cdot exp\left(-\frac{113 \pm 12}{R \cdot T}\right)$$

Значения коэффициентов диффузии дейтерия в вольфраме совпало в пределах ошибки для всех экспериментов.

По полученным экспериментальным данным была построена зависимость растворимости дейтерия в вольфраме от температуры и определены предэкспоненциальный множитель и энергия активации растворения.

Графики растворимости дейтерия в вольфраме для различных условий насыщения приведены на рисунке 4.

Наблюдаемый эффект может быть полностью обусловлен поведением углерода в вольфраме. При облучении растворенный в вольфраме углерод выделяется на поверхность границ зерен и повышает сорбционную емкость вольфрама.

Параметр	Внереакторный эксперимент	Реакторный эксперимент (2 МВт)	Реакторный эксперимент (4 МВт)	Литературные данные для D₂[1]
Растворимость S _D , моль/м³Па ^{0,5}	$(5,82\pm0,15){\cdot}10^{-1}$	$(1,88\pm0,15){\cdot}10^{-2}$	$(3,00\pm0,15){\cdot}10^{-2}$	1,45
Энергия активации растворения E _s , қДж/моль	99,62 ± 10	63,59 ± 10	$66,12\pm10$	104,31 ± 10

Таблица 1. Рассчитанные параметры взаимодействия дейтерия с вольфрамом
При общих низких значениях растворимости изотопов водорода в вольфраме и общем количестве углерода (оцениваемого как количество растворенного углерода из поверхностной пленки на образцах) значения равновесной объемной растворимости, оказывается сравнимо с количеством водорода, которое может быть захвачено углеродом, для выбранных условий эксперимента.



Рисунок 4. Температурная зависимость растворимости дейтерия в вольфраме

3 Эксперименты по водородопроницаемости меди

Еще одним материалом, используемым в ТЯР, является медь. Введение медных материалов между защитными пластинами первой стенки и каналами охлаждения позволяет существенно снизить напряжения, действующие в конструкции, увеличить теплоотвод от защитных пластин, снизить их температуру до приемлемого уровня.

В качестве исследуемого образца была использована мембрана из бескислородной меди марки МОБ1 с содержанием кислорода около 10 ppm, диаметром 20 мм и толщиной 0,5 мм [1].

Эксперимент заключался в следующем: после размещения медной мембраны в реакторное ампульное устройство и последующей установки устройства в экспериментальный канал реактора, производилась дегазация образца при температуре 550 °С и непрерывной откачке газа из входного и выходного объемов камеры. Далее устанавливалась исследуемая температура, и на входную сторону образца подавался дейтерий под давлением 10⁵ Па. При этом в объеме, прилегающем к выходной стороне мембраны, при непрерывной откачке с помощью масс-спектрометра регистрировалась зависимость установления стационарного потока дейтерия, прошедшего сквозь медную мембрану во времени. После установления стационарного потока, прилегающего к входной стороне мембраны, откачивался дейтерий, а в выходном объеме продолжалась регистрация изменения кинетики проникновения дейтерия сквозь исследуемый образец [4].

Условия проведенных исследований:

- исследуемый температурный интервал..... от 300 до 500 °C;
 остаточное давление
- в измерительном трактеот 10⁻⁴ до 10⁻⁶ Па;
- входное давление дейтерия......10⁵ Па;

3.1 Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате проведенных экспериментов по ВП дейтерия сквозь медь были получены кинетические зависимости потоков проникновения дейтерия сквозь медный образец при температурах образца от 300 до 500 °C. При температуре образца ниже 450 °C было зафиксировано влияние реакторного излучения на кинетику проникновения дейтерия сквозь медный образец. Оно заключалось в ускорении диффузии дейтерия сквозь медь и очень незначительном увеличении стационарного проникающего потока дейтерия, причем с уменьшением температуры эти эффекты становились все более заметными.

Результаты экспериментов также свидетельствуют о том, что не наблюдалось значительной зависимости скорости проникновения дейтерия от мощности излучения. На рисунке 5 видно, что кривая проникновения дейтерия, полученная на мощности реактора 1,0 МВт лежит несколько выше кривой проникновения дейтерия, полученной на мощности реактора 0,5 МВт, однако это отличие не так значительно, как разница между реакторными и внереакторными кривыми проникновения. Данное различие между кривыми, полученными на мощности реактора 1,0 и 0,5 МВт сравнимо с ошибкой измерения.



Рисунок 5. Нормированная на максимальный поток зависимость проникновения дейтерия в экспериментах по ВП, на температуре 350 °C

Как показал анализ литературы по внереакторным исследованиям проницаемости изотопов водорода сквозь медь, одним из определяющих проникновение процессов является взаимодействие водорода с примесями кислорода (оксидами) в меди (и в незначительной степени с такими примесями, как мышьяк, сурьма, висмут) []. В этих работах исследовалась медь: как слабой степени очистки от кислорода (ЕТР-медь, полученная электролитическим методом без дополнительных обработок, содержащая, как минимум, до 200 ppm кислорода), так и безкислородная (вакуумная) медь (с содержанием кислорода примерно 10 ppm). Во всех случаях было отмечено, что влияние кислорода, скорее всего, обусловлено обратимой реакцией Cu₂O+H₂->2Cu+2H₂O, которая к тому же отвечает за значительное водородное охрупчивание меди.

Данное взаимодействие с кислородом при диффузии изотопов водорода наблюдалось ранее также и в других металлах (например, в ниобии данное взаимодействие является одним из главных процессов, определяющих проницаемость [11,12]).

Попытки описать в рамках классической диффузии эксперименты по ВП меди показали, что рассчитанные эффективные коэффициенты диффузии, полученные из кривых проницаемости значительно меньше, чем эффективные коэффициенты диффузии, полученные из кривых откачки. Это связано с тем, что скорость высвобождения изотопов водорода из кислородных ловушек процесс более медленный, чем процесс их захвата. Согласно вышеприведенным работам существует четкое мнение, что процесс проникновения изотопов водорода сквозь медь необходимо описывать с помощью модели диффузии в дефектных средах (модель Мак-Набба и Фостера [13]). В ней учитывается ограниченная емкость ловушек и их уменьшение в ходе диффузии, что объясняет такие экспериментальные факты, как: повышенное количество диффузанта в мембране при стационарном состоянии проницаемости; отсутствие прямой пропорциональности между величиной стационарного потока из образца J_{cm} и начальной концентрацией атомов водорода C_0 ; нарушение симметрии процессов сорбции и десорбции; несовпадение форм кривых "прорыва" и "откачки". Система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x} = D \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - k_1 \left(1 - \frac{m}{m^*} \right) c + k_2 m, \\ \frac{\partial m}{\partial t} = k_1 \left(1 - \frac{m}{m^*} \right) c - k_2 m, \end{cases}$$

где m – концентрация диффузанта в ловушках, m^* – концентрация ловушек, k_1 , k_2 – скорости захвата и высвобождения диффузанта в ловушку (из ловуш-ки).

Полученные результаты, представленные в таблице 2, демонстрируют заметное снижение энергии активации диффузии дейтерия в меди. Расчет по модели Мак-Набба и Фостера показали также заметное снижение энергии высвобождения дейтерия ловушками, и незначительное снижение энергии активации захвата дейтерия ловушками при реакторном излучении (здесь различие лежит в пределах ошибки).

Различие между параметрами, рассчитанными из реакторных экспериментов для разных уровней мощности (0,5 и 1 МВт), как видно из таблицы, совпадают в пределах ошибки. Энергия активации захвата и высвобождения дейтерия соответственно E_{k1} и E_{k2} ; D_0 , P_0 и S_0 – предэкспоненты в законе Аррениуса для диффузии, проницаемости и растворимости; E_D , E_P и E_S – энергии активации диффузии, проницаемости и растворимости.

Параметр	Внереакторный экспери- мент	Реакторный эксперимент (0,5 МВт)	Реакторный эксперимент (1,0 МВт)			
<i>D</i> ₀ , м ² /с	$(3,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$	$(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$	$(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$			
<i>Е</i> _D , кДж/моль	38 ± 2	30 ± 2	29 ± 2			
<i>Е_{к1}, қДж/моль</i>	44 ± 3	38 ± 3	38 ± 3			
<i>Е_{к2}, қДж/моль</i>	69 ± 3	60 ± 3	59 ± 3			
<i>S₀</i> , моль/м²·Па ^{0,5}	$(2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-2}$	$(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$	$(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$			
<i>Еs</i> , кДж/моль	27 ± 2	35 ± 2	36 ± 2			
<i>Р</i> ₀ , молы	/м²·с·Па ^{0,5}	$(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$				
<i>Е_Р</i> , қД	ж/моль	65 ± 4				

Таблица 2. Рассчитанные параметры коэффициентов диффузии, проницаемости, растворимости дейтерия в меди МОБ1

4 Эксперименты по водородопроницаемости нержавеющей сталью SS316L(N)-IG

Исследуемая нержавеющая сталь аустенитного класса типа SS316L(N)-IG (ITER Crade) была специально разработана для вакуумной камеры ИТЭР. Она относится к классу модифицированных материалов для ИТЭР. Модификации касались химического состава, термообработки и технологии изготовления полуфабрикатов. Исследуемый образец представлял собой мембрану диаметром 21 мм толщиной 0,69 мм [1]. Исследования проводились методом водородопроницаемости в несколько этапов – дореакторные, реакторные и послереакторные эксперименты [14]. Порядок проведения измерений и расчетов в экспериментах соответствовал методике, описанной в стандарте [4].

Условия проведенных исследований:

- исследуемый
- в измерительном тракте 10⁻⁴-10⁻⁶ Па;

- входное давление дейтерия 500 Па;
- мощность реактора.....1,0 МВт.

4.1 Результаты экспериментов и их обсуждение В результате проведенных экспериментов по ВП изотопов водорода сквозь сталь SS316IG была получена зависимость проникновения дейтерия сквозь



Рисунок 6. Кинетика проникновения дейтерия сквозь образец стали SS316IG (400 °C) на разных этапах экспериментов

Эксперименты показали что при температурах от 450 до 550 °C реакторное излучение не влияет на характер проникновения дейтерия сквозь образец; при температурах 350 и 400 °C реакторное излучение заметно влияет на процесс проникновения газа, оно приводит к уменьшению потока дейтерия и увеличению времени достижения стационарного потока сквозь образец. Соответственно это значит, что происходит заметное уменьшение эффективных коэффициентов диффузии и проницаемости. Послереакторные эксперименты без облучения показали, что термический отжиг образца при температуре 700 °С приводит к постепенному возвращению параметров взаимодействия к своим исходным значениям.

По результатам экспериментов были определены основные параметры ВП изотопов водорода сквозь сталь SS316L(N)-IG, такие как: коэффициенты диффузии, константы проницаемости, растворимости водорода и дейтерия в данной стали, и которые приведены в таблице 3.

Зафиксированные эффекты объясняются присутствием равномерно распределенных в объеме образца точечных изолированных дефектов – ловушек. При диффузии атом водорода, мигрирующий через вещество в ходе случайного блуждания, временно захватывается дефектом и вновь выделяется в диффузионную зону. Данные ловушки для водорода появляются в результате радиационно-стимулированной сегрегации примесей на границы зерен. Подобные явления при исследовании так же были замечены другими авторами, например, в работах [15,16] показано, что в сталях происходят явления радиационно-стимулированной сегрегации неметаллических примесей (фосфор, сера) на границы зерен.

Параметр	Внереакторный эксперимент	Реакторный эксперимент	Литературные данные для D₂ [4]
<i>D</i> ₀ , м ² /с	(5,9 ± 0,5) 10 ⁻⁷	(1,3 ± 0,1) 10 ⁻⁵	0,6·10 ⁻⁶
<i>Е_D,</i> кДж/моль	55 ± 5	75 ± 7	45
<i>Р₀,</i> моль/(м·с·Па ^{0,5})	(3 ± 0,5) 10 ⁻⁷	$(1,2 \pm 0,1) \ 10^{-6}$	1,4·10 ⁻⁷
<i>Е_Р,</i> кДж/моль	66 ± 7	72 ± 7	64
S ₀ , моль/м ³	(0,5 ± 0,15)	(0,1 ± 0,02)	6,8
<i>Е</i> _s , кДж/моль	11 ± 7	3 ± 7	20

Таблица 3. Рассчитанные параметры ВП нержавеющей стали SS316L(N)-IG

Послереакторный отжиг приводит к возвращению кинетики проникновения дейтерия и соответствующих параметров ВП (при температурах 350, 400 °C) к своим исходным значениям, полученным в дореакторных экспериментах, т.к. при отжиге происходит обратное растворение примесей с границ зерна в объем зерна.

Заключение

Эксперименты позволили получить и рассчитать основные параметры взаимодействия изотопов водорода с вольфрамом, медью и сталью SS316L(N)-IG: эффективные коэффициенты диффузии, эффективные константы растворимости и константы проницаемости изотопов водорода при рассматриваемых условиях. По полученным температурным

зависимостям были определены энергии активации диффузии, проницаемости и растворимости.

Во всех экспериментах был зафиксирован эффект влияния реакторного излучения на параметры взаимодействия изотопов водорода с исследуемыми материалами. В каждом из проведенных исследований факторами, приводящими к изменению параметров взаимодействия изотопов водорода с материалами, являются различные физические процессы, которые характерны для исследуемого материала при данных условиях.

Результаты проведенных исследований могут позволить сделать оценки накопления и миграции трития в элементах конструкции ТЯР при их реальной работе.

Литература

- Sadvakassova, A.O. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility / A.O. Sadvakassova, I. L. Tazhibayeva, E.A. Kenzhin, T.V. Kulsartov // Fusion Science and Technology.– July 2011.– Vol. 60.– Number 1t.– P. 9-15.
- Кульсартов, Т.В. Термодесорбционные исследования выхода трития из облученной керамики Li2TiO3 / Т.В. Кульсартов, И.Л. Тажибаева, Е.А. Кенжин // Доклады VII межд. конф. "Ядерная и радиаци-онная физика, Алматы, 08-11 сентября 2009 г.", Алматы, НЯЦ РК, 2010, с. 306-310.
- 3. Redhead, P. A. Thermal desorption of gases. Vacuum 12 (1962) p.203-211.
- 4. ОСТ 92-4949-84. "Металлы. Методы определения высокотемпературной водородопроницае-мости", с. 40, Изд-во стандартов, Москва, Россия (1986).
- Frauenfelder, R. Solution and diffusion of Hydrogen in Tungsten / R. Frauenfelder // J. of Vac. Sci-ence & Technology.- 1968.-Vol. 6, № 3.- P. 388-392.
- 6. MR Louthan and Caskey, G. Hydrogen Transport and Embrittlement in Structural Metals / MR Louthan and G.Caskey // Int. J. Hydrogen Energy.- 1976.- №1.- C. 291-305.
- 7. Mattsson, E. and Schueckher, F. An investigation of hydrogen embrittlement in copper / E. Mattsson and F.Schueckher // Journal of the Institute of Metals.- 1958.- №87.- C. 241-247.
- Caskey, G.R. Hydrogen Transport in Copper / G.R. Caskey, A.H. Dexter, M.L. Holzworth, M.R. Louthan and R.G. Derrick // «DP-MS-75-6». Savannah River Laboratory, Aiken SC.– 1975.
- Caskey, G.R. The Effect of Oxygen on Hydrogen Transport in Copper / G.R. Caskey, A.H. Dexter, M.L. Holzworth, M.R. Louthan and R.G. Derrick // Corrosion.- 1976.- № 32.- P. 370-374.
- 10. Gorman, J.K. Hydrogen Permeation through Metals / J.K. Gorman and W.R. Nardella // Vacu-um.- 1962.- №12.- Р. 19-24.
- 11. Zapp, P. Material Science Symposium / P. Zapp, R. Mattas, and H. K. Birnbaum // ASM, Detroit, Mich., October 21-24.-1974.
- 12. Keiser, J. Material Science Symposium / J. Keiser, G. Matusilwicz and H. K. Birnbaum // ASM, Detroit., Mich., October 21-24.-1974.
- McNabb, A. and Foster, K. A new analysis of the diffusion of hydrogen in iron and ferrite // Trans. of the metallic Soc.- 1963.-Vol. 227.- P. 618-627.
- 14. Кульсартов, Т. В. Исследование влияния реакторного излучения на процесс проникновения изотопов водорода сквозь нержавеющую сталь SS316IG // Вопросы Атомной Науки и Техники.– 2008.–Vol. 2.
- 15. Russel, K.S. Phase Stability under Irradiation // Progr. Mat. Sci.- 1984.- Vol. 28.- P. 229-434.
- 16. Зеленский, В. Ф. Некоторые проблемы физики радиационных повреждений материалов / В. Ф. Зеленский // Киев: «Наук. Думка».– 1979.– 240 с.

РЕАКТОР СӘУЛЕЛЕНДІРУЫ ШАРТТАРЫНДАҒЫ ДЕЙТЕРИЙДЫҢ ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРЛАРДЫҢ МАТЕРИАЛДАРМЕН ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІНІҢ ПАРАМЕТРЛЕРІ

¹⁾ Тажибаева И.Л., ²⁾ Кенжин Е.А., ¹⁾ Кульсартов Т.В., ¹⁾ Гордиенко Ю.Н., ¹⁾ Понкратов Ю.В., ¹⁾ Барсуков Н.И., ¹⁾ Гныря В.С., ¹⁾ Заурбекова Ж.А., ³⁾ Муканова А.О., ¹⁾ Тулубаев Е.Ю., ³⁾ Чихрай Е.В., ³⁾ Шестаков В.П.

¹⁾ ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

2) Шәкәрім атындағы Семей мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

³⁾ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің Эксперименттік және

теориялық физика ғылыми зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

Жұмыс, олардың нақты жұмысын модельдейтін жағдайларында сутегі изотоптарын термоядролық реакторлардың (ТЯР) материалдарымен әрекеттесуін зерттеу нәтижелерін шолуға арналған. Алынған тәжірибелік деректер негізінде сутегі изотоптарын вольфраммен, оттексіз мыспен және SS316IG (ITER Grade) тоттанбайтын болатпен (диффузия, өтімділік, ерігіштік коэффициенттері) әрекеттесудің негізгі параметрлары анықталды.

PARAMETERS OF DEUTERIUM INTERACTION WITH FUSION REACTOR MATERIALS UNDER REACTOR IRRADIATION

¹⁾ I.L. Tazhibayeva, ²⁾ Ye.A. Kenzhin, ¹⁾ T.V. Kulsartov, ¹⁾ Yu.N. Gordienko, ¹⁾ Yu.V. Ponkratov, ¹⁾N.I. Barsukov,
 ¹⁾ V.S. Gnyrya, ¹⁾ Zh.A. Zaurbekova, ³⁾ A.O. Mukanova, ¹⁾ Ye.Yu. Tulubayev, ³⁾ E.V. Chikhray, ³⁾ V.P. Shestakov

 Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
 Shakarim Semipalatinsk State University, Semey, Kazakhstan
 Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The work is devoted to results review of the hydrogen isotopes interaction with materials of fusion reactors under conditions simulating their real work. On the basis of experimental data, the basic parameters of the interaction of hydrogen isotopes (diffusion coefficients, permeability, solubility) with tungsten, oxygen-free copper and stainless steel SS316IG (ITER Grade) were determined.

УДК 621.039.517

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ТРИТИЯ И ГЕЛИЯ В ОБЛУЧЕННОМ БЕРИЛЛИИ

Прозорова И.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования содержания трития и гелия в образце бериллия, извлеченного из реактора ИВГ.1М. с учетом времени наработки и распада в течение длительной работы реактора.

Повреждение бериллия в процессе его использования в ядерных реакторах происходит в результате протекания в нем двух первичных процессов: упругого взаимодействия нейтронов с ядрами и ядерных реакций. Облучение бериллия потоком нейтронов с энергией от 0,7 до 20 МэВ приводит к образованию изотопов лития (⁶Li), трития (³H) и гелия (³He и ⁴He) в результате реакций (n, α) и (n,2n). Долговременное накопление газов гелия и трития производит эффект вздутия в образцах, а образовавшиеся ³He и ⁶Li, вызванные реакцией ⁹Be(n, α), имеют большое сечение поглощения.

Объектом исследования являлся образец бериллия, который находился в качестве образцасвидетеля в реакторе и обучался в течение длительной работы начиная с 1975 года. Образец размещались в ячейке «Д» реактора ИВГ.1М, расположенной в межканальном вытеснителе на расстоянии R=10 см от вертикальной оси реактора. Материалом образца является бериллий марки ТШГ-200. Массовая доля бериллия в образцах составляет не менее 97,8%. Массовая доля примесей в бериллии приведена в таблице 1.

Массовая доля примесей не более, %										
Fe	Al	Si	Cr	F	0	С	Ti	Сумма Mg, Mn, Ni, Cu		
0,25	0,03	0,04	0,05	0,002	1,3	0,12	0,04	0,08		

Образец имел цилиндрическую форму, с диаметром 4 мм и высотой 56 мм. Внешний вид образца, используемого при формировании сборки, представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Внешний вид образца

Основные уравнения

Для нейтронов с энергией $E \ge 0,71$ МэВ [1] идет реакция (n, α), которая приводит к серии реакций

⁹*Be*(*n*,
$$\alpha$$
) \rightarrow ⁶*He*
⁶*He* $\xrightarrow{\beta^{-}}$ ⁶*Li*, *T*_{1/2} = 0,8 с
⁶*Li*(*n*, α) \rightarrow ³*H* (1)
³*H* $\xrightarrow{\beta^{-}}$ ³*He*, *T*_{1/2} = 12,33 год
³*He*(*n*, *p*) \rightarrow ³*H*

Для нейтронов с энергией $E \ge 2,7$ МэВ [1] идет реакция (n, 2n)

$${}^{9}Be(n,2n) \rightarrow {}^{8}Be+2n$$

 ${}^{8}Be \xrightarrow{\gamma} 2^{4}He, T_{1/2} = 10^{-16}c$ (2)

Схема цепочек реакций, происходящих при облучении бериллия, приведена на рисунке 2.

Как видно из уравнения (1), некоторое количество бериллия почти сразу же превращается в ⁶Li. Концентрация бериллия, гелия, лития и трития определяется с использованием следующих уравнений:

$$\frac{dN_{Be}}{dt} = -N_{Be} \cdot \{RR\}_{Be}$$

$$\frac{dN_L}{dt} = N_{Be} \cdot \{RR\}_{Be} - N_L \cdot \{RR\}_L$$

$$\frac{dN_T}{dt} = N_L \cdot \{RR\}_L - \lambda_T \cdot N_T + N_{He} \cdot \{RR\}_{He3}$$

$$\frac{dN_{He3}}{dt} = \lambda_T \cdot N_T - N_{He3} \cdot \{RR\}_{He3},$$
(3)

где зависимость концентрации N от времени не учитывалась для упрощения системы расчета. Подстрочные индексы *Be*, *L*, *T* и *He* соответствуют ⁹Be, ⁶Li, ³H и ³He. Постоянная λ_T является постоянной распада трития и равна 1,78·10⁻⁹ с⁻¹.



Рисунок 2. Схема цепочек реакций, происходящих при облучении бериллия

Скорость изотопной реакции $\{RR\}_x$: (n,T) для ⁶Li, (n,p) для ³Не и реакция (n, α) для бериллия определяется из следующего уравнения:

$$\left\{RR\right\}_{x} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \phi(E,t)\sigma_{x}(E)dE$$
(4)

Энергетический интервал (E_{min} , E_{max}) охватывает полный диапазон энергий нейтронов, а σx (E) является сечением для соответствующего изотопа x.

В случае, когда нейтронный поток $\varphi(E,t) = 0$ (перерыв в работе реактора), последние два уравнения системы (3) становятся нетривиальными и описывают распад трития и образование ³Не.

Матрица коэффициентов системы (3) состоит из скоростей реакций изотопов и постоянной распада трития и имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} -\{RR\}_{Be} & 0 & 0 & 0 \\ +\{RR\}_{Be} & -\{RR\}_{L} & 0 & 0 \\ 0 & +\{RR\}_{L} & -\lambda_{T} & +\{RR\}_{He3} \\ 0 & 0 & +\lambda_{T} & -\{RR\}_{He3} \end{bmatrix}$$
(5)

Так как скорость реакции для бериллия зависит от величины нейтронного потока с энергией выше 0,7 МэВ, а скорости реакций для ⁶Li, ³H и ³He от величины потока тепловых нейтронов, то концентрация гелия и трития сильно зависит от спектра нейтронов в бериллии. Учет изменения потока нейтронов в коэффициентах уравнения {*RR*} делает задачу нелинейной. При проведении данного расчета сделано допущение, что скорость реакции постоянна.

В уравнениях (3-5) не учитывается реакция ⁹Be(n,2n). Поэтому образование ⁴Не в результате этой реакции определяется отдельно. Для уравнения (2) образование ⁴Не решается следующей системой уравнений

$$\frac{dN_{Be}}{dt} = -N_{Be} \cdot \{RR\}_{Be}$$

$$\frac{dN_{He4}}{dt} = N_{Be} \cdot \{RR\}_{Be} - N_{He4} \cdot \{RR\}_{He4}$$
(6)

Матрица коэффициентов системы (6) имеет следующую форму

$$\begin{bmatrix} -\{RR\}_{Be} & 0\\ +\{RR\}_{Be} & -\{RR\}_{He4} \end{bmatrix}$$
(7)

Методы и инструменты вычислений

Решение задачи состояло из двух частей: на первом этапе были выполнены нейтронно-физические расчеты скоростей реакции и плотности потока нейтронов с помощью программы MCNP5; на втором этапе для решения систем 3 и 6 с известными начальными величинами концентраций для бериллия, лития, трития и гелия были использованы соотношения (8)-(10), приведенные в [2,3], была разработана программа на языке программирования Visual Basic в среде Excel.

$$N_L(t) = N_L(0) \cdot \exp\{-RR_L \cdot t\} + \frac{A}{RR_L} \cdot (1 - \exp\{-RR_L \cdot t\}), \qquad (8)$$

где $A = N_{Be} \cdot RR_{Be}, N_{Be}$ – константа.

Уравнения для расчета концентраций трития и гелия имеют следующий вид:

$$N_T(t) = a_1 + a_2 \cdot \exp\{-(\lambda_T + RR_{He}) \cdot t\} + \frac{A \cdot RR_{He}}{\lambda_T + RR_{He}} \cdot t + \frac{(RR_{He} - RR_L) \cdot (N_L(0) - A/RR_L)}{(RR_L - \lambda_T - RR_{He})} \cdot \exp\{-RR_L \cdot t\}$$
(9)

$$N_{He}(t) = \frac{\lambda_T}{RR_{He}} \cdot a_1 - a_2 \cdot \exp\{-(\lambda_T + RR_{He}) \cdot t\} + \frac{A \cdot \lambda_T}{\lambda_T + RR_{He}} \cdot (t - 1/RR_{He}) + \frac{\lambda_T \cdot (N_L(0) - A/RR_L)}{(RR_L - \lambda_T - RR_{He})} \cdot \exp\{-RR_L \cdot t\}$$
(10)

где *a*₁ и *a*₂ – два дополнительных коэффициента:

$$a_{1} = \frac{1}{(1 + \lambda_{T} / RR_{He})} \cdot \left[N_{L}(0) + N_{T}(0) + N_{He}(0) - \frac{A}{RR_{Li}} + \frac{(\lambda_{T} \cdot A / RR_{He})}{(\lambda_{T} + RR_{He})} \right];$$

$$a_{2} = \frac{1}{(1 + RR_{He} / \lambda_{T})} \cdot \left[\frac{RR_{L}}{(RR_{L} - \lambda_{T} - RR_{He})} \cdot (N_{L}(0) - A / RR_{L}) + N_{T}(0) - \frac{RR_{He}}{\lambda_{T}} \cdot N_{He}(0) - \frac{A}{(\lambda_{T} + RR_{He})} \right];$$

 N_{Be} – концентрация бериллия; $N_{T}(0)$ – концентрация трития в начальный момент времени; $N_{He}(0)$ – концентрация гелия в начальный момент времени; $N_{L}(0)$ – концентрация лития в начальный момент времени; $N_{T}(t)$ – концентрация трития в момент времени t; $N_{He}(t)$ – концентрация гелия в момент времени t; $N_{L}(t)$ – концентрация лития в момент времени t; R_{Li} – скорость реакции для лития; RR_{He} – скорость реакции для гелия; λ_{T} – постоянная распада трития.

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ГЕЛИЯ И ТРИТИЯ

В качестве начальных условий принято, что литий, тритий и гелий имеют нулевую концентрацию, а концентрация бериллия соответствует технической характеристике бериллиевых образцов. Для последующих периодов времени использовались как начальные величины концентрации, рассчитанные на конец предшествующего периода.

Для оценки общего количества трития и гелия в образце использовались сведения о работе реактора с 1975 по 2010 год. При проведении расчетов использовалась модель активной зоны реактора ИВГ.1М (с водяным теплоносителем).

Программа для расчета рассчитана на произвольное количество шагов. В каждом шаге точно определяется количество часов работы реактора, за которым следуют часы простоя.

Расчет изменения ядерной концентрации лития, трития и гелия проводился для образца, для которого затем было проведено экспериментальное определение общего количества трития и гелия.

Изменение ядерной концентрации лития и трития, имеющее место во время облучения образца бериллия под номером 3 (Д6-п) представлено на рисунке 3.

При решении системы уравнений (3) принималось, что $N_{Be}(0) = 0,1206003$ атомов/барн см, $N_{Li}(0) = N_{He}(0) = 0$, $RR_{Be} = 2,0924 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$, $RR_{Li} = 5,2192 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$, $RR_{He3} = 2,3298 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$, $RR_{He4} = 3,3107 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$.

Облучение проводилось с 07.03.1975.

На рисунке 3 линиями с номерами 1 и 2 показаны изменения ядерной концентрации лития и трития соответственно.

На рисунке 4 представлено изменение ядерной концентрации наработанного трития во время длительной работы реактора без учета распада (линия 1) и изменение ядерной концентрации с учетом распада трития в периоды простоя реактора (линия 2).

На рисунке 5 представлено изменение ядерной концентрации наработанного ³Не во время длительной работы реактора без учета распада (линия 1) и изменение ядерной концентрации с учетом распада ³Не в периоды простоя реактора (линия 2).

Из распределений, представленных на рисунках 4 и 5, видно, что учет распада трития и гелия в течение длительной работы реактора незначительно влияет на изменение их ядерных концентраций. На рисунке 6 представлено изменение ядерной концентрации наработанного ⁴Не в течение длительной работы реактора.

Содержание трития и гелия в образце объемом 0,5356 см³ на конец 2010 года с учетом времени наработки и распада в течение длительной работы реактора представлено в таблице 2.

Таблица 2. Содержание трития и гелия в образце

Изотоп	Ядерная концентрация, атомов/барн∙см	Содержание в образце (расчет), ppm	Содержание в образце (эксперимент [4]), ppm
Гелий (⁴Не)	1,1901 10 ⁻⁵	12,012	12,0
Гелий (³ Не)	5,207 [.] 10 ⁻⁷	0,526	0,7
Тритий (³ Н)	9,226 [.] 10 ⁻⁷	0,931	0,4



Рисунок 3. Изменение ядерной концентрации лития и трития в течение длительной работы реактора (1 – литий, 2 – тритий)



Рисунок 4. Изменение ядерной концентрации ядер трития в течение длительной работы реактора без учета (1) и с учетом распада (2)



Рисунок 5. Распределение плотности ядер ³Не в течение длительной работы реактора без учета (1) и с учетом и распада (2)



Рисунок 6. Распределение ядерной концентрации ⁴Не в течение длительной работы реактора

Для образца была произведена оценка количества выгоревших ядер бериллия при облучении бериллиевых образцов потоком нейтронов. Выгорание изотопа ⁹Ве составляет 0,13 % от исходного количества ядер.

Анализируя результаты, приведенные в таблице 4, можно отметить хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента для ⁴Не. Для ³Не и ³Н расхождение составляет 17 и 53 % соответственно. Одна из возможных причин расхождения результатов связана с тем, что при проведении расчетов использовалась модель активной зоны реактора ИВГ.1М с водяным теплоносителем, хотя с 1975 по 1988 гг. реактор ИВГ.1 эксплуатировался с активной зоной с газообразным теплоносителем (водородом).

Выводы

Проведено расчетное исследование содержания трития и гелия в образце бериллия, извлеченных из реактора ИВГ.1М, на конец 2010 г. с учетом времени наработки и распада в течение длительной работы реактора (с 1975года). Определены плотность потока быстрых нейтронов и скорости реакций ${}^{9}Be(n,\alpha){}^{6}Li$, ${}^{9}Be(n,2n){}^{4}He$, ${}^{6}Li(n,\alpha){}^{3}H$, ${}^{3}H(n,\gamma){}^{4}He$.

Определено изменение ядерных концентраций лития, трития и гелия в образце.

Для изотопа ⁹Ве определено выгорание, величина которого составила 0,13 % от исходного количества ядер.

Литература

- 1. Серняев, Г.А. Радиационная повреждаемость бериллия / Г.А. Серняев. Екатеренбург : Екатеренбург, 2001. 396 с.
- 2. MCNP burn up lithium Hughes, D.J., Schwartz R.B. US . // Comm. Rep. BNL-325, 1958.
- M.M. Bretscher, J.L. Snelgrove: The whole-core LEU U3Si2-Al fuel demonstration in the 30-MW Oak Ridge Research Reactor, ANL/RERTR/TM-14, 1997.
- Исследования в обоснование тритиевой безопасности термоядерных установок: отчет о НИР (промежуточный): 02.17 / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Н.И. Барсуков. – Курчатов, 2011. – 48 с. – ГР. № 0211РК00394.

СӘУЛЕЛЕНГЕН БЕРИЛИЙДЕ ТРИТИЙ МЕН ГЕЛИЙДІҢ МӨЛШЕРІН АНЫҚТАУ

Прозорова И.В.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

ИВГ.1М. реакторынан алынған реактордың ұзақ жұмыс істеу ішінде атқарым және ыдырау уақытын есепке ала, берилий үлгісінде тритий мен гелий мөлшерінің есептік-тәжірибелік зерттеу нәтижелері ұсынылды.

DETERMINATION OF TRITIUM AND HELIUM CONTENT IN THE IRRADIATED BERYLLIUM

I.V. Prozorova

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The calculation and experimental analysis results of tritium and helium content in the beryllium specimen, extracted from IVG.1M reactor taking into account exploitation and decay time during continuous operation of the reactor.

УДК 621.039.53.536

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА КОРИУМА В КОРПУСЕ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА (ПРОЕКТ INVECOR)

¹⁾ Бакланов В.В., ¹⁾ Васильев Ю.С., ²⁾ Жданов В.С., ¹⁾ Колодешников А.А., ¹⁾ Кукушкин И.М., ³⁾ Paul David W. Bottomley, ⁴⁾ Christophe Journeau

¹⁾ Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан ²⁾ Новосибирский филиал ИБРАЭ РАН, Россия ³⁾ ITU, Карлсруэ, Германия ⁴⁾ СЕА Кадараш, Франция

В рамках проекта INVECOR с финансовой поддержкой МНТЦ выполнены крупномасштабные интегральные эксперименты с применением 60 кг расплава прототипного кориума, сливаемого из электроплавильной печи с высоты 1,7 м в модель днища корпуса реактора BBЭP, с последующей имитацией остаточного тепловыделения с применением плазмотронного нагревателя в течение 1 – 2 часов. Удельное тепловыделение в кориуме составляло 6 – 9 Вт/см³ при максимальной температуре на стенке модели корпуса до 1400 °С. В процессе подготовки экспериментов были выполнены следующие работы: (1) отработка технологии нанесения защитного покрытия на графитовые поверхности деталей экспериментальной установки, находящихся в контакте с расплавом кориумаи проверка его эффективности; (2) расчетное моделирование бассейна кориума (эффективность нагрева, тепловые потоки и распределение температур); (3) совершенствование конструкции коаксиальных плазмотронов. Каждый из 4-х выполненных крупномасштабных экспериментов сопровождался пост-экспериментальными исследованиями образцов кориума и материала стенки модели корпуса. Анализ показал, что в результате падения расплава кориума на поверхность днища модели корпуса формируется общирный слой фрагментов, покрывающий сплошной кориум. Заметная эрозия стенки модели корпуса обнаружена только в одном из экспериментов в месте первичного контакта струи расплава кориума со стенкой модели.

Введение

Целью проекта являлось экспериментальное моделирование тепловых и физико-химических процессов при удержании бассейна расплава прототипного кориума на днище водоохлаждаемого корпуса реактора для определения:

 влияния масштаба, формы поверхности взаимодействия и других эффектов на коррозионные процессы, определяющие финальную толщину стенки корпуса реактора,

 влияния структуры металл-оксидного бассейна расплава на возможность его удержания в корпусе,

 количественных характеристик процессов при удержании в корпусе (IVR), необходимых для разработки и верификации моделей, используемых при обосновании IVR.

Для достижения целей проекта использована установка ЛАВА-Б, созданная в Институте атомной энергии НЯЦ РК в процессе выполнения международных программ COTELS и IVR-AM в кооперации с компанией NUPEC (Япония).

В результате усовершенствования всех систем экспериментальной установки ЛАВА-Б, получена возможность получать и сливать в экспериментальную секцию около 60 кг прототипного кориума с последующей имитацией остаточного тепловыделения в бассейне кориума, находящемся в модели корпуса, в течение 1...2 часов при подводимой к кориуму суммарной мощности не менее 75 кВт. В соответствии с планом проекта INVECOR выполнено 4 крупномасштабных интегральных эксперимента.

Экспериментальная установка и ее усовершенствование

Установка (рисунок 1) оснащена индукционной печью для получения расплава прототипного кориума и устройством приема сливаемого расплава, содержащего водоохлаждаемую модель днища силового корпуса реактора, устройство для имитации остаточного тепловыделения плазмотронного типа и набор датчиков температуры, давления и деформации. Для подготовки крупномасштабных опытов и оптимизации инженерно-технологических решений выполнялись поддерживающие эксперименты на маломасштабной установке.

Электроплавильная печь для получения 60 кг расплава прототипного кориума устанавливается над устройством приема расплава, в котором могут размещаться различные экспериментальные секции в зависимости от вида испытаний.

В процессе выполнения проекта были значительно улучшены характеристики экспериментальной установки.

В частности, был увеличен внутренний объем плавильного тигля за счет применения более качественных графитовых материалов, а также было улучшено устройство для измерения температуры кориума в процессе его нагрева и плавления с применением двухволнового пирометра.

Предварительные расчеты модели корпуса и бассейна кориума показали (см. рисунок 2), что для создания условий эксперимента, адекватных реальной реакторной ситуации требуется значительно повысить мощность имеющегося устройства для имитации остаточного тепловыделения в кориуме, а также обеспечить температуру внутренней стенки модели корпуса в зоне ее взаимодействия с кориумом не ниже 1000 °С (температура начала физикохимического взаимодействия между компонентами кориума и сталью).



Рисунок 1. Конструктивная схема установки «ЛАВА-Б» для выполнения экспериментов INVECOR



Рисунок 2. Температурное поле на границе "кориум/корпус" при наличии профилированной теплоизоляции на внешней поверхности модели

Для повышения суммарной мощности устройства для имитации остаточного тепловыделения количество коаксиальных плазмотронов в устройстве было увеличено с 3 до 5, а мощность каждого плазмотрона была доведена до 15...17 кВт за счет улучшения конструкции наконечников плазмотронов. Работоспособность и ресурс плазмотронов были проверены в многочисленных поддерживающих экспериментах, как с единичными плазмотронами, так и с пятью плазмотронами одновременно. Для повышения температуры в зоне взаимодействия "кориум/сталь" было решено применить теплоизоляционный пакет на внешней поверхности модели корпуса (между стальной стенкой и потоком охлаждающей воды). Эффективность такой конструкции проверялась в специальных поддерживающих экспериментах, в которых один коаксиальный плазмотрон погружался в смесь компонентов кориума С-32 (степень окисления циркония 32%). Внешняя поверхность слоя кориума была окружена теплоизоляционным пакетом из стеклоткани. Снаружи вся экспериментальная сборка охлаждалась потоком воды (рисунок 3). Проверка показала, что принятые меры позволяют достичь требуемой температуры в зоне взаимодействия "кориум/сталь" при существующей мощности плазмотрона.



составной графитовый наконечник внешнего электрода;
 защитный экран;
 выход охлаждающей воды;
 рубашка охлаждения;
 стеклоткань;
 водо охлаждающей воды;
 внутренний сосуд;
 смесь крошки таблеток диоксида урана и порошка диоксида циркония;
 металлический цирконий.



Защитное покрытие из карбида циркония на внутренней поверхности графитового тигля для получения расплава прототипного кориума позволило подавить взаимодействие между оксидными компонентами активной зоны и углеродом в процессе разогрева и плавления кориума. Покрытие наносилось путем управляемого растекания расплава циркония по горячей поверхности графита. В процессе остывания расплав циркония взаимодействовал с поверхностным слоем графита, формируя карбид циркония на поверхности и в поверхностных порах.

Аналогичная технология применена для создания защитного покрытия на внешней поверхности графитовых наконечников плазмотронов, что позволило избежать нежелательного взаимодействия между кориумом и графитом в процессе имитации остаточного тепловыделения в бассейне кориума, находящемся в модели корпуса.

В результате расчетных, экспериментальных и конструкторских работ была создана модель корпуса реактора для интегральных крупномасштабных экспериментов (см. рисунок 4).

Внутренний диаметр модели корпуса 40 см, толщина стенки 50 мм, форма модели полуэллиптическая. Модель оснащена термопарами для измерения температуры стенки на различных расстояниях от внутренней поверхности, а также датчиками перемещения/деформации стенки в процессе экспериментов.



1 – кориум; 2 – кожух теплоизоляционного пакета; 3 – фланец; 4 – модель днища корпуса; 5, 6 – образец корпусной стали.

Рисунок 4а. Экспериментальная секция для интегральных экспериментов



Рисунок 4б. Общий вид экспериментальной секции

ПОДГОТОВКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В процессе выполнения проекта выполнено четыре крупномасштабных интегральных эксперимента. Четвертый эксперимент являлся повторением 1го эксперимента по составу кориума. В отличие от

- -

других экспериментов, в нем была существенно повышена эффективность теплоизоляции снаружи модели корпуса и добавлен второй верхний тепловой экран. Данные по загрузке кориума во всех интегральных экспериментах приведены в таблице 1.

Таблица .	I. Загрузка	скориума в	з интегральных	экспериментах	
-----------	-------------	------------	----------------	---------------	--

Эксперимент	Масса материала в тигле ЭПП*, кг	Добавка в модель корпуса**, кг	Суммарная масса кориума, кг
1	60	10	70
2	60	9,4	69,4
3	60	-	60
4	60	-	60

Состав кориума соответствовал композиции С-32 (степень окисления циркония 32%)

Состав кориума соответствовал композиции С-90 (степень окисления циркония 90%)

Подготовка 1-го эксперимента

Первый интегральный эксперимент посвящен моделированию поведения бассейна кориума на днище корпуса реактора, когда основная доля оксидного кориума падает в нижний пленум в виде расплава прототипного кориума С-32. После падения расплава на днище корпуса в кориуме имитируется остаточное тепловыделения применением блока из 5 коаксиальных плазмотронов. Дополнительно в экспериментальную секцию было помещено около 10 кг оксидного кориума С-90 в виде крошки слитка, полученного в результате 1-го калибровочного эксперимента. Таким образом, в случае полного слива расплава из ЭПП в экспериментальной секции наличие 70 кг ожидалось прототипного ума¹⁾[1].

На рисунке 5 показана схема экспериментальной секции для первого интегрального эксперимента.

ровочных экспериментов. Устойчивость работы плазмотронов на этапе предварительного разогрева модели корпуса перед сливом расплава обеспечивалась применением аргона в качестве рабочего газа плазмотронов²⁾.

Подготовка 2-го эксперимента

При подготовке экспериментальной секции для второго интегрального эксперимента, в соответствии с рабочим планом, необходимо было добавить нержавеющую сталь в кориум, находящийся в молели корпуса. Чтобы избежать нежелательных физико-химических процессов в плавильном тигле ЭПП, было решено поместить листовую нержавеющую сталь в экспериментальную секцию, имитируя внутреннюю плакировку корпуса реактора ВВЭР (рисунок 6).



Рисунок 5. Экспериментальная секция для 1-го эксперимента

Подготовка экспериментальной секции выполнялась в соответствии с результатами и рекомендациями предварительных расчетов и поддерживающих экспериментов. На нижние участки внешних наконечников коаксиальных плазмотронов было нанесено защитное покрытие из карбида циркония.

Диаграмма нагрева/плавления компонентов кориума в ЭПП установки «ЛАВА-Б» была разработана на основе результатов крупномасштабных калиб-

Рисунок 6. Экспериментальная секция для 2-го эксперимента

Диаграмма подвода мощности к индуктору ЭПП была скорректирована с учетом результатов 1-го интегрального эксперимента, - темп нагрева загрузки компонентов кориума был замедлен в области температуры плавления металлического циркония. чтобы предотвратить нежелательные перемещения расплава внутри тигля до момента слива расплава.

¹⁾ Предварительная загрузка кориума в модель корпуса имитировала версию о неодновременном падении деградированной активной зоны в нижний пленум [6].

Применение аргона в качестве рабочего тела плазмотронов на начальном этапе эксперимента (перед сливом расплава) применялось во всех экспериментах. После слива расплава в модель корпуса аргон заменялся на азот (или смесь газов "аргон+азот") для повышения мощности плазмотронов.

Подготовка 3-го эксперимента

В данном эксперименте было решено имитировать падение фрагментов стальных конструкций сверху на бассейн кориума после его слива и формирования верхней корки. Такая конфигурация могла послужить проверкой постулированного сценария развития тяжелой аварии, в соответствии с которым в бассейне кориума, находящимся на днище корпуса, формируется слой металлического расплава поверх оксидного слоя (так называемый "фокусэффект"). Схема расположения материалов в модели корпуса показана на рисунке 7. Металлическая пластина подвешивалась ниже верхнего теплового экрана на медных скобах. Время прогрева пластины до деградации медных скоб достаточно, чтобы на поверхности кориума успела сформироваться твердая корка, предотвращая падение стали непосредственно в расплав оксидного кориума.

В отличие от предыдущих экспериментов, в модель корпуса не были добавлены фрагменты кориума, что должно было обеспечить более высокую температуру прогрева модели перед сливом расплава.

Кроме того, для повышения температуры стенки модели в процессе эксперимента был установлен минимально возможный расход воды, охлаждающей внешнюю поверхность модели корпуса (теплоизоляционного пакета).



Рисунок. 7. Экспериментальная секция для 3-го эксперимента

Подготовка 4-го эксперимента

Четвертый интегральный эксперимент являлся повторением первого интегрального эксперимента, с точки зрения состава кориума. Главные отличия в условиях выполнения эксперимента обеспечивались следующими мерами:

Отсутствием предварительной засыпки в модель корпуса оксидного кориума;

 Повышением эффективности внешнего слоя теплоизоляции модели корпуса за счет замены стеклоткани на графитовый войлок (что снизило теплопроводность теплоизоляционного пакета в 8...10 раз);

 Повышением эффективности верхнего теплового экрана над кориумом за счет размещения и надежной фиксации стальной пластины между поверхностью кориума и основным танталовым экраном;

 Регулированием расхода внешней охлаждающей воды из условия поддержания температуры на выходе на уровне 90 °С.

Схема подготовки экспериментальной секции и ее внешний вид показаны на рисунке 8.



Рисунок 8. Экспериментальная секция для 4-го эксперимента

Выполнение интегральных экспериментов

Начальная стадия всех четырех экспериментов выполнялась по одному сценарию: компоненты кориума загружались в тигель электроплавильной печи индукционного типа, расположенной над экспериментальной секцией и разогревались до расплавленного состояния методом "горячего тигля". После достижения заданной температуры (проверенной в калибровочных экспериментах) в дне тигля вскрывалось отверстие, и расплав сливался в экспериментальную секцию. Примерно за 12...15 минут до слива расплава кориума в экспериментальной секции включалось устройство для имитации остаточного тепловыделения, что приводило к подогреву стенки модели корпуса до 200...250°С. В данной статье приводится описание только 4-го эксперимента, в котором достигнуты максимальные параметры.

Отверстие в дне тигля было вскрыто после достижения температуры внутри тигля 2630 °С. Плазмотронный нагреватель был включен за ~15 минут до слива расплава, что обеспечило подогрев стенки модели корпуса до ~250 °С (на стадии предварительного нагрева расход охлаждающей воды на внешнюю поверхность модели корпуса был отключен).

На рисунке 9 приведены графики температуры в стенке модели корпуса в процессе эксперимента INVECOR 4. Общая длительность эксперимента (включая стадию предварительного прогрева) составила более 2 часов.

Средняя мощность всех плазмотронов в процессе эксперимента составила около 75 кВт. Максимальная температура нагрева стенки модели в процессе эксперимента наблюдалась в центральной части дна модели и составляла 1400 °C.

Температура верхнего танталового экрана была несколько ниже, чем в предыдущих экспериментах, что подтверждает положительный эффект от применения промежуточного стального экрана.

В таблице 2 приведены параметры, достигнутые в процессе выполнения интегральных экспериментов.



Рисунок 9. Температура стенки модели корпуса в процессе 4-го интегрального эксперимента

N⁰	Температура кориума перед сливом, °С	Мощность плазмотронов, кВт	Время эксперимента, мин	Макс. температура стенки модели, °С
1	2560	65	60	820
2	2570	75	60	1050
3	2680	78	60	1350
4	2640	75	130	1400

Таблица 2. Результаты экспериментов INVECOR

Результаты пост-тест исследований

В результате разборки экспериментальных секций после экспериментов было обнаружено, что затвердевший кориум в модели корпуса находится как в виде сплошного слитка, так и слоя фрагмен-



Рисунок 10. Конфигурация кориума после 1-го эксперимента

тов, расположенного поверх слитка (см. рисунок 10-13).

В таблице 3 приведены соотношения масс "слиток/фрагменты" после интегральных экспериментов INVECOR.



Рисунок 11. Конфигурация кориума после 2-го эксперимента

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА КОРИУМА В КОРПУСЕ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА (ПРОЕКТ INVECOR)











Nº	Масса кориума в модели, кг	Доля фрагментов кориума, %	Доля слитка кориума, %
1	47,0	10,9	89,1
2	68,9	33,9	66,1
3	58,4	27,8	72,2
4	55,4	49,8	50,2

Результаты исследования кориума после 1-го эксперимента

Основными компонентами образцов слитка расплава по результатам рентгеновского фазового анализа являются оксидные фазы переменного состава (U,Zr)O2 с ГЦК – решеткой двуокиси урана, фаза металлического циркония, стабилизированная кислородом α-Zr(O), и фаза α-(U,Zr) на основе кристаллической решетки α-урана. Общим признаком образцов является также малое содержание циркония в основном твердом растворе (U,Zr)O2 с оценочным составом U_{~0.9}Zr_{~0.1}O₂. Из всей совокупности образцов материала слитка выделяются образцы из центральной области присутствием железосодержащей фазы, наиболее уверенно идентифицированной как Zr₂FeO_X или ε-Zr₆Fe₃O_{0,6} с кубической решеткой пространственных групп Fm3m или Fd3m. Элементный анализ подтверждает присутствие железа в этом образце.

Основными компонентами образцов фрагментированного кориума являются оксидные фазы переменного состава (U,Zr)O₂ с ГЦК – решеткой двуокиси урана. Фазы металлического циркония, стабилизированной кислородом α -Zr(O) в этом материале значительно меньше, чем в материале слитка, и фаза α -(U,Zr) на основе кристаллической решетки α -урана практически отсутствует. Общей чертой образцов является также малое содержание циркония в основном твердом растворе (U,Zr)O₂ с оценочным составом от U_{0.97}Zr_{-0.03}O₂ до U_{0.93}Zr_{-0.07}O₂. Основной общей особенностью состава образцов фрагментированного кориума над слитком является наличие оксидных фаз с высоким содержанием циркония.

Это окись циркония с моноклинной кристаллической решеткой, а также фазы, наличие которых на дифрактограммах идентифицируется лишь по увеличению фона и удлинению склона рефлексов основного твердого раствора в сторону больших углов, что соответствует увеличению содержания циркония в твердом растворе $(U,Zr)O_2$ с любым типом кристаллической решетки. Подобная дифракционная картина может возникать в случае быстрой кристаллизации фаз (закалке), при которой образуются неравновесные фазы с сильно искаженными кристаллическими решетками.

Элементный анализ показал однородное распределение урана и циркония в образцах фрагментов кориума. Элементный состав фрагментированного кориума практически идентичен составу материала слитка.

Результаты исследования кориума после 2-го эксперимента

Результаты фазового и элементного анализа образцов кориума в модели корпуса:

Фазовый состав всех образцов материала слитка практически идентичен, что подтверждается результатами элементного анализа и говорит об однородности расплава, как в момент застывания, так и в момент слива расплава. Об этом же говорит идентичность фазового и элементного состава образца корки расплава на танталовой воронке, образцов материала слитка расплава и фрагментов кориума над слитком в модели корпуса.

В образцах, имевших непосредственный контакт со стальными элементами установки зафиксировано присутствие продуктов их химического взаимодействия с расплавом кориума. В остальных образцах слитка содержание железосодержащих фаз фактически равно нулю.

Материал фрагментов слитка в основном однородный с микроструктурой, характерной для оксидно-металлического кориума. Включения металлического α-урана относительно редки и присутствуют как в основном материале слитка, так и в частично растворенных фрагментах таблеток двуокиси урана.

Присутствие железа и железосодержащих фаз в центральной и, особенно, в нижней областях слитка вполне согласуется с геометрией эксперимента и указывает на растворение железа в расплаве кориума.

Результаты исследования кориума после 3-го эксперимента

Основными компонентами фазового состава образцов затвердевшего расплава по результатам рентгеновского фазового анализа являются оксидные фазы переменного состава (U,Zr)O₂ с ГЦК – решеткой двуокиси урана.

Оксидные твердые растворы $(U,Zr)O_2$ характерны для всех образцов. Общей чертой состава этой фазы является малое содержание циркония в растворе, а также отсутствие фазы металлического циркония. Оценочный химический состав оксидной фазы, определялся по значению периода решетки и лежал в диапазоне составов $U_{\sim 0.97}Zr_{\sim 0.03}O_2$ ÷ $U_{\sim 0.85}Zr_{\sim 0.15}O_2$ (0,546÷0,542 нм).

Результаты исследования кориума после 4-го эксперимента

Основными компонентами образцов верхнего слоя фрагментов по результатам рентгеновского фазового анализа являются двуокись урана UO₂, а также оксидные фазы переменного состава $(U,Zr)O_2$ с ГЦК решеткой двуокиси урана и на основе тетрагональной и моноклинной решеток диоксида циркония. В образцах материала крупных фракций удается однозначно идентифицировать присутствие материала таблеток UO₂, а, также еще целого набора фаз в диапазоне составов от UO₂ до U_{~0,8}Zr_{-0,2}O₂.

Фазовый состав образцов фракций второго слоя фрагментов отличается отсутствием двуокиси урана. Основу композиции в них составляют оксидные фазы $(U,Zr)O_2$ с ГЦК решеткой двуокиси урана, фазы $(Zr,Ur)O_2$ на основе тетрагональной и моноклинной модификаций диоксида циркония и α -Zr(O).

Следует отметить факт присутствия в материале мелких фракций наличие значительного количества фазы переменного состава $U_{\sim 0,5}Zr_{\sim 0,5}O_2$. В образцах самых мелких фракций определяются линии высших окислов урана U_3O_{8-X} .

Количественный элементный состав образцов крупных фрагментов кориума над слитком, в целом, соответствует составу материала крупных фракций частиц нижнего слоя фрагментов. Фазовый состав фрагментов в основном представлен твердыми растворами $(U,Zr)O_2$ с ГЦК решеткой двуокиси урана и $(Zr,Ur)O_2$ на основе кубической или тетрагональной модификаций диоксида циркония. Следует отметить отсутствие фазы металлического циркония.

Основными компонентами образцов слитка расплава являются твердый раствор (U,Zr)O₂ с ГЦК решеткой двуокиси урана и α-фаза металлического циркония, стабилизированная кислородом α-Zr(O). Также в образцах присутствуют в небольших количествах фаза на основе кристаллической решетки α-урана α-(U,Zr).

Общей характеристикой образцов является малое содержание циркония в основном твердом растворе $(U,Zr)O_2$ с оценочным составом $U_{\sim 0.95}Zr_{\sim 0.05}O_2$.

Железосодержащие фазы (U,Zr)Fe₂, Zr₂FeO_X с кубической решеткой пространственных групп Fd3m и Fm3m встречаются также в образце кориума.

Образцы донной корки периферийных областей слитка имеют близкий фазовый состав, схожий с фазовым составом образцов средней части слитка, и представляют собой закалочный слой слитка в областях, где не произошло плавление материала модели корпуса.

Напротив, образцы корок, отобранные в областях, где произошло плавление стенки модели корпуса, содержат продукты взаимодействия кориума с расплавом стали. Важнейшими из железосодержащих фаз, присутствие которых велико в образцах околодонных корок, являются интерметаллидные фазы ZrFe₃ (плотноупакованная ГЦК структура), (Zr,U)Fe₂ (ферромагнетик, фаза Лавеса с кубической решеткой типа MgCu₂) и металлическая фаза α-Fe.

Особое внимание было уделено исследованию донной области слитка, где наблюдается слой материала толщиной около 1 мм, содержащий продукты взаимодействия кориума со сталью. Увеличенные изображения этой области до и после травления представлены на рисунке 14.



Рисунок 14. Структура зоны взаимодействия кориума со сталью

Основной отличительной особенностью этих образцов является присутствие большого количества железосодержащих интерметаллидных фаз ZrFe₃, (Zr,U)Fe₂ и металлической фазы α-Fe.

Результаты исследования образцов корпусной стали

Вид поверхности сечения образцов корпусной стали в наиболее горячей зоне показан на рисунке 15.



Рисунок 15. Структура образца стали в центральной зоне модели корпуса: (а) после 3-го эксперимента; (б) после 4-го эксперимента

Из рисунка видно, что глубина зоны физикохимического взаимодействия кориума со сталью в 4-м эксперименте составила около 20 мм.

Результат фазового рентгеновского анализа образцов материала, взятых из стенки модели корпуса после 4-го эксперимента (рисунок 16) показал, что основными компонентами фазового состава в исследуемых зонах являются интерметаллидные фазы (Zr,U)Fe₂ и металлическая фаза на основе α-железа с ОЦК кристаллической решеткой.



Рисунок 16. Образцы для изучения фазового состава корпусной стали после 4-го эксперимента

Результаты анализа рефлексов фазы (Zr,U)Fe₂ показывают, что эта фаза в области 3 более размыта, чем в областях 1 и 2.

Заключение

В процессе выполненных 4-х крупномасштабных интегральных экспериментов в экспериментальные секции, представляющие собой модели корпуса реактора типа ВВЭР в масштабе ~1:12 и содержащие устройство для имитации остаточного тепловыделения на основе 5 коаксиальных плазмотронов, сливалось до 60 кг расплава прототипного кориума С-32 с высоты 1,7 м. Исходная загрузка плавильного тигля индукционной электроплавильной печи включала в себя диоксид обедненного урана в виде таблеток из бланкетных сборок реактора БН-350, металлический цирконий в виде пластин и стержней, а также окись циркония в виде мелкодисперсного порошка.

Результат исследования затвердевшего кориума после калибровочного эксперимента показал, что при выбранном режиме нагрева/плавления исходных компонентов не происходит полного растворения диоксида урана в расплаве циркония. В связи с этим сливался расплав металлических компонентов кориума с фрагментами не полностью растворенных топливных таблеток³⁾. При этом предполагалось, что растворение диоксида урана в расплаве циркония продолжится в экспериментальной секции за счет нагрева устройством для имитации остаточного тепловыделения⁴⁾.

Длительность крупномасштабных интегральных экспериментов составляла от 1 до 2 часов, при этом "объемное" энерговыделение в кориуме за счет работы устройства для имитации остаточного тепловыделения составляла от 6 до 10 Вт/см³, что соответствует постулированным значениям для феноменологического описания тяжелой аварии.

Температура расплава кориума в момент его слива в экспериментальную секцию составляла от 2570 до 2630°С. Максимальная температура стенки модели корпуса составляла 850...1400 °С. Масса кориума в модели корпуса составляла от 47 до 69 кг⁵¹. Максимальная глубина эрозии стальной стенки модели корпуса составляла около 6 мм и наблюдалась в центральной части модели в зоне первичного контакта расплава струи кориума с корпусом в 4-м эксперименте.

Тепловой поток через стенку модели корпуса был невысокий (не более 150...180 кВт/м²), что объясняется применением теплоизоляции на внешней водоохлаждаемой поверхности модели. Наличие теплоизоляции и большая толщина стальной стенки

³⁾ Длительность нагрева/плавления компонентов кориума в электроплавильной печи составляет около 1 часа, что идентично процессам, происходящим в активной зоне реактора ТМІ-2 (по версии МАГАТЭ).

⁴⁾ При растворении диоксида урана в расплаве циркония поглощается около 265 кВт на 1 кг диоксида урана.

⁵⁾ В двух экспериментах масса кориума в модели корпуса была увеличена за счет предварительного размещения в модели около 10 кг оксидного кориума (в дополнение к сливаемому расплаву).

(а также относительно высокая масса модели корпуса по отношению к массе кориума) привели к перераспределению тепловых потоков, т.е., значительная часть тепла от кориума распространялась вдоль стенки модели к верхнему фланцу, фиксирующему модель в экспериментальной установке.

Второй причиной снижения радиального теплового потока может являться зазор между внешней коркой кориума и стенкой модели корпуса, формирующийся за счет теплового расширения модели при теплообмене кориум/сталь. В 4-м эксперименте обнаружена слоистая корка с дополнительными газовыми зазорами, что явилось дополнительным термическим сопротивлением на пути распространения радиального теплового потока.

Обнаружено, что во всех экспериментах затвердевший кориум представлял собой сплошной слиток и слой мелких фрагментов поверх слитка. Массовая доля фрагментированного кориума доходила до 30% общей массы кориума в модели корпуса.

Фазовый состав фрагментированного кориума был аналогичен составу слитка кориума, но содержал больше оксидных компонентов. Верхний слой фрагментов, представляющий собой продукты деградации верхнего теплового экрана и направляющего конуса, удалялся и был исключен из дальнейшего анализа.

Анализ структуры слитка, особенно вблизи поверхностей плазмотронов, не выявил заметного влияния локального перегрева кориума вблизи плазмотронов на процесс возможного формирования фрагментов кориума с их последующим "всплытием" на поверхность.

Можно уверенно предположить на основании имеющихся результатов, что фрагменты кориума

формируются за счет разбрызгивания струи расплава при ее падении в экспериментальную секцию в силу малой вязкости кориума при высокой температуре.

Можно предположить также, что при сливе расплава кориума в экспериментах INVECOR разбрызгивающийся расплав быстро затвердевал на относительно холодных поверхностях модели корпуса, верхнего теплового экрана и водоохлаждаемых частях плазмотронов в виде мелких частиц и тонких корочек. Затвердевшие частицы затем падали с верхних деталей экспериментальной секции на верхнюю корку поверх кориума и/или вытеснялись расплавом кориума со дна модели корпуса при финальном (относительно спокойном) падении струи.

Наибольшая доля фрагментированного кориума обнаружена в экспериментах с более высокой температурой в зоне взаимодействия "кориум/сталь" и при большей длительности моделирования удержания расплава в корпусе. Внимательное изучение нижнего слоя фрагментов показало, что он сформирован, преимущественно, пластинчатыми обломками. Наиболее вероятно, это фрагменты первичной корки кориума, которая была взломана при нагреве внутреннего объема кориума плазмотронным нагревателем при имитации остаточного тепловыделения. Растрескивание первичной корки может быть вызвано увеличением объема кориума при его повторном нагреве, а также повышением давления газа в закрытых порах внутри объема кориума.

Учитывая, что соотношение масс кориум/сталь может быть изменено за счет уменьшения толщины стенки модели корпуса, условия и/или закономерности формирования фрагментированного слоя может быть исследовано в новых экспериментах.

Литература

- Nagasaka, H., Kato, M., Sakaki, I., Cherepnin, Yu., Vasilyev, Yu., Kolodeshnikov, A., Zhdanov, V. COTELS Project (1): Overview of Project to study FCI and MCCI during a Severe Accident, OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, FZKA6475, 2000, Karlsruhe, Germany, p. 285-292.
- A Study on Concrete Degradation during Molten Core/Concrete Interactions / Yu Maruyama, Y. Kojima, V. Zhdanov, et al. // Nuclear Engineering and Design 236 (2006). - P. 2237–2244.
- 3. Maruyama. Yu, Nagasaka, H.,Zhdanov, V., et al. Results of LHI tests and associated analyses on in-vessel debris coolability, NTHAS3: Third Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety Kyeongju, Korea, October 13 16, 2002.
- Zhdanov V., Baklanov V., Malysheva E. Experimental Study of the Processes at the Corium Melt Retention in the Reactor Pressure Vessel (INVECOR). Proc of 5th Eurasian Conference on Nuclear Sciences and its Application, Ankara, Turkey, October 14-17, 2008.
- Zhdanov, V., Baklanov V., Facility for LWR Core Materials Studies at High Temperature, Proceedings of ICAPP'05 congress, Seoul, KOREA, May 15-19, 2005, paper 5242.
- NUREG/CR-6197 TMI V(93)EG10 EGG-2734, 'TMI-2 Vessel Investigation Project Integration Report" // Prepared by J. R. Wolf, J. L. Rempe, L. A. Stickler, G. E. Korth, D. R. Diercks, L. A. Neimark, D. W. Akers, B. K. Schuetz, T. L. Shearer, S. A. Chavez, G. L. Tbinnes, R. J. Witt, M. L. Corradni, J. A. Kos / Idaho National Engineering Laboratory, March 1994.
- 7. Zhdanov V., Baklanov V., et al., Study of the processes of corium-melt retention in the reactor pressure vessel (INVECOR), Proceedings of ICAPP'11 congress, Nice, France, May 2-5, 2011, paper 11375.
- Бакланов, В.В./ Экспериментальное исследование процессов при удержании расплава кориума в корпусе реактора (INVECOR) В.В.Бакланов, В.С.Жданов, Малышева Е.В.//Вестник НЯЦ РК. – Вып.1.-С.55-65..март 2009.
- Бакланов, В.В./ Поддерживающие эксперименты в обоснование конструкции устройства для моделирования остаточного тепловыделения в проекте INVECOR В.В.Бакланов, В.С.Жданов, и др.//Вестник НЯЦ РК. – Вып.1.- С.66-76.март 2009.

ЖЕҢІЛ СУЛЫ РЕАКТОРДЫҢ КОРПУСЫНДА КОРИУМ БАЛҚЫМАСЫН ҰСТАУДЫ ТӘЖІРИБЕЛІК МОДЕЛЬДЕУДЕ ЖЫЛУ ЖӘНЕ ФИЗИКА-ХИМИЯЛЫҚ ҮДЕРІСТЕРІН ЗЕРТТЕУ (INVECOR ЖОБАСЫ)

¹⁾ Бакланов В.В., ¹⁾ Васильев Ю.С., ²⁾ Жданов В.С., ¹⁾ Колодешников А.А., ¹⁾ Кукушкин И.М., ³⁾ Paul David W. Bottomley, ⁴⁾ Christophe Journeau

¹⁾ ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан ²⁾ Ресей, ИБРАЭ РАН Новосибирск филиалы ³⁾ ІТU,Карлсруэ, Германия ⁴⁾ СЕА Кадараш, Франция

ХҒТО қаржылындырылған INVECOR жобасының аясында 1-2 сағат ішінде плазмалық қыздыруды қолданумен қалдық жылу бөлудің кейінгі еліктеуімен, ВВЭР реактор корпусы түбінің моделіне 1,7 м биіктіктен электр балқыту пешінен құйылатын 60 кг прототипті кориумның балқымасын қолданумен ірі масштабты интегралдық тәжірибелер орындалды. Кориумда меншікті жылу бөлуі, корпус моделінің қабырғасында 1400 °С дейін максималды температурада 6-9 Вт/см³ құрады. Тәжірибелерді дайындау үдерісінде келесі жұмыстар орындалды: кориум балқымасымен түйіспеде болған тәжірибелік қондырғы бөлшектерінің графитті бетіне қорғаныс жабының жағу технологиясын өндеу және оның тиімділігін тексеру; кориум бассейінін есептік моделдеу (қыздыру тиімділігі, жылу ағымы және температураларды үлестіру); коксиалдық плазматрондардың конструкциясын жетілдіру. Ірі масштабты орындалған 4 тәжірибенің әр біреуі корпус моделінің қабырға материалының және кориум үлгілерін пост-тәжірибелік зерттеулермен ілесті. Корпус моделінің түп бетіне кориум балқымасының түсу нәтижесінде тұтас кориумды жабатын фрагменттердің кең қабаты қалыптасатынын талдау көрсетті. Корпустың модель қабырғасының айқын эрозиясы тек бір тәжірибеде модель қабырғасымен кориум балқыма ағыншасының алғашқы түйіспе орынында белгіленді.

RESEARCH OF THERMAL AND PHYSICOCHEMICAL PROCESSES DURING EXPERIMENTAL DESIGNING OF CORIUM MELT RETENTION IN THE LIGHT WATER REACTOR VESSEL (INVECOR PROJECT)

¹⁾ V.V. Baklanov, ¹⁾ Yu.S. Vasiliev, ²⁾ V.S. Zhdanov, ¹⁾ A.A. Kolodeshnikov, ¹⁾ I.M. Kukushkin, ³⁾ Paul David W. Bottomley, ⁴⁾ Christophe Journeau

¹⁾ Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
 ²⁾ Novosibirsk Branch of the Nuclear Safety Institute RAS, Russia
 ³⁾ ITU, Karlsruhe, Germany
 ⁴⁾ CEA Cadarache, France

Within the framework of the ISTC-funded project INVECOR the integral large-scale experiments have been performed using up to 60 kg of prototypic corium melt discharged from the electric melting furnace at a height of 1,7 m into a model of reactor power vessel (RPV) of the VVER reactor followed by simulation of residual heat using plasmatron heating of corium for 1-2 hours. Specific power release in corium was 6-9 W·cm⁻³ and the maximum temperature of the RPV wall was up to 1400°C. The following has been achieved during experiments' preparation: Protective coatings on the graphite items of the experimental facility contacting with molten corium has been further developed and corium efficiency has been inspected; calculated simulation of corium pool (heat efficiency, thermal flux and temperature distribution) has been made; coaxial plasmatron structure has been improved. Each of four conducted large-scale experiments was accompanied by post-test examinations of corium samples and RPV wall material. The analyses showed molten corium dropped down the RPV bottom and led to formation of an extensive layer of fragments. The only one experiment showed visible erosion of the RPV wall at the site of initial contact of corium jet with the wall.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ

Колодешников А.А., Зуев В.А., Игнашев В.И., Соколов И.А., Туленбергенов Т.Р.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Дано описание плазменно-пучковой установки имитационного стенда. Приведены результаты расчета индукции магнитного поля по длине установки. Определены характеристики электронно-лучевой пушки при генерации электронного пучка. Представлены результаты предварительного эксперимента по облучению графитовой мишени электронным пучком.

Введение

Интерес к моделированию взаимодействия плазмы термоядерных установок с веществом на относительно простых имитационных стендах с генераторами газоразрядной плазмы возник в начале восьмидесятых годов прошлого века. С помощью ионнопучковых установок были получены основные представления об элементарных процессах, происходящих под действием ионов на поверхности твердого тела, таких, как распыление материала, захват и отражение от него частиц. Исследование взаимодействия потоков плазмы с конструкционными материалами ИТЭР в настоящее время продолжается как на действующих токамаках, так и на специализированных установках.

Создание специализированных установок и стендов для получения надежной базы данных для материалов и покрытий, контактирующих с плазмой элементов термоядерных установок, является весьма актуальным. В созданной имитационной плазменнопучковой установке (ППУ) плазменный пучок может поддерживаться в течение длительного времени. Использование этой установки в комплексе с Казахстанским материаловедческим токамаком (КТМ) позволит оперативно получить экспериментальную информацию, так как имитационный стенд с ППУ является универсальным и обладает возможностью быстрой переналадки плазменно-пучковой установки для решения разнообразных специализированных задач.

Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой предназначен для проведения следующих исследовательских работ:

- получение плазмы заданных параметров; отработка методов управления плазмой и диагностики параметров плазмы;
- испытание малогабаритных образцов материалов (с площадью исследуемой поверхности до 4 см²) в условиях их взаимодействия с плазмой;
- исследование распыления исследуемых материалов для создания многокомпонентных слоев;
- тепловых испытаний электронным пучком с плотностью мощности до 50 MBт/м².

Описание установки

Основными элементами плазменно-пучковой установки являются электронная пушка (плазмогенератор), камера плазменно-пучкового разряда (ППР), камера откачки плазмогенератора, труба откачки плазмогенератора, вакуумная камера взаимодействия, катушки плазмогенератора, мишенное устройство, шлюзовое устройство и камера загрузки. Плазменнопучковая установка обеспечивает получение следующих параметров плазменного потока: диаметр плазменного потока перед мишенью - до 30 мм; напряженность магнитного поля, создаваемая на оси генератора, - 0,1 Тл; напряженность магнитного поля в районе электронно-лучевой пушки (ЭЛП) – примерно 0,2 Тл; величина тока в плазме – около 1 А; плотность плазмы в пучке – до 10¹³ 1/м³; электронная температура плазмы – до 30 эВ.

Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда показан на рисунке 1. В прогреваемой камере взаимодействия, возможно, получить сверхвысокий предельный вакуум порядка 10⁻⁸ торр. В качестве камеры взаимодействия в составе имитационного стенда использована специально разработанная сверхвысоковакуумная камера с удобными для реализации исследовательских и испытательных функций стенда фланцами, пригодными для монтажа вакуумных агрегатов, плазменного генератора, загрузочного устройства, диагностических приборов. В камере располагаются мишенные устройства. Для экспериментов могут быть использованы как неохлаждаемые, так и охлаждаемые мишени.

Функционирование имитационного стенда обеспечивается следующими системами:

- вакуумной системой (системой откачки) и системой напуска газов в камеру плазменно-пучкового разряда;
- электрической системой (для подачи напряжения устройствам и механизмам, входящим в состав стенда, таким, как плазмогенератор, электромагнитная система, насосы вакуумной системы и др.);
- системой охлаждения элементов стенда водой;
- системой охлаждения сорбционно-геттерного насоса жидким азотом;
- системой подачи азота на управление агрегатами стенда.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ



1 – коллектор системы охлаждения; 2 – форвакуумный насос SH-100; 3 – турбомолекулярный насос TMU262; 4 – камера откачки электронно-лучевой пушки; 5 – электронно-лучевая пушка; 6 – большая электромагнитная катушка; 7 – камера ППР; 8 – блоки питания электронной пушки; 9 – малая электромагнитная катушка; 10 – камера взаимодействия; 11 – масс-спектрометр; 12 – камера загрузки образцов; 13 – блок питания катушки магнитного поля; 14 – регулятор температуры; 15 – сублимационный насос; 16 – турбомолекулярный насос TMU521.

Рисунок 1. Общий вид плазменно-пучковой установки имитационного стенда

Определение параметров магнитного поля в ППУ

Для фокусировки электронного пучка (или плазменного шнура) используется комплект из восьми электромагнитных катушек. Конструктивная схема камеры ППР с электромагнитными катушками приведена на рисунке 2. Основной технической характеристикой комплекта электромагнитных катушек является создаваемая им в камере ППР напряженность магнитного поля. Было проведено расчетное и экспериментальное определение параметров магнитного поля, создаваемого электромагнитными катушками. Расчетные и экспериментальные значения индукции магнитного поля практически совпали (отклонение менее 5 %).



проставка охлаждаемая для крепежа диафрагмы; 2 – крест 1; 3 – катушка большая с креплением 1; 4 – труба охлаждаемая; 5 – катушка малая 1; 6 – катушка малая 2; 7 – катушка малая 3; 8 – катушка малая 4; 9 – катушка малая 5; 10 шпилька M6; 11 – катушка большая с креплением 2; 12 – крест 2; 13 - большая катушка; 14 – цанга; 15 – шпилька M8×1×60 с гайками M8×1; 16 – кольцо монтажное; 17 – кольцо прижимное.



Индукция магнитного поля *j*-того ряда витков (j = 1, ..., 6) *i*-той (i = 1, ..., 8) электромагнитной катушки Aij(h) определялась по формуле

$$Aij(h) = \sum_{\alpha=1}^{n} \frac{\mu_0 \cdot I \cdot r_{\alpha}^2}{2 \cdot \left[r_{\alpha}^2 + (h - L_i - h_j)^2\right]}$$

где μ_0 – магнитная постоянная,

 $\mu_0 = 1,257 \times 10^{-6} \text{T}_{\text{J}} \times \text{M/A};$

I – ток в витке катушки, А;

*г*_α − радиус витка, м;

h – расстояние от катода электронной пушки до сечения, в котором рассчитывается индукция магнитного поля, м;

 L_i – расстояние от катода электронной пушки до края катушки (*i* = 1,..., 8), м;

 h_{j} расстояние от края катушки до середины ряда витков (j = 1, ..., 6), м.

Радиус витка r_{α} увеличивается от 0,065 м на величину, равную толщине провода 0,0025 м

 $r_{\alpha} = 0,065 + 0,0025 \cdot (\alpha - 1), \ \alpha = 1,...,n$

где *n* – число витков в катушке, *n* = 14 (для малой катушки), 34 (для большой катушки).

Каждая катушка состоит из шести рядов витков. Толщина катушки равна 0,0795 м.

Для нахождения индукции магнитного поля каждой *i*-той катушки суммируются индукции магнитного поля всех рядов витков

$$Ai(h) = \sum_{j=1}^{6} Aij(h)$$

Аналогично рассчитывалась индукция магнитного поля для остальных семи электромагнитных катушек.

Для получения индукции магнитного поля всей системы электромагнитных катушек необходимо просуммировать индукцию магнитного поля всех катушек

$$A(h) = \sum_{i=1}^{8} Ai(h) \, .$$

Расчет выполнен при значениях тока в витках катушки равных: 167 А – в малой катушке, 133 А – в большой катушке.

На рисунке 3 приведена расчетная максимальная величина индукции магнитного поля для каждой из восьми катушек. Из данных, приведенных на рисунке 3, видно, что максимальная величина индукции магнитного поля больших катушек составляет 0,156 тесла, а малых катушек – 0,0979 тесла.

На рисунке 3 также показано изменение индукции магнитного поля электромагнитной системы имитационного стенда в зависимости от расстояния от катода электронной пушки (для каждой катушки в отдельности и суммарная) Максимальная величина индукции магнитного поля равна 0,172 тесла. Минимальное расчетное значение величины индукции в камере плазменно-пучкового разряда составило 0,125 тесла. Минимальное значение индукции магнитного поля в камере взаимодействия, равное 0,0155 тесла, определено в районе размещения мишени. Минимальная величина индукции магнитного поля у катода электронной пушки составила 0,0108 тесла.



Рисунок 3. Распределение индукции магнитного поля по длине установки

Определение характеристик электронной пушки

Эксперименты по определению характеристик электронной пушки были выполнены на плазменнопучковой установке при следующих параметрах:

- давление в камере откачки ЭЛП, торр1×10⁻⁶;
- давление в камере плазменно-пучкового разряда (ППР), торр1×10⁻⁷;
- давление в камере взаимодействия, торр....1×10⁻⁷;
 значение тока подаваемого
- подогревательного узла (КПУ), А 13,7; - значение напряжения
- электронного нагрева, В750;

Предварительное вакуумирование рабочей полости ППУ (до уровня давления в тракте форвакуумной откачки 10⁻³ торр) проводилось при помощи форвакуумного насоса Varian SH-110. Рабочее давление в камере откачки ЭЛП достигалось с помощью турбомолекулярного насоса Pfeiffer TMU 262, а в камере ППР и в камере взаимодействия – с помощью турбомолекулярного насоса Pfeiffer TMU 521P. Измерение давления в процессе вакуумирования осуществлялось с помощью форвакуумного датчика TPR 280.

В ходе проведения наладочных испытаний были определены вольт-амперные характеристики (BAX) катодно-подогреваемого узла: тока электронного нагрева (Ікпу) в зависимости от напряжения электронного нагрева Uкпу и от мощности нагрева спирали прямонакального катода как параметра. Вид BAX КПУ показан на рисунке 4.

Была определена вольт-амперная характеристика электронной пушки – зависимость тока эмиссии катода-таблетки от основного ускоряющего напряжения пушки I(U). Вид ВАХ ЭЛП показан на рисунке 5.

По ВАХ ЭЛП определен первеанс в зависимости от ускоряющего напряжения пушки (показан на рисунке 6), который является мерой интенсивности электронного потока (первеанс рассчитывается как отношение тока пучка I к ускоряющему напряжению U в степени 3/2). Мощными считаются пучки с микропервеансом выше 0,01-0,1 мкА/В^{3/2} [1]. На рисунке 6 также показана мощность потока, которая равна произведению ускоряющего напряжения на ток.



Рисунок 4. Вольтамперная характеристика катодно-подогреваемого узла (КПУ)



Рисунок 5. Вольтамперная характеристика электронно-лучевой пушки (ЭЛП)



Рисунок 6. Первеанс электронной пушки и мощность потока электронов

Эксперимент с графитовой мишенью

После определения характеристик электронной пушки, был проведен эксперимент с облучением пучком электронов графитовой мишени, размещенной в камере взаимодействия ППУ.

Мишень представляла собой цилиндр (диаметр 94 мм и толщина 20 мм), изготовленный из графита и установленный на стальной подложке. На графитовую мишень были установлены три термопары. Термопары были размещены на расстоянии 25 мм от центральной оси мишени. Термопары 1 и 3 измеряли температуру на расстоянии, соответственно, 3 и 10 мм от поверхности мишени обращенной к электронному пучку, а термопара 2 измеряла температуру противоположной поверхности мишени. Вид мишени с установленными термопарами показан на рисунке 7.

В процессе эксперимента в камере плазменнопучкового разряда средняя величина индукции магнитного поля составляла 0,08 Тл (на электромагнитные катушки подавался ток 250 А). В районе мишени величина индукции магнитного поля не превышала 0,01 Тл.

Изменение некоторых зарегистрированных в процессе эксперимента параметров приведено на рисунке 8. В процессе экспериментов мощность электронного пучка достигала 1 кВт. На рисунке 8 показано, что температура графитовой мишени в месте установки термопар увеличивалась до 750 °C.



шток крепления мишени; 2 – подложка мишени (сталь 12X18H10T);
 3 – термопара 1; 4 – термопара 3; 5 – термопара 2;
 6 – боковая поверхность графитовой мишени.

Рисунок 7. Графитовая мишень

Внешний вид графитовой мишени после эксперимента показан на рисунке 9. Видно, что в результате бомбардировки мишени электронным пучком в мишени образовалась каверна глубиной ~1,5 мм. Расстояние от центра графитовой мишени до центра каверны равно примерно 11 мм. Диаметр каверны составляет около 2 мм. Поскольку часть графита испарилась (или сублимировалось) из образовавшейся в мишени каверны, можно предполагать, что локальная температура в месте контакта электронного пучка с поверхностью графитовой мишени была не менее 4000 °C [2].



Рисунок 8. Изменение параметров установки в процессе эксперимента

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ



а) общий вид мишени

б) каверна на мишени

1 – защита мишени; 2 – центр мишени; 3 – каверна, выбитая электронами; 4 – граница пучка электронов.

Рисунок 9. Состояние графитовой мишени после эксперимента

Выводы

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

– определены характеристики фокусирующего магнитного поля электромагнитных катушек установки. Определен ток питания электромагнитных катушек равный 250 А, при котором средняя величина индукции магнитного поля в камере плазменно-пучкового разряда составляет 0,08 Тл; отработан запуск плазменно-пучковой установки в режиме генерации электронного пучка;

 определены вольт-амперные характеристики катодно-подогреваемого узла и электронно-лучевой пушки; получен поток электронов мощностью до 1 кВт;

 выполнен эксперимент с облучением электронным потоком графитовой мишени, в котором получена заметная эрозия поверхности мишени при воздействии на нее электронного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. И.В. Алямовский, Электронные пучки и электронные пушки. Изд. «Советское радио», М., 1966. 456 с.
- 2. В.С. Чиркин, Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. Атомиздат, М., 1967. 484 с.

ПЛАЗМАЛЫ-ШОҚ ҚОНДЫРҒЫ ПАРАМЕТРЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Колодешников А.А., Зуев В.А., Игнашев В.И., Соколов И.А., Туленбергенов Т.Р.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Еліктеулі стендтің плазмалы-шоқ қондырғысының сипаттауы берілді. Қондырғы ұзындығы бойынша магниттік өріс индукциясын есептеу нәтижелері келтірілді. Электрондық шоқ тың генерациясында электронды-сәулелі зеңбіректің сипаттамалары анықталды. Электрондық шоқпен графиттік нысананы сәулелендіру бойынша алғашқы тәжірибенің нәтижелері ұсынылды.

RESEARCH OF THE PLASMA-BEAM FACILITY'S PARAMETERS

A.A. Kolodeshnikov, V.A. Zuev, V.I. Ignashov, I.A. Sokolov, T.R. Tulenbergenov

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

A description of the simulation stand plasma-beam facility is given. The results of the magnetic field induction calculation are presented. E-beam projector characteristics under the electron beam generation are determined. The results of a preliminary experiment on a graphite target irradiation by an electron beam are presented.

УДК 621.039.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ

Витюк В.А., Вурим А.Д., Пахниц А.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Имитационные испытания TBC энергетических реакторов в импульсных исследовательских реакторах позволяют реализовывать экспериментальные программы, направленные на получение информации о быстропротекающих физических и тепловых процессах, поведении топлива в переходных и аварийных режимах.

Важной задачей при проведении реакторных испытаний ТВС в импульсных режимах является определение энергетических параметров экспериментов (мощность и энерговыделение в топливе), которые необходимы как для правильной интерпретации их результатов, так и для повышения точности реализации заданного энерговыделения.

Одним из вариантов решения этой задачи является применение методики, основанной на установлении зависимостей между энергетическими и теплофизическими параметрами ТВС. Основным достоинством такого подхода является то, что оперативная оценка термического состояния ТВС может быть выполнена практически при любом уровне облучения, не приводящем к разрушению конструкции сборки и средств измерения параметров.

Введение

Импульсные исследовательские реакторы являются наиболее подходящим инструментом для реанаучно-исследовательских лизации программ. направленных на получение экспериментальной информации о быстропротекающих физических и тепловых процессах в ядерных реакторах, поведении топлива и конструкционных материалов активных зон ядерных энергетических установок в переходных и аварийных режимах. При проведении экспериментов в реакторных условиях может быть достигнуто максимальное приближение к реальным эксплуатационным режимам, и установлены параметры и механизмы поведения топлива в тех случаях, когда аналитические модели не позволяют получить правильного прогноза о направлении и количественных характеристиках развития эксплуатационной ситуации.

Важной задачей реакторных исследований является определение энергетических параметров экспериментов (мощность и энерговыделение в топливе экспериментального устройства), которые необходимы как для правильной интерпретации их результатов, так и для повышения точности реализации заданного энерговыделения. В настоящей работе представлено описание методики определения энергетических параметров испытуемых сборок в экспериментах в импульсном реакторе ИГР, основанной на решении уравнений теплового баланса для квазирегулярного режима теплообмена и установлении связи между теплофизическими и энергетическими параметрами модельных ТВС, и результаты расчетно-экспериментальных исследований по ее обоснованию.

1 Описание экспериментов

Экспериментальные исследования в обоснование теплофизического метода были выполнены на реакторе ИГР [1] в рамках методического этапа испытаний с экспериментальным устройством, предназначенным для изучения поведения модельных ТВС типа ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих заключительную фазу аварии с потерей теплоносителя.

Методический этап испытаний проводился с целью получения экспериментальных данных, необходимых для выбора и обоснования режимов испытаний исследовательского этапа. При этом в качестве основной была поставлена задача экспериментального определения энергетических параметров модельной ТВС в реакторных пусках с применением результатов измерения теплофизических параметров экспериментов.

Основным элементом устройства являлась сборка из 18 твэлов типа BBЭP-1000 с длиной активной части 800 мм (рисунок 1). Твэлы располагались по равносторонней треугольной решетке с шагом 12,75 мм. Сборка имела одну опорную и четыре дистанционирующие решетки и заключалась в шестигранный чехол, окруженный теплоизоляцией для уменьшения утечек тепла и выравнивания поля температуры по сечению ТВС. Охлаждение ТВС осуществлялось гелием и водяным паром.

В процессе проведения экспериментов регистрировались показания термопар, установленных в ТВС (рисунок 2). Кроме того, регистрировалась температура на входе и выходе тракта охлаждения ТВС и температура поверхности чехла ТВС.

В рамках методической серии на реакторе ИГР были проведены три эксперимента (таблица 1).



 твэл, 2 – центральная труба, 3 – дистанционирующая решетка, 4 – шестигранный чехол, 5 – теплоизолирующий пакет, 6 – корпус модельной сборки

Рисунок 1. Схема ТВС



Рисунок 2. Схема расстановки термопар (ТЭП) в ТВС

Таблица 1. Основные параметры реактора ИГР при проведении экспериментов

Номер экспе- римента	Режим ра- боты реак- тора	Энерговыделение в активной зоне реакто- ра, МДж
1	импульс	43
2	импульс	81
3	импульс	105

2 Определение энергетических параметров ТВС

2.1 Основы теплофизического метода

В основе теплофизического метода определения энергетических параметров испытуемых сборок в экспериментах в импульсном реакторе лежит решение уравнения теплового баланса. При проведении испытаний ТВС в импульсном режиме искомой характеристикой импульса является пиковое значение мощности. Рассмотрим баланс тепла для элементарного объема твэла v высотой Δz , расположенного в окрестности некоторой произвольной точки между двумя перпендикулярными оси ТВС плоскостями. В общем виде

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{m} Q_i , \qquad (1)$$

где *т* – количество конструкционных элементов;

 Q_{Σ} – суммарное количество тепла, выделившегося в объеме топлива v_{l} за интервал времени τ , Дж:

$$Q_{\Sigma} = \int_{v} \int_{0}^{\tau} q_{v}(\tau) dv \cdot d\tau ; \qquad (2)$$

Q_i – количество тепла, затраченное на разогрев *i*ого конструктивного элемента ТВС, Дж:

$$Q_{i} = \int_{v_{i}} \int_{0}^{\tau} \rho_{i} c_{i} \cdot \frac{\partial T_{i}}{\partial \tau} \cdot dv_{i} \cdot d\tau , \qquad (3)$$

где q_v – объемная плотность энерговыделения в топливе, BT/M^3 ;

 v_i – элементарный объем *i*-ого элемента, м³;

 ρ_i – плотность материала *i*-ого элемента, кг/м³;

c_i – удельная теплоемкость материала *i*-ого элемента, Дж/(кг·К),

T_i – температура *i*-ого элемента, К.

Объемная плотность энерговыделения в топливе может быть выражена соотношением

$$q_{v}(\tau) = K_{r} \cdot K_{z} \cdot \frac{N(\tau)}{V} = K_{r} \cdot K_{z} \cdot \frac{N_{m}}{V} \cdot n(\tau), \quad (4)$$

где K_r , K_z – значение радиального и высотного коэффициента неравномерности энерговыделения в рассматриваемом объеме;

V – объем топлива в ТВС, м³;

 $n(\tau)$ – безразмерная функция мощности,

$$n(\tau) = \frac{N(\tau)}{N_m};$$

 N_m – «пиковое» значение мощности в импульсе, Вт.

Вид функции $n(\tau)$ известен по результатам эксперимента, при этом ее максимальное значение равно единице по условию нормировки.

Двойной интеграл, описывающий тепло, затраченное на разогрев *i*-ого элемента, можно преобразовать к выражению

$$\int_{v_{i}}^{\tau} \rho_{i} \cdot c_{i} \cdot \frac{\partial T_{i}}{\partial \tau} \cdot dv_{i} \cdot d\tau =$$

$$= \rho_{i} \cdot \overline{c}_{i} \cdot v_{i} \cdot (\overline{T}_{i}(\tau) - \overline{T}_{i}(0)) = \rho_{i} \cdot \overline{c}_{i} \cdot v_{i} \cdot \Delta \overline{T}_{i} , \qquad (5)$$

где \overline{c}_i – средняя теплоемкость материала *i*-ого элемента в интервале температур $\overline{T}_i(0)...\overline{T}_i(\tau)$, Дж/(кг·К);

 $\overline{T}_{i}(0), \overline{T}_{i}(\tau)$ – среднемассовая температура *i*-ого элемента в момент времени τ , К.

Выражение (1) можно записать в виде

$$K_r \cdot K_z \cdot \frac{N_m}{V} \cdot v_i \cdot \int_0^r n(\tau) \cdot d\tau = \sum_{i=1}^m \rho_i \cdot \overline{c}_i \cdot v_i \cdot \Delta \overline{T}_i, \quad (6)$$

или, вынося в правой части за знак суммы слагаемое с i = l (относящееся к топливу), получим

$$K_{r} \cdot K_{z} \cdot \frac{N_{m}}{V} \cdot v_{i} \cdot \int_{0}^{\tau} n(\tau) \cdot d\tau =$$

$$= \rho_{1} \cdot \overline{c}_{1} \cdot v_{1} \cdot \Delta \overline{T}_{1} \cdot \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{\rho_{i} \cdot \overline{c}_{i} \cdot v_{i}}{\rho_{1} \cdot \overline{c}_{1} \cdot v_{1}} \cdot \frac{\Delta \overline{T}_{i}}{\Delta \overline{T}_{1}} \right).$$
(7)

Выполнив замену $v_i/v_l = F_i/F_l$, где F_i - площадь поперечного сечения *i*-ого элемента TBC, для пикового значения мощности TBC получим соотношение

$$N_{m} = \frac{m_{1} \cdot \overline{c}_{1} \cdot \Delta \overline{T}_{1}}{K_{r} \cdot K_{z} \cdot \int_{0}^{\tau} n(\tau) \cdot d(\tau)} \left(\sum_{i=1}^{m} \phi_{i} \cdot \theta_{i} \right), \qquad (8)$$

где $m_l = \rho_l \cdot V_l$ – масса топлива в TBC, кг;

 $\phi_i = \frac{\rho_i \cdot \overline{c}_i \cdot F_i}{\rho_1 \cdot \overline{c}_1 \cdot F_1}$ – относительная теплоемкость *i*-

ого элемента;

 $\theta_i = \frac{\Delta \overline{T_i}}{\Delta \overline{T_1}}$ – относительная температура *i*-ого эле-

мента.

Если в некоторый момент времени $\tau \ \theta << 1$ для $i \ge 3$, то расчет пикового значения мощности N_m можно проводить по первым двум слагаемым соотношения (8). При этом $\Delta \overline{T}_1$ и $\Delta \overline{T}_2$ следует определять по показаниям датчиков температуры (термопар), установленных в твэле на одной высоте, т.е.

$$N_m = \frac{m_1 \cdot \overline{c}_1}{K_r \cdot K_z \cdot Y} \Big(\Delta \overline{T}_1 + \phi_2 \cdot \Delta \overline{T}_2 \Big), \tag{9}$$

где Y – интеграл безразмерной мощности вспышки, равный

$$Y = \int_0^\tau n(\tau) d\tau = \int_0^\tau \frac{N(\tau)}{N_m} d\tau = \int_0^\tau \frac{I(\tau)}{I_m} d\tau ,$$

где $N(\tau)$ и N_m – текущее и максимальное значение мощности реактора, Вт;

 $I(\tau)$ и I_m – текущее и максимальное значение показаний токовой камеры реактора, А. Усреднив значения по каждой паре термопар, получим оценку пикового значения мощности:

$$\bar{N}_{m} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} N_{mj} , \qquad (10)$$

где N_{mj} – рассчитанное по формуле (8) по показаниям *j*-ой пары термопар значение, Вт;

n – количество пар термопар.

Оценку суммарного энерговыделения в импульсе можно выполнить по формуле:

$$Q_{\Sigma} = N_m \cdot \int_0^\tau n(\tau) d(\tau) = \frac{m_1 \cdot \overline{c_1} \cdot \Delta \overline{T_1}}{K_r^m \cdot K_z^m} (1 + \phi_2 \cdot \theta_2) \quad (11)$$

При определении энергетических характеристик ТВС в импульсе по выражениям (9) и (11) не будут учтены составляющие, связанные с передачей тепла от твэла к окружающим конструкционным материалам и теплоносителю. Поэтому, для оценки ошибки расчета необходимо оценить утечки тепла от ТВС за время *т*.

В общем случае утечки тепла от ТВС будут определяться совокупностью всех видов теплообмена (теплопроводностью, конвекцией и излучением) ТВС с окружающей средой, зависеть от конструктивных особенностей экспериментального устройства и от режимов его испытаний.

При наличии принудительного охлаждения, утечки определяются количеством тепла, затраченным на подогрев теплоносителя Q_{m_H} , и количеством тепла, переданным теплоносителем окружающим конструкционным элементам Q_{ok} :

$$Q_{ym} = Q_{mH} + Q_{o\kappa} \tag{12}$$

где

$$Q_{mn} = \int_{t_0}^{t_{max}} N_{mn} dt$$
 (13)

где t_{max} — время, соответствующее моменту достижения максимального значения температуры топлива, с;

 t_0 – время, соответствующее моменту начала реализации диаграммы энерговыделения в топливе, с;

N- тепловая мощность, отводимая теплоносителем от TBC, Вт:

$$N_{mH} = G \cdot C_p \cdot (T_{GLX}(\mathbf{t}) - T_{GX}), \qquad (14)$$

где G – расход теплоносителя через TBC, кг/с;

 C_p – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);

 $T_{GBAX}(t)$ – температура теплоносителя на выходе из ТВС, в момент времени *t*, K;

 $T_{\rm ex}$ – температура теплоносителя на входе в ТВС, К;

$$Q_{o\kappa} = \sum_{n=1}^{k} m_n c_{pn} \Delta T_n \tag{15}$$

где *m_n* – масса *n*-го конструкционного элемента, кг;

*c*_{*pn*} – теплоемкость *n*-го конструкционного элемента, Дж/(кг.К);

 ΔT_n – изменение температуры *n*-го конструкционного элемента за время τ , K;

k – количество конструкционных элементов, контактирующих с теплоносителем.

Утечки тепла от ТВС тепловым излучением могут быть рассчитаны по формуле [2]:

$$Q_{\pi} = C_{1-2} \cdot \phi \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (16)$$

где Q_n – количество теплоты, передаваемой в единицу времени, Вт;

F – площадь поверхности излучения, м²;

 C_{1-2} – коэффициент излучения, Вт/(м² K⁴);

 T_{I} – температура поверхности более нагретого тела, К;

 T_2 – температура поверхности менее нагретого тела, К;

φ – угловой коэффициент.

2.2 Основные результаты

Результаты измерения температуры твэлов (в первом и втором экспериментах начальная температура твэлов составляла $T_{0,1}=T_{0,2}=19$ °C) и определения энергетических характеристик ТВС в экспериментах теплофизическим методом приведены в таблице 2 с указанием стандартного отклонения среднего для соответствующего количества измерений.

В таблице 3 приведены основные составляющие и общая погрешность расчета пиковой мощности в экспериментах по выражению (9).

Таблица	2. Pe	гзультаты	расчета	сумма	рного з	энерговь	іделения	и мои	іности	TBC
,		~	1	~	/				,	

Номер эксперимента					1		2			3					
i	№ твэла	k _r	Z, MM	kz	T₁, ℃	T₂, ⁰C	Q _{твс} , қДж	T₁, ℃	T₂, ⁰C	Q _{твс} , кДж	T _{0,1} , ℃	T₁, ⁰C	T _{0,2} , ℃	T₂, ⁰C	Q _{твс} , қДж
1	2	0,915	200	1,057	265	169	496	470	344	945	122	637	125	604	1134
2	14	1,024	200	1,057	273	147	445	507	310	877	115	707	106	492	1081
11	18	1,024	750	0,897	235	227	497	420	410	937	119	597	119	568	1110
Коли на ра	чество тепл азогрев твэл	іа, затрачі іов, кДж	енное		504±9		950±15		1134±30						
Утеч	ки тепла, кД	ļж				41			82		34				
Энер	говыделени	ие в ТВС,	кДж		545±11			1030±18		1168±30					
Макс	имальная м	ющность	ТВС, кВт			530±1	1		1065±1	18			44±1		

Таблица 3. Составляющие и суммарная погрешность расчета пиковой мощности

Параметр	Значение
Погрешность измерения температуры топлива и оболочек твэлов (ε _τ)	0,8 %
Погрешность определения коэффициентов радиального и высотного коэффициента неравномерности энерговыделения по объему ТВС (εκ. εκ.)	3 %
Погрешность показаний ионизационных камер реактора (εγ)	2,5 %
Суммарная погрешность расчета пиковой мощности (<i>ε</i> _N)	4,4 %

Заключение

Представленные основы теплофизического метода позволили установить зависимости, необходимые для расчета энергетических характеристик модельных ТВС при проведении импульсных испытаний на реакторе ИГР. Метод опробован в серии из трех реакторных экспериментов. Продемонстрировано, что энергетические характеристики ТВС в импульсных испытаниях могут быть определены с использованием результатов измерений теплофизических параметров, при этом погрешность расчета искомой характеристики импульса - пиковой мощности ТВС не превышает 4,5% (без учета тепловых потерь). На момент окончания импульса мощности ТВС величина общих утечек тепла от ТВС составляет <8 % от суммарного энерговыделения, следовательно, ошибка определения пикового значения мощности для

реализованных импульсов не превышает 8% и может быть уменьшена путем улучшения теплоизоляции или вакуумирования полости ТВС на время эксперимента.

Применение теплофизического метода позволило оперативно решить задачу определения энергетических параметров модельной ТВС и установить связь между энергетическими параметрами испытуемой ТВС и реактора для последующего обоснования режимов испытаний исследовательского этапа. Основным достоинством предложенного подхода является то, что связь между энергетическими параметрами испытуемой ТВС и реактора может быть установлена для любых уровней энерговыделения, не приводящих к разрушению ТВС и средств измерения теплофизических параметров.

Литература

- 1. Курчатов И.В., Фейнберг С.М., Доллежаль Н.А. Импульсный графитовый реактор ИГР // Атомная энергия. 1964. Т. 17, № 6. С. 463-474.
- Уонг Х., Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. // Справочник. М: Атом-издат, 1979. – 216 с.

ИМПУЛЬСТІК РЕАКТОРДАҒЫ ТӘЖІРИБЕЛЕРДЕ ЖЫЛУ ФИЗИКАЛЫҚ ӘДІСІМЕН ОТЫН ЖИНАҒЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ПАРАМЕРЛАРЫН АНЫҚТАУ

Витюк В.А., Вурим А.Д., Пахниц А.В.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Импульстік зерттеу реакторларында энрегетикалық реакторлардың ЖШЖ еліктеу сынақтары, жылдам өтетін физикалық және жылу үдерістер, ауыспалы және апат режімдерінде отынның жағдайы туралы ақпаратты алуға бағытталған тәжірибелік бағдарламаларды жүзеге асыруға рұқсат береді.

Импульстік режімдерде ЖШЖ реакторлық сынақтарды жүргізуде маңызды міндеті, қалай олардың нәтижелерін дұрыс түсіндіру үшін, солай берілген энергияны бөлуді жүзеге асыру дәлдігін арттыру үшін қажет болатын тәжірибелердің (қуат және отында энергияны бөлу) энергетикалық параметрларын анықтау.

Осы міндетті шешу нұсқаларының бірі ЖШЖ энергетикалық және жылу физикалық парамерларының арасында тәуелділікті белгілеуге негізделген әдістемені қолдану болады. Осындай тәсілдің негізгі құны ЖШЖ термиялық жағдайын жедел бағалау, параметрларды анықтау құралы мен жинақ конструкциясын бұзылуына келтірмейтін, сәулелендірудің әр деңгейінде орындалуы мүмкін болады.

DETERMINATION OF THE FUEL ASSEMBLIES ENERGY PARAMETERS BY THERMOPHYSICAL METHOD IN EXPERIMENTS IN PULSE REACTOR

V.A. Vityuk, A.D. Vurim, A.V. Pakhnits

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Simulation tests of the power reactors FA (fuel assemblies) in the pulse research reactors allow the implementation of experimental programmes, to obtain information about the physical and fast thermal processes, fuel behaviour in transient and accident conditions.

An important task during reactor tests of FA in the pulse modes is to determine the energy parameters of experiments (the power and the energy in the fuel) that are necessary for a correct interpretation of the results, and to improve the accuracy of a given energy implementation.

One of the solutions of this task is the use of the technique based on the establishment of relationships between energy and thermal parameters of the fuel assembly. The main advantage of this approach is that a rapid assessment of the assembly thermal state can be made in virtually any level of exposure, which does not lead to the destruction of the assembly construction and measuring parameters means.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ УСТАНОВКИ ПОЛУЧЕНИЯ ХЛОРИДА БЕРИЛЛИЯ

Котов В.М., Супрунов В.И., Бакланова Ю.Ю., Витюк Г.А., Сураев А.С.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе рассматривается возможность химической переработки облученного бериллия методом «сухой» очистки. Метод основан на взаимодействии облученного бериллия с хлором. Основа метода очистки хлорида бериллия от хлорида кобальта и хлорида трития заключена в различии температур их фазовых переходов, что приводит к необходимости поддержания заданных температурных режимов различных узлов установки.

Эта технология, в отличие от других методов, имеет лучшую степень очистки и меньшее количество вредных отходов. Для реализации данного проекта сконструирована установка, позволяющая в циклическом режиме переработать до 1 кг облученного бериллия за небольшой промежуток времени. Основным преимуществом данного технологического процесса является возможность его реализации в промышленных масштабах.

Введение

В ходе переработки облученного бериллия сухим методом бериллий и его примеси перерабатываются в хлориды [1]. Основа метода очистки хлорида бериллия от хлорида кобальта и хлорида трития заключена в различии температур их фазовых переходов, что приводит к необходимости поддержания заданных температурных режимов различных узлов установки.

Хлоратор

Хлоратор является входным агрегатом установки переработки и очистки облученного бериллия. В хлораторе проводится взаимодействие бериллия (основной компонент) с хлором. Эта реакция осуществляется в замкнутом объеме хлоратора периодически, что позволяет контролировать ход реакции, ее полноту и, тем самым, обеспечивать стабильность и безопасность остальных процессов технологии.

Хлоратор образован двумя горизонтальными и двумя вертикальными трубами, образующими общий контур. В нижней трубе размещается облученный бериллий. В нижней части одной из вертикальных труб установлен нагреватель, в верхней части другой вертикальной трубы установлен холодильник. Работа нагревателя и холодильника обеспечивает циркуляцию газа в контуре хлоратора. Функциональная схема установки представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Функциональная схема установки получения хлорида бериллия

Требуемая температура в месте установки бериллия устанавливается на уровне 1000 К, что обеспечивает эффективное проведение реакции взаимодействия хлора с бериллием и газообразное состояние хлоридов бериллия, кобальта и трития. Требуемое изменение температуры газа при прохождении участков нагревателя и холодильника 100-200 К.

Проведены расчеты температурных полей в полости хлоратора и полей скоростей в стационарных режимах, отличающихся средним значением температуры газа, его давлением и мощностями нагревателя и холодильника [2, 3]. Расчеты проводились с использованием программы [4].

На рисунке 2 представлено изменение скорости хлора по длине хлоратора для двух значений давления хлора. Изменение температуры для этих же вариантов представлено на рисунке 5. В данных расчетах было принято, что энерговыделение за счет реакции хлора с бериллием отсутствует, а начальная температура газового потока (в нижней точке нагревателя) в обоих вариантах одинакова.

Видно, что в данных условиях при длине контура хлоратора 6 метров время обращения газа в цикле близко к 9 секундам.

Средняя температура газа в полости хлоратора определяется разницей мощностей нагревателя и холодильника и термо сопротивлением теплоизоляции хлоратора. При учете мощности, выделяемой реакцией взаимодействия хлора с бериллием, поле температур изменяется, повышается среднее значение температуры газа в полости. На рисунке 4 представлены распределения температуры для трех значений энерговыделения в реакции хлора с бериллием в стационарной варианте.



Рисунок 2. Изменение скорости хлора по длине хлоратора. Начальная точка – низ нагревателя



Рисунок 3. Распределение температуры хлора по длине хлоратора


Рисунок 4. Распределение температуры смеси хлора и хлорида бериллия по длине хлоратора при различных значениях энерговыделения в реакции хлора с бериллием

Важным процессом в работе хлоратора является вывод его из холодного состояния в стационарный режим. Отметим две особенности этого процесса.

Желательно, чтобы в ходе разогрева в полости хлоратора находился нейтральный газ, например, аргон. Это обеспечит большую безопасность работы и сохранит исходную пленку окиси бериллия. При нагреве в воздушной среде толщина пленки окиси бериллия может увеличиться, что приведет к ухудшению условий проведения реакции хлора с бериллием.

Желательно обеспечить лучшие условия для прогрева бериллия. Для этого необходимо устано-

вить нагреватель в месте расположения бериллия.

Проведены измерения температуры в различных точках на поверхности труб хлоратора (под слоем теплоизоляции) с помощью термопар и косвенные измерения средней температуры газа в полости хлоратора по показаниям измерителя давления газа. На рисунке 4 представлены наиболее представительные результаты – результаты изменения средней температуры газа в полости. В данном эксперименте хлоратор выполнен из стали 12Х18Н10Т. Толщина стенок хлоратора 3,5 мм, внутренний диаметр труб 50 мм. Изменения мощности нагревателя приведены на рисунке 5.



Рисунок 5. Изменение мощности нагревателя и расчетной средней температуры газа в хлораторе по показаниям измерителя давления в ходе разогрева хлоратора

Как видно из данных рисунка 5, за один час работы нагревателя на мощности 4 кВт происходит нагрев газа до 500 К. Максимальная температура стенки нагревателя близка к этому значению. Температура нагрева бериллия (по оценке) составит в это время ~500 К. Данный уровень нагрева можно считать достаточным для включения в работу хлоратора. При подаче хлора будет происходить рост температуры газа (BeCl₂) так как основная энергия реакции хлора с бериллием будет отбираться продуктом – BeCl₂. В ходе последующих нескольких циклов уровень температуры стабилизируется на требуемом уровне.

Отметим, что на приведенном графике заметно наличие протечек газа из контура. Оно проявляется как снижением температуры (на самом деле давления) после 1.5 часового прогрева при продолжающемся прогреве, так и меньшей температурой (давлением) газа в конце расхолаживания, чем в начале эксперимента. Снижение температуры газа в полости можно было бы объяснить интенсификацией теплообмена газа со стенкой хлоратора за счет улучшения циркуляции газа. Но, в таком случае, давление в конце расхолаживания было бы равно давлению в начале процесса. Заметим, что абсолютная величина протечки газа в данном эксперименте вполне допустима для рабочих условий. За два часа работы хлоратора в стационарном режиме будет проведено около 200-300 циклов. Потери в одном цикле не превысят 0,5 % массы рабочих тел.

Ответственной операцией в рабочем цикле хлоратора является выпуск продуктов реакции хлора с бериллием и примесями в бериллии. Для рационального ведения технологического процесса необходимо чтобы конечная температура газа в цикле была, как указывалось выше, на уровне 1000 К. В ходе выпуска температура газа будет уменьшаться за счет расширения газа. Это создает определенную предпосылку для повышения работоспособности выпускного клапана, но и создает условия для осаждения хлорида бериллия на стенках выпускного тракта. В том числе на поверхностях седла клапана, что может препятствовать его нормальной работе. Для исключения влияния осаждения хлорида бериллия на стенки клапана следует использовать шаровой клапан. Его контактные поверхности в открытом состоянии не подвергаются контакту с проходящим газом.

ФИЛЬТР ХЛОРИДА КОБАЛЬТА

Работа фильтра хлорида кобальта основана на том, что при прохождении потока хлорида бериллия с температурой несколько большей его температуры кипения, но меньшей температуры плавления хлорида кобальта, по магистрали, ограниченной стенками с температурой потока на стенках, на ней будет осаждаться хлорид кобальта, а хлорид бериллия будет проходить беспрепятственно. В таком фильтре степень фильтрации будет расти с увеличением площади поверхности стенок, контактирующих с газом, а также при уменьшении проходного сечения газа. Применяемый в установке фильтр содержит плотную упаковку из 52 никелевых прутков диаметром 6 мм длиной 270 мм. Разрешенный диапазон температур прутков ясен из данных таблицы 1, в которой приведены характеристики фазовых переходов хлоридов бериллия и кобальта [5], а также из приведенных выше условий работы фильтра.

Таблица 1. Характеристики фазовых переходов хлоридов бериллия и кобальта

Вещество	Температура плавления, К	Температура кипения, К
Хлорид бериллия	677	773±20
Хлорид кобальта	997	1322

На рисунке 6 приведена конструкция фильтра хлорида кобальта. Рабочий температурный режим фильтра достигается за счет нагрева его корпуса электрическим омическим нагревателем и установкой поверх нагревателя теплоизоляции.



3 – фланец корпуса фильтра;4 – теплоизоляция; 5 – омический нагреватель; 6 – корпус фильтра; 7 – никелевые прутки

Рисунок 6. Конструкция фильтра хлорида кобальта.

Распределение температуры в никелевых прутках в данной конструкции может меняться при изменении характеристик размещения нагревателя и слоя теплоизоляции по длине корпуса фильтра. Важным для работоспособности данного фильтра является обеспечение допустимой температуры в слое герметизирующей паронитовой прокладки.

Были рассмотрены различные варианты по мощности нагревателя, размещению нити нагревателя и слоя теплоизоляции для выбора удовлетворительных условий работы элементов фильтра. Расчеты температурного поля фильтра проводились с использованием программы [5]. Поле температур варианта удовлетворяющего условиям осаждения хлорида кобальта и работоспособности паронитовой прокладки представлено на рисунке 7.

В конструкции фильтра использован нагреватель с сопротивлением спирали 48,5 Ом. При подаче на него напряжения 220 В выделяется мощность 1 кВт, что больше требуемой стационарной мощности для поддержания поля по рисунку 6. Был проведен расчет изменения в ходе нагрева фильтра средней температуры никелевых прутков и термопары, установленной на фильтре. Результаты представлены на рисунке 8.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ УСТАНОВКИ ПОЛУЧЕНИЯ ХЛОРИДА БЕРИЛЛИЯ



Рисунок 7. Поле температур фильтра хлорида кобальта

Рисунок 8. Изменение температуры контрольной термопары и средней температуры никелевых прутков в ходе разогрева фильтра при мощностях нагревателя 0.5 кВт и 1.0 кВт

Мощность 0.5 кВт легко реализуется при включении в цепь диода. При этой мощности рабочая температура достигается примерно за такое же время (около 1 часа), как и время разогрева хлоратора. При достижении рабочей температуры включается автоматика ее стабилизации.

УЗЕЛ ПОДАЧИ ВОДОРОДА

После прохождения фильтра хлорида кобальта смесь хлорида бериллия и непрореагировавшего хлора поступает на устройство подачи водорода. Подача водорода в данную смесь проводится для достижения двух целей:

- нейтрализовать хлор с тем, чтобы исключить в выбросах экологически опасное вещество;
- создать носитель радиоактивного трития.

Продукт реакции хлора с водородом – соляная кислота (HCl). Тритий, находящийся в смеси с облученным бериллием будет реагировать с хлором образуя H³Cl. Это соединение после введения водорода будет «растворено» в родственной ему соляной кислоте.

При оптимальной работе хлоратора, при контроле содержания хлора в смеси его газов, остаточное содержание хлора будет на уровне 5-10 % от исходного. При емкости хлоратора 12 литров, давлении в полости хлоратора 0.3 МПа, входное количество хлора равно 1.6 моля. При остатке хлора 10 % в реакцию с 0.2 г водорода будет вступать 7.1 г хлора за время выпуска смеси из хлоратора (около 10 с). В данных условиях мощность реакции хлора с водородом составит 1.84 кВт, а разогрев смеси продуктов реакции и хлорида бериллия составит 218 К. Для перевода хлора в соляную кислоту в полном объеме необходимо подавать водород с некоторым избытком, на уровне 110-120 % от стехиометрического количества.

Емкость сбора хлорида бериллия

Смесь хлорида бериллия с соляной кислотой и остатками водорода поступает в емкость сбора хлорида бериллия, представленную на рисунке 9. Температура поступающей смеси 773 К. Требуется охладить смесь так, чтобы хлорид бериллия перешел в жидкое состояние, например, до 700 К. Средняя скорость поступления хлорида бериллия в емкость ~11.5 г/с. Требуемая мощность охлаждения составляет 950 Вт.

При температуре стенки емкости сбора хлорида бериллия 700 К рассеиваемая только за счет теплового излучения мощность составляет ~ 4.1 кВт.

Охлаждение хлорида кобальта может быть проведено за счет двух процессов – передачи тепла в стенку емкости сбора и за счет охлаждения аргоном, поступающим на барботаж жидкого хлорида бериллия.



магистраль выхода газовых продуктов, 2– корпус,
 хлорид бериллия, 4– магистраль подачи хлорида бериллия,
 рассеиватель, 6– магистраль подачи аргона.

Рисунок 9. Накопительная емкость хлорида бериллия

В установившемся процессе в емкости присутствует жидкий хлорид бериллия. В этом случае поступающий хлорид бериллия будет передавать излишки тепла накопленному хлориду, передавая его далее в стенки сосуда, переходя в жидкое состояние и смешиваясь с накопленным хлоридом бериллия. Соляная кислота в виде пара будет выходить из емкости к емкости сбора хлорида трития. Пары соляной кислоты будут смешиваться с потоком барботажного аргона. Барботаж аргона будет способствовать охлаждению хлорида бериллия и выходу из него газовых фракций.

В начальный период работы накопительная емкость должна быть разогрета до температуры превышающей температуру плавления хлорида бериллия, например, до 700 К. Для лучшего проведения процесса в емкость следует заложить некоторое минимальное количество хлорида бериллия.

На поверхности накопительной емкости необходимо установить омический нагреватель мощностью около 3.0 кВт, обеспечивающий как нагрев в начальный период работы, так и стабилизацию температуры в стационарном режиме работы под контролем системы автоматического регулирования.

Возможно, что на части поверхности накопительной емкости следует наложить слой теплоизоляции. Необходимо провести дополнительные расчеты по оптимизации выхода на стационарный режим и управление температурой хлорида бериллия в стационарном режиме с различными вариантами нагревателей и слоя теплоизоляции.

Емкость сбора хлорида трития

Выходящие из емкости хлорида бериллия по магистрали газы содержат пары соляной кислоты, водород и аргон. Температура этих газов около 700 К. Первоначально газы проходят через холодильник, в котором охлаждаются до температуры близкой к 373 К.

Расход соляной кислоты в составе этих газов близок к 1,0 г/с в ходе выпуска газов из хлоратора. В среднем за цикл этот расход в 3 - 4 раза меньше. Расход водорода в ходе выпуска не более 0,01 г/с. Расход аргона в ходе выпуска 0,5 – 1,0 г/с.

После холодильника газы поступают в емкость сбора хлорида трития. Эта емкость заполнена водой комнатной температуры. Газы барботируются через слой воды, охлаждаясь до комнатной температуры. Соляная кислота вместе с хлоридом трития растворяется в воде.

Заключение

В технологии переработки облученного бериллия процесс получения хлорида бериллия является стадией, на которой происходит удаление радиоактивных примесей. Температурные режимы, приведенные в данной работе, предназначены для удаления этих примесей.

Методика работы установки получения хлорида бериллия, при которой поддерживаются заданные температурные режимы, позволит успешно провести процесс переработки облученного бериллия.

Литература

- I. Tazhibayeva, H. Kawamura, K. Tsuchiya and other. Research and Development of Purification Technology of Irradiated Beryllium. // 14th International Conference on Fusion Reactor Materials. Sapporo, September 7-12, 2009.
- В.М. Котов, Р.А. Мухаметжарова, Х. Кавамура и др. Исследования и совершенствование технологии очистки облученного бериллия. // I Международная конференция «Инновационные технологии. Реальность и перспектива», г. Курчатов, 20-23 сентября 2010 г.
- Котов В.М. Расчет обоснования конструкции и режимов работы хлоратора / В. М. Котов, Р. А. Мухаметжарова // Вестник НЯЦ РК – 2011. – вып. 4. – С. 69 – 73.
- 4. Fluent version 6.3.26 User Reference; Fluent, Inc.; 2006.
- 5. Большой энциклопедический словарь «Химия», Москва, 1998.
- 6. ANSYS Release 7.0. ANSYS 7.0 Documentation; SAS IP, Inc.; 2002.

БЕРИЛЛИЙ ХЛОРИДІН АЛУ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ РЕЖИМДЕРІ

Котов В.М., Супрунов В.И., Бакланова Ю.Ю., Витюк Г.А., Сураев А.С.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста «құрғақ» тазалау әдісімен сәулеленген берилийді химиялық қайта өндіру мүмкіндігі қарастырылады. Әдіс сәулеленген берилийді хлормен әрекеттесуінде негізделген. Хлорид берилийді хлорид кобальттан және хлорид тритийден тазалау әдісінің негізі олардың фазалық аралық температуралардың ерекшелігінде белгіленген, қондырғының түрлі тораптардың белгіленген температуралық режімдерін қолдау қажеттілігіне келтіреді.

Бұл технологияның басқа әдістерден айырмасы, тазалаудың жақсы дәрежесі және зиян қалдықтардың аз саны бар. Осы жобаны жүзеге асыру үшін циклдық режімде аз уақыт ішінде 1 кг дейін сәулеленген берилийді қайта өндіруге рұқсат беретін қондырғы құрастырылып шығарылды. Осы технологиялық жобаның негізгі артықшылығы, оны өнеркәсіптік масштабтарда жүзеге асыру мүмкіншілігі болады.

BERYLLIUM CHLORIDE PLANT TEMPERATURE CONDITIONS

V.M. Kotov, V.I. Supprunov, Yu.Yu. Baklanova, G.A. Vityuk, A.S. Suraev

Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Chemical reprocessing of irradiated beryllium by the method of "dry" purification is described in the work. Basis of the method is interaction between irradiated beryllium and chlorine. Basis of beryllium chloride purification method from cobalt chloride and tritium chloride is in difference of its phase change temperature, which leads to necessity of specified temperature regime support at different parts of the installation.

This technology, in contrast to different methods, has better purification degree and less mass of toxic waste. The installation was designed for this method realization, which allows reprocessing up to 1 kg of irradiated beryllium during small period of time in cyclic regime. The main advantage of given technological process is in its scalability to industrial scale.

УДК 535.215, 621.472, 535.8, 53.06

СОЛНЕЧНАЯ ТЕРМОТЕХНОЛОГИЯ И ФОТОВОЛЬТАИКА – КОМПОНЕНТЫ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Жарекешев И.Х.

Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В статье рассматриваются преобразователи солнечной энергии в тепло и электричество, как два альтернативных источника энергии. Основой первого вида преобразования является термоколлектор, который собирает тепловую энергию от солнечной радиации. Второй, фотовольтаический, тип преобразования функционирует на фотоэффекте, физическом явлении прямого превращения света в электрический ток при помощи солнечных элементов. Изложены принципы работы и устройство различных термоколлекторов и солнечных элементов, их себестоимость и применение. Обсуждаются экономические возможности и конкурентоспособность солнечных преобразователей на рынке энергии.

введение

Солнце - гигантский и, пожалуй, самый эффективный источник энергии, который находится в настоящий момент в распоряжении человечества. Даже с такого большого расстояния - 150 миллионов километров - оно ежедневно поставляет на поверхность Земли в виде радиации колоссальное количество энергии. От Солнца каждый день приходит столько энергии, что оно превышает в 15000 раз ежедневную потребность всего населения планеты. Общая излучательная способность Солнца составляет 3·10²³ киловатт, в то время как полная мощность, приходящаяся только на освещение им поверхности Земли, насчитывает 1,75·10¹⁴ киловатт. Если чисто теоретически предположить, что три процента пустыни Сахары будут заняты солнечными фабриками и установками, то вырабатываемой энергии хватит для полного удовлетворения всех энергетических нужд Европы и Африки.

Даже если использование солнечной радиации в северных регионах планеты не является таким эффективным, как в экваториальной зоне, представляется все же выгодным также и там применение солнечных батарей. Например, в странах северной ча-Западной Европы (Германии, сти Франции, Голландии и др.) более 10 миллионов владельцев частных домов имеют установки для преобразования солнечной радиации либо в электрический ток, либо непосредственно в отопление или нагрев воды. В какой степени использование солнечной энергии при помощи коллекторов является целесообразным, зависит главным образом от угла падения лучей Солнца на поверхность земного шара. Для разных географических регионов, в различные времена года и времена суток передаваемое количество теплоты различно в зависимости от угла освещения, и поэтому «греющая сила Солнца» соответственно этому меняется. Образно говоря, к концу года Солнце «теряет силу», а весной оно пять «набирает силу». Однако такая формулировка не совсем верна, так как Солнце излучает все время одинаковое количество радиации на нашу планету независимо от времени года. Другими словами, передаваемое тепло остается неизменным. И все же его лучи «согревают нас» не всегда одинаково. Причина лежит в плотности освещения, то есть в удельном количестве солнечных лучей падающих на Землю. Справедливо следующее: чем больше количество энергии на единицу освещаемой площади, тем сильнее нагревается поверхность.

Если Солнце находится точно в зените – его положение перпендикулярно рассматриваемому участку Земли, а его лучи падают под прямым углом на меньшую по площади поверхность (см. рисунок 1). Следовательно, поверхность участка из-за этого сильно разогреется. Если же Солнце находится невысоко над горизонтом (например, по направлению 40° от горизонта, как показано на рисунке 1), то, в этом случае, то же самое число лучей (фактически, то же самое количество солнечной энергии) распределяется на участке земли уже большей площади. Поэтому на единицу площади земной поверхности падает меньшее количество лучей, и, как следствие, освещенная поверхность разогревается уже не так сильно.

Подобное явление можно наблюдать, если перемещаться от экватора в направлении любого из полюсов (неважно к какому, к северному или южному полюсу). Вблизи экваториальной линии солнечные лучи падают под углом приблизительно 90° на земную поверхность. Поэтому экваториальная зона отличается высокими температурами. При передвижении от экватора на север или на юг Земли угол падения лучей Солнца уменьшается до тех пор, пока он не достигнет почти нулевого значения на одном из полюсов земного шара, где температура, соответственно, очень низкая. Аналогичная картина характерна для различных времен года. При низко стоящим над горизонтом Солнце зимой холоднее, чем летом, когда оно находится значительно выше горизонта. И наконец, то же самое наблюдается в течении дня. Дневное, высокостоящее Солнце обеспечивает большую температуру, по сравнению со временем восхода и захода.



слева – положение Солнца в зените, падение лучей под прямым углом к участку земной поверхности небольшой площади; справа – положение Солнца под углом падения 50°

Рисунок 1. Излучательная энергия Солнца на единицу площади земной поверхности

Вопреки распространенному на сегодняшний день мнению, использование солнечной энергии по всей территории Казахстана целесообразно и, несомненно, выгодно, несмотря на то, что угол падения солнечных лучей на поверхность республики в среднем значительно ниже значения прямого угла. От Шымкента до Петропавловска солнечная радиация вполне достаточна, чтобы достичь 60% аккумулирования энергии для целей обеспечения населения теплой водой. Для этого солнечные тепловые коллекторы должны быть стационарно закреплены под определенным углом, то есть они не обязательно должны лежать плоско на поверхности земли. В южных областях республики солнечная радиация наиболее интенсивна. Около 1250-1350 киловаттчасов энергии попадает здесь ежегодно на квадратный метр земной поверхности, в то время как в регионах близких к столице г. Астане приблизительно 800-1000 киловатт-часов.

Для сравнения, среднее значение падающей на нашу планету солнечной радиации составляет 1700 киловатт-часов на 1 кв.м. Несмотря на то, что оно лежит заметно выше средне-казахстанского уровня, тем не менее, потоки радиации все еще достаточно огромны, чтобы их использовать как дополнительный источник энергообеспечения экономики и населения республики. При этом число часов чистого солнечного освещения не является настолько важным, насколько важно общее количество радиации падающей на коллектор. Несмотря на облачность и другие изменения метеорологических условий, тепловой коллектор способен постоянно собирать имеющуюся солнечную энергию и превращать ее в тепловую.

Для примера, в той же Германии, которая находится в среднем севернее Казахстана, суммарные электрические мощности, генерированные из солнечного света, в 2012 году достигли уровня до 9,2 тераватт-часов, что составляет 1,7% от общего потребления электроэнергии страны. Отметим здесь, что все виды возобновляемых источников, включая также ветроэнергетику (6,1%), биоэнергию (4,0%), регенеративную силу воды на ГЭС (3,4%) поставляют около 16% всего объема (брутто) электроэнергии Германии [1]. В одном только 2009 году было инсталлировано новых солнечных модулей общей мощностью 1500 мегаватт, что соответствует примерно пяти атомным электростанциям средней мощности. Такая относительно высокая доля вырабатываемой электроэнергии, приходящаяся на возобновляемые источники, в общем энергобалансе страны объясняется рядом причин. К ним относятся: нарастающая нехватка национальных полезных ископаемых, постепенный отход от ядерной энергетики (в целях безопасности и экологии), отсутствие традиционных энергоносителей (углеводородов), и наконец, высокий научный и технологический потенциал, а также общее экологическое мировоззрение населения. Аналогичная ситуация и во Франции, хотя там рынок солнечных коллекторов и фотовольтаики развит несколько слабее, а атомному сектору уделяется большее внимание.

Следует заметить, что далеко не вся солнечная радиация, падающая на поверхность коллектора, приходится на стопроцентное преобразование. Определенная часть энергии уходит в виде потерь. Решающую роль для оценки эффективности преобразования солнечной энергии играет такая характеристика как коэффициент полезного действия (кпд) системы коллектора. Не вдаваясь в подробности вычисления кпд различных преобразователей, можно приблизительно сказать, что для того, чтобы генерировать в год от 800 до 1000 киловатт-часов в Казахстане, требуется 10 кв.м. площадей фотовольтаических модулей. Если же вместо них применять термоколлекторные установки, то энергетический выигрыш будет несколько больше. Например, на одном квадратном метре поверхности теплового коллектора можно достичь уровня в 400-600 киловатт-часов в год.

Итак, по определению, солнечная термотехнология – это технический процесс преобразования солнечной энергии в тепловую энергию (то есть, в тепло, в нагрев и т.д.), а фотовольтаика – это превращение солнечной энергии непосредственно в электрическую энергию (то есть, свет преобразуется в электрический ток).

1 СОЛНЕЧНАЯ ТЕРМОТЕХНОЛОГИЯ

За счет инфракрасной части солнечного спектра осуществляется передача теплоты через радиацию от Солнца к Земле. Действие этой теплопередачи знает каждый, кто садится летом в автомобиль, простоявшим несколько часов под палящим солнцем. Некоторые материалы могут разогреваться под действием солнечных лучей достаточно сильно, что, например, на темном капоте припаркованного автомобиля вполне возможно зажарить яичницу.

1.1 Солнечные тепловые коллекторы

Для того, чтобы оптимально преобразовывать солнечную радиацию в теплоту, используют солнечные модули, так называемые термоколлекторы (или тепловые коллекторы). Концепция этих систем устроена так, чтобы наилучшим образом (с наименьшими потерями и с наименьшими затратами) обеспечивать теплом. Термоколлекторы могут применяться в различных областях. Особенно перспективное приложение они находят в частном секторе. Например, солнечные коллекторы используют для нагрева воды (душ, стирка, полоскание и т.д.), а также для обогрева жилых помещений и плавательных бассейнов. Одна тепловая установка разумно просчитанных размеров может обеспечить до 50-60% годовой потребности в горячей воде односемейного дома (4-5 человек). Особенно в летнее время, когда уровень покрытия достигает до 100%. В остальные месяцы года необходим дополнительный источник энергии, например, обычный отопительный котел. При этом важно, чтобы распределение дополнительного количества энергии из обычных традиционных источников, таких как отопительный котел и т.д., происходило при неизменной температуре. Чем ниже эта фиксированная температура, тем лучше лля обеспечения оптимального теплового баланса (например, 45 °С).

Доля покрытия потребности в теплой воде с исполльзованием более объемных теплоустоновок лежит ниже, в диапазоне 20-40%. Такие системы предназначены больше для предварительного нагрева воды, то есть около 35 °С внутренней температуры водосборника. Несмотря на то, что они не достигают более высоких температур, их эффективность работы за счет больших объемов нагреваемой воды может оказаться выше. В зависимости от того, насколько высока потребность в горячей воде, проектируются и размеры тепловых коллекторов. При среднесуточном потреблении теплой воды с температорой в 60 °С исходят из расхода приблизительно в 50 литров на человека в день. Простой рассчет показывает, что для такого уровня потребностей необходима поверхность термоколлектора площадью 16-2,0 кв.м. на человека. Если же используются коллекторы с вакуумными трубками, то полезная площадь преобразования уменьшается примерно на 20%, так как их кпд выше, чем у традиционных плоскостных моделей термоколлекторов.

1.2 Типы термоколлекторов

Хотя и различают несколько видов солнечных термоколлекторов, всех их объединяет единый принцип построения. Как правило, тепловой коллектор как система состоит из: самого поля коллектора, проводящей системы трубок, переключателя (или системы клапанов) и накопителя. Различают плоские коллекторы и коллекторы с вакуумными трубками (см. их особенности ниже по тексту). Оба вида коллекторов обладают абсорбером, то есть коллекторным полем, которое состоит из теплопроводяших металлических листов из меди или аллюминия с черным пленочным покрытием, которое осаждено на несущую трубку. Металлические листы служат для как можно большего захвата солнечной радиации. На рисунке 2 приведена схема устройства солнечного термоколлектора.



Рисунок 2. Схема солнечной термоколлекторной установки

Образованное из радиации тепло передается теплопроводящей жидкости (агенту), которая циркулирует по проводящим трубкам-каналам, и по ним же отводится из системы. Большинство термических солнечных установок работают на морозостойкой теплопередающей жидкости (антифризе или на смеси воды и глюкола), движение которой замыкается в закрытый контур (первый контур) с помощью обычного термонасоса.

Важной частью этой закрытой проводящей системы является теплонакопитель (или теплообменник), где теплонесущий агент (вода) отдает термическую энергию во второй, внешний контур. Если Солнце нагрело коллекторное поле вместе с агентом до достаточной температуры, превышающей на несколько градусов температуру в нижней части накопителя, то автоматически включается клапанный насос. За счет этого, более горячая жидкость устремится вниз в накопитель, а холодная жидкость по другому каналу направится в адсорбер, то есть в коллекторное поле. Тем самым обеспечивается отвод тепла из первого во второй контур. Теплонакопитель предназначен, с одной стороны, для собирания и аккумуляции нагретой жидкости. С другой стороны, он способствует «сглаживанию» сильных изменений в подаче солнечной радиации в течении суток. При этом объем емкость теплонакопителя должен превышать в полтора-два раза дневную норму потребителя горячей воды, то есть около 400-450 литров для домохозяйства с членами семьи в 4-5 чеповек

Накопитель поддерживается под нормальным давлением сети, где циркулирует бытовая или питьевая вода. Он обладает двумя вентилями, регулирующими соединения к имеющимся теплообменникам. Снизу из холодной области накопителя идет канал к солнечным коллекторам и сверху из горячей области к тепловому котлу. Температура в накопителе должна быть ограничена 60 °С, чтобы избежать осаждения кальки и разложение приводных трубок. Кроме того, для увеличения кпд системы желательна хорошая теплоизоляция всей установки, с целью максимально уменьшить тепловые потери.

Плоские коллекторы имеют верхнее плоское покрытие над поверхностью коллекторного поля из защитного стекла с антиотражающим слоем (Antireflex). Это стекло должно быть прозрачным для солнечного спектра электромагнитных волн, особенно включая его широкую инфракрасную область. Кроме того, оно должно быть достаточно прочным на механические нагрузки и защищать коллекторное поле от влияния внешней среды. Непосредственно под плоскостью располагается абсорбирующий слой, состоящий из коллекторного поля и проводящей системы. Далее под ними находится необходимая теплоизоляция, которая служит для уменьшения выхода тепловой энергии в виде излучения в окружающую среду. Вся конструкция крепится на легкую раму, которая в большинстве случаев изготовлена из алюминия, стальной жести или пластика. Общий вес установки на квадратный метр абсорбируемой площади составляет около 15-20 килограмм.

Вакуумно-трубчатые коллекторы снабжены абсорбером, который заключен в герметическую стеклянную трубку для уменьшения тепловых потерь по принципу термоса. Даже если температура абсорбента внутри повышается до 120 °С, внешняя стенка стеклянной трубки остается холодной. Трубчатые коллекторы обладают более высокими значениями кпд по сравнению с плоскими коллекторами, однако по стоимости они соответственно дороже. Кроме того, они предназначены для укрепления над крышей и не могут служить одновременно кровлей крыши дома. Зачастую односемейные частные дома (4-5 человек) нуждаются для подогрева используемой воды в общей поверхности от 4 до 6 квадратных метров с плоскими коллекторами и в общей площади от 3 до 4 квадратных метров с вакуумнотрубчатыми коллекторами. При этом полная дневная норма объема накопителя составляет от 70 до 100 литров на человека. Хорошо изолированная и оптимальная по расходам вакуумная гелиевая установка обладает высокой эффективностью преобразования, ее кпд достигает 80%.

Приведем небольшой сравнительный расчет. Например, для отопления одного здания с полезной площадью 130 кв.м. необходимо 2500 литров горючего (например, мазута или масла) или 5000 кг угля в год. Одна солнечная термоустановка площадью в 24 кв.м. может понизить вышеприведенный расход горючего почти на 1000 литров.

Если предусмотрена тепловая поддержка в форме дополнительного отопления, то оценка расходов выглядит следующим образом: требуется один квадратный метр коллекторной площади на каждые 10 кв.м. жилой площади, которая должна обогреваться. Таким образом, объем теплонакопителя составляет 50 литров на 1 кв.м. площади коллектора дополнительно к 50 литров на человека. Стоимость одной термоколлекторной установки для нагрева теплой воды с 4 кв.м. коллекторной площади лежит в диапазоне от 1500 US\$ до 3000 US\$.

1.3 Монтаж термоколлекторов и стоимость

Солнечная термосистема для нагрева бытовой воды может быть инсталлирована в любом месте. По возможности, она должна быть направлена на юг, юго-восток или юго-запад. Площадкой для установки может быть крыша, гараж или даже карниз балкона. Если коллектор закреплен стационарно, то наибольшее количество теплоты из солнечной радиации вырабатывается, если плоскость коллекторного поля наклонена к горизонту под углом 40°-42°. При этом также важно, что деревья или другие здания не отбрасывают тень на коллекторное поле. Чтобы сократить расходы и уменьшить тепловые потери, целесообразно сделать проводящий путь по каналам от коллектора до накопителя теплой воды как можно короче. Наилучшим выходом с оптимальной точки зрения является размещение газового отопительного котла в жилом доме на самом верхнем этаже, так чтобы газовая печка и солнечная установка находились как можно ближе друг к другу. Профилактика и периодический ремонт термоколлекторной системы рекомендуется проводить через каждые 2 года вместе с проверкой отопительного котла. Особенно экологически чистым и экономически выгодным является общее размещение непосредственно на чердаке жилого дома отопительной системы на природном газе с контрольной техникой, комбинированной с солнечным термоколлектором.

Удельная стоимость системы термических солнечных установок (для подогрева питьевой воды) в частном доме на одну-две семьи колеблется, включая монтаж, между 500 US\$ и 1000 US\$ на один кв.м. для плоскостных коллекторов и между 900 US\$ и 2000 US\$ на 1 кв.м. для вакуумных коллекторов. При комбинации с отопительной поддержкой расходы становятся несколько ниже.

1.4 Рынок солнечных коллекторов

В настоящее время рынок солнечной энергетики развивается быстрыми темпами. Особенно резкий рост хорошо наблюдается на примере стран Западной Европы. Так к 2011 году годовой оборот от солнечной термии на рынке нетрадиционной энергетики в Германии достиг уровня примерно 650 миллионов Евро. Среди стран не только Евросоюза, но и всей Европы, федеративная республика долгое время занимала первое место на рынке гелиотермических систем. Поэтому ее пример наиболее показателен. В этой стране было произведено солнечных модулей с общей площадью активной поверхности 9.000 тысяч кв.м., а во всем Европейском Союзе – около 46.000 тысяч кв.м. (см. диаграмму на рисунке 3), что соответствует почти 5 миллионам солнечных термоустановок. С 1995 года прирост составил почти десятикратный размер, чему не в последнюю очередь способствовало принятие к тому периоду времени в ряде стран ЕС законов о возобновляемых источниках энергии. Немалую роль сыграли в развитии альтернативной энергетики и прямые государственные субсидии.



Годовая инсталлированная площадь солнечных

Рисунок 3. Темпы роста солнечных термоколлекторных установок в странах ЕС за последние двадцать лет

Согласно статистическим данным федеративного объединения "Bundesverband Solarwirtschaft" на крышах домов в одной только Германии к 2008 было установлено более миллиона гелио-термоустановок. Благодаря им, в республике было сэкономлено более 500 миллионов литров горючего и кубометров газа. К этому достоинству следует обязательно добавить и тот немаловажный экологический фактор, что таким образом удалось избежать эмиссии двуокиси углерода (CO₂) в атмосферу массой более чем один миллион тонн. К концу 2011 года с помощью солнечных термоустановок было произведено около 3,8% всей регенеративно выработанной теплоты. По прогнозам различных независимых агентств потребности в новых термоколлекторах будут возрастать каждый последующий год на 30-35%. Хотя на международных рынках солнечной термотехнологии ФРГ и играет не последнюю роль, лидером здесь все же в последнее время является Япония, за которой следуют США.

2 ФОТОВОЛЬТАИКА

Слово фотовольтаика (photovoltaic) состоит из древнегреческого слова «фото» и фамилии итальянского физика Алессандро Вольта, в честь которого именовали единицу измерения напряжения (вольт). Она обозначает прямое преобразование солнечного света в электрическую энергию при помощи солнечных элементов. Физический принцип преобразования основан на явлении фотоэффекта, открытом французским физиком Александром-Едмондом Беккерелем еще в 1839 году. Позже Альберт Эйнштейн объяснил это явление и в 1905 за этот вклад в науку году был удостоен Нобелевской премии.

Под фотоэффектом понимают процесс вырывания носителей заряда из твердого тела под действием радиации. При этом различают две разновидности фотоэффекта – внешний и внутренний. Первые фотоэлектрические элементы – их называют также солнечные элементы (СЭ) – были созданы только в 1950 году. Но с того времени СЭ применяются в широких областях жизни: от карманных калькуляторов и часов до космических станций и спутников. В литературе на иностранном языке для понятия фотовольтаики часто употребляется также сокращение «PV».

2.1 Солнечные элементы

Первоначальные СЭ состояли зачастую из кристаллического кремния высокой чистоты. Несмотря на то, что химический элемент кремний Si занимает 27% земной коры, он не встречается в природе в виде чистых кристаллов, а в основном в соединениях кварцитов и обычного песка (SiO₂) с различными примесями. Для выращивания сверхчистых кремниевых кристаллов (с уровнем чистоты до 99,999999%) необходим довольно энергоемкий процесс. Исходный материал, таким образом, из которого впоследствии режут пластины, становится относительно дорогим. Такой тип кремния называют часто полупроводниковый.

Солнечные модули могут быть сконструированы из моно- или поликристаллического кремния, а также изготовлены по тонкопленочной технологии. Рыночный сегмент элементов кристаллического типа лежит в области 80%, поскольку они обладают относительно продолжительной «жизнеспособностью». К недостаткам относятся высокие потребности в исходном материале и довольно продолжительный по времени рост кремниевых кристаллов. Поэтому из соображений дороговизны разрабатываются технологии, уменьшающие толщину слоя кремния. СЭ, как правило, имеют форму квадрата и традиционные размеры – 12,5 см на 12,5 см. Существуют также еще меньшие образцы (10×10 см²), которые однако дороже в обработке, поскольку для одной и той же выходной мощности требуется большее число элементов. Между тем появились шестидюймовые элементы (то есть со стороной СЭ в 15 см). Они облегчают процесс приготовления и, следовательно, заметно дешевле по стоимости. Однако старые инверторы сталкиваются с проблемами на 35% выросшего по величине тока.

Монокристаллические солнечные элементы состоят из плоских пластин (подложек), которые вырезаны из цельного кристалла кремния, «выращенного» из расплава кварцевого песка. Толщина подложек обычно составляет около 0,3 мм. Так как в

обработку идет цельный кристалл высокой чистоты, себестоимость монокристаллических СЭ является наиболее высокой из-за дорогостоящей технологии их изготовления. Поэтому их используют, в основном, для энергообеспечения спутников и космических станций. За последние годы кпд монокристаллических элементов, применяемых в промышленности, поднялся до 16%, а в лабораторных условиях получают значения кпд до 19%. Известно, что максимальный кпд преобразования лежит в области 28% – то есть его верхнего теоретического предела.

Поликристаллические солнечные элементы, по сравнению с монокристаллическими СЭ, обладают несколько меньшим кпд (около 13-15%) и состоят из большого количества слоев кремния, которые выпилены из спрессованного блока, состоящего из нескольких кремневых кристаллов. Поликристаллические СЭ узнаются по хорошо различимым границам зерен, в том время как монокристаллические СЭ выглядят одноцветно и равномерно. Стоимость полукристаллических СЭ должна быть ниже чем у монокристаллического типа из-за более низкого кпд.

Тонкопленочные солнечные модули изготавливаются, как правило, из слоев полупроводниковых соединений, которые наносятся на стеклянную или металлическую (например, из нержавеющей стали) подложку. Толщина слоя составляет примерно одну сотую их кристаллических конкурентов, то есть от 1 до 5 микрон по сравнению с 200-300 микрон. В настоящее время разрабатываются различные варианты тонкопленочных СЭ: из аморфного кремния (a-Si), CIS (диселенид медииндия) и CdTe (теллурид кадмия) и соединений КРТ (кадмий-ртуть-теллур) CdPbTe. Кпд преобразования этих соединений поначалу был довольно низким (около 5% до 10%), но в последнее время достигает до 13% и больше. Они нашли широкое применение в карманных калькуляторах и наручных часах.

Изготовление аморфного кремния осуществляется намного проще, почти конвейерным способом, то есть не требуется долговременное выращивание кристаллов и дорогостоящее резание кристаллов. Однако потеря работоспособности из-за процессов деградации (эффект Стэблера-Вронского) приводит к нежелательному уменьшению кпд, по крайней мере, в первые месяцы эксплуатации СЭ. Зачастую используются фотоэлементы из аморфного кремния модифицированного водородом (a-Si:H), который внедряется для пассивации оборванных связей. Также и для солнечных элементов на основе соединения CdTe возможно быстрое и экономичное серийное производство. Недостатком здесь является высокая токсичность кадмия и теллура. Ограничением для широкого производства CIS-модулей является недостаточное количество мировой добычи индия. Согласно прогнозам доля тонкопленочных элементов на рынке фотовольтаике, которая составляла 12,5% в 2001 году, может возрасти от сегодняшнего уровня в 18,5% до 29% в 2015 году [2].

Комбинацией из кристаллического и аморфного СЭ является так называемый НІТ-элемент – гетероструктура с внутренним тонким слоем. Ее толщина составляет 0,2 мм (по сравнению с 0,3 мм – толщиной кристаллических элементов). Кпд этих СЭ достигает 17%. Структура НІТ-элемента выглядит как сэндвич – на подложку из монокристаллического кремния с обеих сторон нанесены слои аморфного кремния.

2.2 Принцип действия солнечных элементов

В функционировании фотовольтаических преобразователей заложена технология, на которой работает вся полупроводниковая техника. При производстве элементов исходный материал (например, кремний) легируется различными примесными атомами, то есть целенаправленно и контролируемо «загрязняется». При этом электрически непроводящий кремний приобретает заметную проводимость. Если на поверхность солнечного элемента падает свет, то электроны атомов кремния забирают энергию у фотонов. Ее хватает, чтобы «вырвать» электрон из атомной орбиты, при условии, что энергия фотонов достаточно большая и должна быть выше некоторой пороговой величины. Освободившиеся таким образом электроны перемещаются по решетке кристалла почти беспрепятственно, то есть свободно, при этом отрицательно заряженные электроны оставляют за собой положительно заряженные дырки. В физике полупроводников процесс разделения электронно-дырочных пар за счет действия света называется внутренним фотоэффектом, а минимальная энергия, то есть ее пороговая величина, необходимая для этого разделения, называется работой выхода. Подробное физическое изложение и теории фотоэффекта в полупроводниках можно найти в литературе [3] и здесь приводиться не будет. Ограничимся лишь его качественным (местами приблизительным) описанием, очень которое вполне достаточно для понимания фотовольтаики как альтернативной компоненты энергетики.

Чтобы электронно-дырочные пары опять не «схлопнулись» (рекомбинировали), искусственно создается внутренне электрическое поле, которое отводит электроны и дырки в разные стороны от места их рождения. Наведение «встроенного» в структуру электрического поля не требует дополнительных энергетических затрат. Полупроводниковая технология позволяет изготовить такую структуру, часто называемую р-п переходом. В верхний слой кремневой пластины внедряются атомы фосфора, а в нижнюю часть – атомы бора. По отношению к четырехвалентному атому кремнию, пятивалентный атом фосфора отрицательно заряжен, а трехвалентный бор – положительно заряжен. В результате разноименно-заряженных атомов на границе перехода создаются области пространственного заряда, которые и наводят внутреннее электрическое поле (см. рисунок 4). Если электрически соединить верхнюю и нижнюю часть пластины, то избыточные, появившиеся за счет освещения, электроны двигаются от отрицательного полюса к положительному по внешней цепи. Этот поток электронов и есть электрический ток (фототок). Таким образом, потребитель, подключенный во внешнюю цепь, получает электроэнергию (например, загорается лампочка). Если цепь разомкнута, то на внешних контактах создается фотовольтаическое напряжение, полюсность которого направлена против внутреннего поля. Чтобы собирать электроны со всей поверхности СЭ, наносится тонкая контактная сетка. Ее серебристые полоски хорошо видны на солнечном элементе.



Рисунок 4. Схема солнечного кремневого элемента в разрезе

Создаваемое на СЭ постоянное напряжение зависит от типа полупроводникового материала. Для кремния оно составляет около 0,5-0,6 вольт. Тогда можно оценить электрическую мощность кремневого СЭ размером 10 см × 10 см и с кпд 16%. При постоянном токе в 2.6 ампер она равна 1.6 ватт. Но такое низкое напряжение мало к чему пригодно, поэтому несколько солнечных элементов соединяют последовательно, так чтобы суммарное напряжение возросло. Выстраивается ряд из СЭ, так называемый стринг (string). Параллельное подключение нескольких стрингов позволяет дополнительно увеличить силу постоянного тока. Окончательный упорядочение такого последовательно-параллельного соединения СЭ интегрируется в один единый модуль.

Напряжение на клеммах СЭ слабо зависит от интенсивности солнечной радиации, в то время как сила тока при большей освещенности резко возрастает. Кремневый элемент с активной площадью 100 кв.см. вырабатывает максимальный электрический ток около 3 ампер при солнечном освещении 1000 ватт/кв.м.

Следует учесть, что эффективность солнечного элемента существенно зависит от температуры. Сильный нагрев элементов ведет к значительному снижению мощности и, как следствие, к понижению кпд преобразователя. При повышении температуры на каждый градус работоспособность солнечного элемента из кристаллического кремния падает на полпроцента, а работоспособность СЭ, выполненного из аморфного кремния, – примерно на четверть процента.

Общая мощность фотовольтаического модуля измеряется в киловаттах пиковой (kW_n) и определяется нормами тестовых условий. Стандартными тестовыми условиями (или STC=standard test conditions) являются: световое облучение – 1000 Вт/м², температура модуля - 25 °C, коэффициент воздушной массы - 1,5. Последняя величина (АМ - Air Mass) определяет, через какой объема атмосферного воздуха должен пройти солнечный свет, прежде чем он достигнет поверхности модуля. На экваторе коэффициент АМ равен в точности единице, так как солнечные лучи там падают почти перпендикулярно поверхности земли. При наклонном положении Солнца, его свет проходит значительно больший путь через толщу земной атмосферы. Отношение этого более длинного светового пути к наиболее короткому его пути на экваторе и дает величину АМ-коэффициента. Необходимость учитывать значение этого коэффициента диктуется тем, что спектральное распределение солнечного света изменяется при прохождении через атмосферу Земли. Одни части солнечного спектра (видимого и невидимого) поглощаются воздухом более интенсивно, чем другие

2.3 Монтаж солнечных модулей

Установить солнечных батарей можно самыми способами. разнооборазными Дорогостоящая инсталляция на крышах домов в странах Западной Европы постепенно заменяется комплексным монтажом солнечных модулей в общую планировку здания. При этом модули играют роль конструкторского строительного элемента фасада здания уже на стадии проектировки, например, жилого дома. Как правило, полные модули на рамах укрепляются прямо на наклонных крышах домов. Кроме того, осуществляется возможность модули интергрировать непосредственно на балки крыши, фактически вместо листов шифера и черепицы. За последние годы получил развитие новый архитектурный стиль (солярная архитектура), который при планировки и строительстве домов целенаправленно учитывают использование солнечной энергии.

Одна солнечная установка мощностью 1000 ватт производит в зависимости от географического места инсталляции от 700 до 1000 киловатт-часов электроэнергии в год. Для одного жилого частного дома с 4 жильцами с годовым потреблением электроэнергии 4000 киловатт-часов в год необходима установка мощностью 4 киловатта, если вся энергия должна преобразовываться от солнца. Для этого активная площадь модулей должна занимать приблизительно 30-40 квадратных метров в зависимости от кпд солнечной фотосистемы.

Приведем некоторые рекомендации для инсталляции фотовольтаической установки. Во-первых, она должна быть ориентирована на юг, юго-восток или юго-запад и не должна быть затенена. Вовторых, оптимальный наклон к горизонтали желательно фиксировать в летние месяцы при 30 °C, а зимой – 60-65 °C. При направлении на юг-восток и юго-запад с азимутальным углом $\pm 45^{\circ}$ и при угле наклона от 10° до 50° энергетический выход фотовольтаического модуля уменьшается на незначительную долю, около 5%. В-третьих, следует периодически очищать поверхность СЭ от пыли и грязи.

В Западной Европе различные государвственные программы поддерживают производство солнечный модулей и выкупает у производителей фотовольтаической энергии электрический ток по твердым тарифам, превышающим среднюю рыночную цену за киловатт-час в данном регионе. Тем самым гарантируется их защита от колебания цен на общем энергорынке. Для этого частные производители фотоэнергии должны подключать свои солнечные модули в общественную энергосеть. Существует специально разработанная для солнечных батарей характеристика качества, согласно которой измеряется степень использования облученной энергии установкой: PR – Performance Ration. Он служит в качестве критерия допуска подключения солнечной установки в общую энергосеть. Необходимые значения PR для этого должны достигать от 70% до 80%.

Отключение от общей энергосети предполагает независимое индивидуальное энергообеспечение. Солнечные установки работают при этом в условиях системы-острова. Примерами могут служить локальное снабжение энергией различных удаленных зон отдыха, судов, дорожных знаков, уличного освещения, рекламных щитов, телекоммуникационных сооружений и т.д. (см. рисунок 5).



Рисунок 5. Примеры применение солнечных модулей (для вечернего освещения улиц, энергообеспечения домов и судоходства)

Автономность работы островных солнечных установок накладывает определенные требования при их производстве и дальнейшей эксплуатации. Различают три варианта таких систем: (1) прямое электрическое подключение от производителя к потребителю; (2) собирание электроэнергии в аккумуляторах; (3) хранение электроэнергии в аккумуляторах и одновременное обеспечение потребителя переменным током. В последнем случае инвертор подсоединяется между аккумулятором и потребителем, в отличие от установки, напрямую подключенной в общую сеть, когда локальное аккумулирование выработанной электроэнергии не является обязательным.

Затраты и стоимость. Солнечные установки являются самыми чистыми источниками энергии с экологической точки зрения, производство фотоэнергии является практически безотходным. Однако не следует забывать, что их изготовление требует заметных (а для кристаллических СЭ довольно значительных) материальных и энергозатрат. Фотовольтаические системы окупают энергию, направленную для их продукции, после 3-6 лет амортизации в зависимости от размеров, типа солнечных элементов (см. пункт 2.1), расходных материалов, монтажа и т.д. (для кристаллической технологии изготовления СЭ – порядка 6-10 лет). При анализе окупаемости затрат следует обратить внимание на тот факт, что после первоначальных инвестиций на приобретение и/или конструирование солнечной фотоэлектрической установки, дополнительных затрат на регулярную покупку топлива не требуется. В этом заключается неоспоримое преимущество фотовольтаики. Неизбежны только затраты, связанные с контролем рабочих режимов и с текущим и капитальным ремонтом, которые составляют незначительную часть общих стартовых инвестиционных вложений. Следует отметить, что «жизнеспособность» солнечной установки высокого качества рассчитана на 30-35 лет. Таким образом, после десятилетней амортизации фотовольтаическая установка дает в течении последующих 20-25 лет только чистую прибыль.

В отличие от солнечной энергетики, традиционное энергообеспечение нуждается в постоянном притоке необходимого горючего материала в газообразном, жидком или твердом состоянии. Затраты на их добычу, обработку и транспортировку до потребителя должны быть включены в общую оценку издержек, которая может достичь колоссального уровня. К этому добавляется загрязнение окружающей среды, например, в виде выбросов в атмосферу гигантского количества углекислого газа. С последним фактором связана общая экологическая угроза для жизни на планете (парниковый эффект, глобальное потепление и т.д.).

Стоимость одной фотовольтаической установки колеблется от 1000 US\$ до 3000 US\$ на один инсталлированный киловатт, что соответствует 0,5 –

1,10 US\$ на один произведенный киловатт-час. По сравнению с другими альтернативными источниками, цена фотоэлектрической энергии довольно высокая. Например, электроэнергия от ГЭС, ветрои биоисточников стоит от 0,03 US\$ до 0,25 US\$ за киловатт. Рыночная цена инверторов монотонно падала от 550 US\$/киловатт в 2005 году до 320 US\$/киловатт в 2011 году. Ожидается дальнейшее снижение их стоимости. И наконец стоимость монтажа фотоэлектрических систем, которая может испытывать очень сильные колебания, также в среднем уменшается с годами. Это происходит, в основном, за счет постоянно увеличивающихся размеров солнечных установок. Например, в США монтирование солнечных модулей обойдется в сумму около 350 US\$ за один киловатт.

2.4 Рынок солнечных батарей

К концу 2011 года фотоэлектрические мощности во всем мире впервые перевалили через беспрецедентную отметку в 60 гигаватт. Наиболее крупными производителями этой «зеленой» энергии являются страны Европейского Союза, США, Япония и Китай.

На альтернативную энергетику в Германии приходилось почти 12% из общей добываемой энергии, и до 20% – из общей выработанной электрической энергии, что составило около 110 тераватт-часов. Из них на фотовольтаику проходится до 8.2 тераваттчасов в год, что соответствует примерно полутора процентам от всей добытой в 2011 году электроэнергии. Диаграмма на рисунке 6 иллюстрирует распределение электроэнергии по источникам в Федеративной республике (на примере 2008 года). К началу 2010 года фотоэлектрических мощностей от новых инсталлированных солнечных модулей стало 7400 MWp.

Только в одной этой западноевропейской стране на настоящий момент установлено всего солнечных фотовольтаических модулей с общей мощностью в более чем 22 гигаватт, что обеспечивает ей второе место в мировом сообществе после Японии. Более чем треть солнечных модулей во всем мире приходится на долю ФРГ. Согласно прогнозам различных статистических агентств по энергетике удельный вес электроэнергии вырабатываемой из солнечной радиации может достичь в этой стране 15-18%. Однако такой высокий уровень осуществим только при условии среднего роста рынка фотовольтаики около 8% в год. По данным немецкого объединения UVS (Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft) число предприятий, занятых в фотовольтаической индустрии страны возросло с 3000 в 2003 году до 11000 в 2009 году, а число рабочих мест за тот же период времени - соответственно, с 13000 до 83000.

Японский рынок фотовольтаики рос с темпом в среднем 13% ежегодно, начиная с 1995 года. С того времени объем производства солнечных модулей вырос в десятикратном размере.



Возобновляемые источники составляют 15% от общего потребления электроэнергии (валовой величины) в 617 тераватт-часов в год, в том числе:

_	фотовольтаика	0,7% (4 тераватт-часа),
-	ГЭС (регенеративная сила воды)	

_	биоэнергия	 4,5%	(28	терава	тт-часов);

Рисунок 6. Распределение по источникам выработанной в Германии электроэнергии (по данным BDEW/AGEB за 2008 г.)

Такой прирост дал возможность стране осваивать оборот в 2 миллиарда долларов в 2003 году и до 12 миллиардов долларов в 2011 году. Причина лидерства Японии заключается в постоянной поддержке солярной индустрии со стороны государства. Примером служит реализация программы «70000 крыш», инициированная в 1997 году. Аналогом японской программы стала стартовавшая несколько позже (1 января 1999 г.) немецкая программа «100000 крыш» [1]. Через несколько лет была реализована следующая ее стадия в «миллион крыш».

Согласно закону о возобновляемых источниках генерированная «зелеными» производителями энергия гарантированно продается в общую энергосеть по заранее установленным государством тарифам [4]. Они очень выгодны для производителей, поскольку фиксированы на протяжении последующих 20 лет с момента первого подключения в общественную сеть. Так до 2007 года выкупная цена была установлена на уровне 0,492 Евро за киловаттчас, до 2010 года – 0,467 Евро за киловатт-час, до 2012 года - 0,391 Евро за киловатт-час, соответственно. С 2013 года тариф еще более снизится до 0,274 Евро за киловатт-час. Итоговая сумма государственной поддержки развития фотовольтаики к 2011 году составила 12 миллиардов евро. Несмотря на то, что выкупной тариф с годами снижается, производство СЭ до сих пор остается привлекательным как для инвесторов, так и для владельцев, поскольку цена на традиционные энергоносители неуклонно растет. Учитывая, что срок эксплуатации СЭ достигает 20-25 лет, производители энергии после срока окупаемости в 10 лет, получают чистую прибыль на протяжении 10-15 лет.

Следует отметить, что по объемам выпускаемых солнечных фотоэлектрических модулей Китай является мировым лидером на протяжении нескольких последних лет. Несмотря на то, что эта страна по количеству установленных в год модулей в настоящее время и не занимает первую позицию. все же по ежегодным темпам развития рынка фотовольтаики она намного превосходит своих конкурентов. Это объясняется высокой экономичностью производства, снижением товарного фактора цена/качество за счет дешевизны материалов и рабочей силы. Нет сомнений, что в и данном энергосегменте Китай станет лидером в ближайшие время. Анализ современного состояния мировой фотовольтаики хорошо изложен в работе [5].

Заключение

По конструкции, дизайну и принципу действия солнечные модули очень разнообразны. Кроме обычной плоскостной геометрии широкую популярность получили преобразователи с параболическим отражателем. С его помощью солнечный свет концентрируется на небольшую площадь, где располагается СЭ. Несмотря на то преимущество, что эффективность концентрированного преобразования резко возрастает, необходимо постоянно изменять угол наклона зеркального отражателя, фокусируя его на направление Солнца, что влечет за собой дополнительные энергозатраты. Другим вариантом является концентраторные фотопреобразователи на основе линз Френеля [6]. В отличие от параболических солнечных модулей, в которых радиация фокусируется после отражения от зеркал, прозрачные линзы Френеля концентрируют проходящий через них свет. При этом степень концентрирования может быть очень высокой - она в сотни раз превосходит предел для параболическо-отражательной геометрии солнечного модуля.

Поскольку сильно концентрированная радиация приводит к значительному увеличению температуры, то возникает возможность использования солнечного тепла для нагрева воды одновременно.

Таким способом солнечный модуль приобретает свойства термоколлектора и все связанные с ним преимущества. Оптимально разработанная комбинация солнечного термоколлектора и фотовольтаического преобразователя (СЭ) позволяет осуществлять два вида преобразования одновременно в одном устройстве-гибриде [7,8]. Физически это означает, что разные области солнечного спектра (инфракрасная и видимая) преобразуются в полезную энергию по двум разным каналам, интергированным в одном тепло-фотоэлектрическом концентраторном модуле [9].

Развитие рынка фотоэлектрических батарей и солнечных коллекторов в Казахстане получило дополнительный стимул после принятия три года назад закона о возобновляемых источниках энергии. Несмотря на то, что использование солнечных коллекторов получает большее распространение, планируется крупномасштабное производство также и солнечных элементов и батарей. В республике запущен завод по выпуску кремния полупроводниковой чистоты и кремниевых пластин. В отдельных регионах страны уже инсталлированы солнечные модули мощностью до 10 киловатт.

Важной задачей является создание отечественного экономичного производства солнечных батарей, стоимость которых должна быть ниже зарубежных аналогов. Проблемы альтернативной энергетики страны должны решаться комплексно для всех сегментов (ГЭС, солнечной, био- и ветроэнергетики), поскольку они являются приоритетными для республики. Государство целенаправленно поддерживает производителей «зеленой» энергии, гарантируя выкуп генерируемых ими мощностей по «защищаемым» производителями тарифам. Эти тарифы фиксируются на период окупаемости (например, 10 лет), и как правило, превышают среднерыночный уровень стоимости за 1 киловатт-час с обязательной поправкой на инфляцию. Государственная поддержка служит мощным стимулом для развития возобновляемых источников, в настоящее время особенно для строительства ГЭС.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Siemer, J. Grössere Anlagen im 100.000-Dächer-Programm / J. Siemer // Photon. 2003. B. 5. S. 30-35.
- 2. Granqvist, C.G. Materials science for solar energy conversion systems / C.G. Granqvist. Oxford : Pergamon, 1991. 312 p.
- 3. Стильбанс, Л.С. Физика полупроводников / Л.С. Стильбанс. М.: Советское радио, 1967. 452 с.
- Geiger, B. Die energiewirtschaftlichen Daten der Bundesrepublik Deutschland B. Geiger, F. Witke // BWK. 2003. B. 1/2. S. 56-63.
- Таурбаев Т.И., Лепесов К.К., Мусабек Г.К., Сейтбакалов С.К. Современное состояния мировой фотоэлектроники и проекты солнечной энергетики Казахстана // Алматы : РГП «Научный центр технологического прогнозирования», -2012. – 128 с.
- Performance of a concentrated photovoltaic energy system with static linear Fresnel lenses / P.J. Sonneveld [et al.] // Solar Energy. – 2011. – Vol. 85. – P. 432-442.
- 7. Антощенко, В.С. Тепло-фотоэлектрический преобразователь на основе концентраторных солнечных элементов / В.С. Антощенко, Ю.В. Францев, И.Х. Жарекешев // Вестник КазНУ. Серия физическая. 2011. Т. 39, № 4. С. 3 9.

- Антощенко, В.С. Автономные источники электрической и тепловой энегрии на основе оригинальных теплофотоэлектрических солнечных батарей / В.С. Антощенко, Ю.В. Францев, И.Х. Жарекешев // Известия НАН РК. Серия физико-математическая, – 2011. – № 6 (280). – С. 37 – 42.
- 9. Åntoshenko, V.S. Large area single element silicon solar cells based C-PV/T module / V.S. Antoshenko, Yu. V. Francev, I.Kh. Zharekeshev // Abstr. Inter. Conf. "CPVT-8", Toledo, Spain, April 2012. P.114–115.

КҮН СӘУЛЕСІ ТЕРМОТЕХНОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ ФОТОВОЛЬТАИКА

Жәрекешев И.Х.

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Мақалада энергияның альтернативтік екі көзінен саналатын күн энергиясын жылуға және электрлікке түрлендірулері қарастырылған. Түрлендірудің бірінші түрінің негізі – күн термиясының - күн сәулесі радиациясынан жылу энергиясын жинап отыратын термоколлектор болып табылады. Түрлендірудің екінші фотовольтаикалық типі фотоэффектіде, физикалық кұбылыс – күн сәулесі элементтерінің көмегімен жарықтың электр тоғына тікелей түрлену кезінде орын алады. Әртурлі термоколлекторлар мен фототүрлендірулердің жұмыс істеу принциптері мен құрылысы, олардың өзіндіқ құны мен дамуы баяндалған. Энергия нарығында күн сәулесі түрлендірудің экономикалық мүмкіндігі және бәсекеге қабілеттілігі талқыланған.

SOLAR THERMALTECH AND PHOTOVOLTAICS

I.Kh. Zharekeshev

al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

In the paper the converters of the solar energy into heat and into electricity, as two alternative energy sources are considered. The basis of the first type of the conversion – solar thermal – is a thermocollector, which accumulate heating from the solar radiation. The second one is photovoltaic, which functions on the photoeffect, a physical phenomenon of the direct light transformation into electric current by using solar cells. The operation principles and structures of various thermocollectors and photoconverters, their costs and applications are reported. Economical possibilities and competitiveness of the solar converters in the energy market are discussed.

УДК 622.235

БАЛАНСИРОВКА ВЗРЫВА

Григорьев С.И.

Департамент по ЧС Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан

Рассмотрены практические результаты воздействия сейсмических волн промышленных взрывов на дробление горных пород и на безопасность зданий и сооружений. Результаты сравнительных промышленных взрывов показали, что наиболее оптимальным вариантом проведения взрывных работ является применение способа «Точка равновесия взрыва».

Энергия взрыва

Механические волны, распространяемые в толще земной коры, называются сейсмическими волнами. Сейсмические волны являются сложным видом передачи энергии среде, ибо в твердых телах возможны только два вида сопротивления внешнему механическому воздействию: сопротивлению изменения объема и сопротивлению сдвига. Отсюда сейсмические волны могут быть продольными (волна сжатия, P-волна, первичная волна) и поперечными (волна сдвига, S-волна, вторичная), рисунок 1.

Дата: 1997. 9. 4 Время: 17.59.31. 57



Рисунок 1. Фрагмент сейсмической записи взрыва скважинного заряда ВВ. Время прихода сейсмических волн к точке наблюдения для продольной Р-и поперечной S-волн (Z-вертикальная, X и Y-горизонтальные компоненты сейсмического датчика)

Из рисунка 1 видно, что скорость распространения продольной Р-волны в разы больше S-волны. Интенсивность вертикальной составляющей значительно ниже интенсивности горизонтальной составляющей. Это свидетельствует о горизонтальной поляризации волнового поля, т. е. наибольшее количество сейсмической энергии содержат горизонтальные составляющие волнового поля (бесполезные формы механической работы).

Воздействие сейсмических волн на горную породу можно проиллюстрировать следующим рисунком 2.

Также установлено, что продольная Р-волна несет около 6-8% энергии источника, поперечная Sволна – 23-26% и, наконец, максимальную энергию (и соответственно минимальную скорость) от источника взрыва (сейсмического события) несут поверхностные волны Релея, Лява – Р_g 66-70%.

В данном случае нас интересует кинетическая энергия движения, которую несут подземные про-

дольная ударная Р-волна и частично S- волна сдвига, т.е. здесь имеется резерв, который можно использовать для повышения энергии взрыва на дробление горной массы за счет дополнительного параметра – оптимального расположения точки инициирования заряда BB [1]. Ибо энергия не исчезает и не создается вновь, но энергия одного вида может перейти в эквивалентное количество энергии другого вида.





Здесь также уместно упомянуть о работах М.В. Ломоносова (1711-1765). В своей работе «Рассуждения о твердости и жидкости тел» он пишет: «Все перемены, в натуре случающиеся, такого суть состояния, что сколько у одного тела отнимется, то умножится в другом месте. Сей всеобщий закон простирается и на самые правила движения, ибо тело, движущее своею силою другое, столько же оные от себя теряет, сколько сообщает другому, которое у него движение получает».

Высвобожденную кинетическую подземную сейсмическую энергию от источника взрыва условно можно посчитать с помощью понятия энергетический класс *K*, который характеризует очаг землетрясения (взрыва). Это характеристика, прямо связанная с энергией высвободившихся при взрыве (землетрясении) сейсмических волн. Сжатие и сдвиг горной массы характеризует магнитуда *M* сейсмического события(от латинского magnitudo – величина) – количественная характеристика величины очага землетрясения, определенная по записям землетрясений (сейсмограммам) на сейсмических станциях. Это безразмерная характеристика, позволяющая сравнивать источники (очаги) землетрясений по их сейсмической энергии.

Энергетические классы землетрясений варьируют в диапазоне значений от 0 до 18-20. В среднем по миру для пересчета магнитуд в значения энергетических классов (K) принята формула:

$$K = 4 + 1,8M$$
 (1)

В свою очередь, энергетический класс связан с сейсмической энергией E_s простым соотношением:

$$E_s = 10^K, (Дж) \tag{2}$$

Таким образом, исходя из магнитуды *М* сейсмического события, можно рассчитать энергетический класс *К* любого сейсмического события в т.ч. любого промышленного взрыва, высвобожденную кинетическую подземную сейсмическую энергию (совершенную работу) от источника взрыва, землетрясения и, наконец, коэффициент полезного действия взрыва.

Объект исследования

При проведении промышленных массовых взрывов на дневной поверхности для начального импульса (инициирования) далее ВВ в скважине точка размещения детонатора принимается в двух вариантах: нижнее (обратное) в подавляющем большинстве случаев и реже верхнее (прямое). Однако, на сегодня, нет каких-либо расчетов по точке размещения детонатора в скважинном заряде ВВ по его колонке (длине). В проектной документации, как правило, принимается, так называемое типовое расположение детонатора в заряде ВВ, т.е. детонатор располагают «на глазок» – в нижней части скважины на уровне подошвы уступа, в верхней на 0,5-1,5 м ниже верхней границы колонки заряда в скважине.

Профессор Кутузов Б.Н., например, рекомендует «... скважинные заряды в карьерах принято в настоящее время инициировать одной или двумя шашками, размещаемыми в нижней (на уровне подошвы уступа) и в верхней (в 1,0-1,5 от верхнего торца) частях заряда» [2]. Развивая, эту тему Ефремов Э.И. [3], проведя экспериментальные исследования на моделях доказал, что при инициировании заряда «снизу» активно разрушается вся модель, а результаты промышленного эксперимента таковы: выход негабарита при инициировании «снизу» - 0,8%, при инициировании «сверху» - 5,6%, при «встречном инициировании» - 1,1%, при размещении инициатора «в центре» - 1,7%. Также основное внимание должно быть уделено месту инициирования. В зависимости от точки инициирования, на качество взрыва, главным образом непосредственно влияет скорость волны сжатия в породе, иначе называемой продольной (первичной) или Р-волной [4].

При существующей практике размещения точки приложения инициирования заряда BB «на глазок» (снизу, сверху, в центре, встречное инициирование) мы получаем неполную мощность взрыва: ослабленные удары взрывной волны «вдогонку», либо встречные удары «в лоб», что существенно тормозит ударные волны и как следствие мощность взрыва, которая идет на дробление гонной массы.

Условно также можно принять, что у любого летящего тела (и взрыва колонкового заряда BB в том числе) есть две основные характеристики, влияющие на устойчивость – центр тяжести и центр сопротивления (или давления). Считается, что силы инерции приложены к центру тяжести, а силы сопротивления – к центру давления. Классический пример – стрела для лука. Центр тяжести – близко к тяжелому железному наконечнику, а центр сопротивления – у хвостового утолщения или оперения.

Поэтому, логично предположить, что должна быть какая-то правильно подобранная точка приложения (инициирования) взрывного импульса к колонке заряда с BB, влияющая на устойчивость детонации.

Далее будут рассмотрены практические результаты инициирования скважинного заряда BB с применением способа «Точка равновесия взрыва» [5].

Балансировка энергии сжатия и сдвига Р и S сейсмических волн

В 2011 г. на угольном разрезе «Каражыра» в Восточно-Казахстанской области проведено два массовых взрыва. Один типовой общим весом ВВ 13320 кг, второй – экспериментальный общим весом 14058 кг. Характер действия на окружающую среду – заряд рыхления.

Взрывные блоки типовой и экспериментальный по геометрии взрыва (диаметр скважин, заряд ВВ, высота уступа, сетка скважин и т.д.), характеристикам взрываемых горных пород, характеристикам и типам взрывчатых материалов были аналогичны, эпицентры взрывов географически близки. Разница проведения взрывов состояла в том, что при типовом взрыве используется типовое расположение боевиков «на глазок» одновременно с применением прямого и обратного инициирования для инициирования основного заряда ВВ в скважине. При проведении экспериментального взрыва детонатор в скважине располагается по расчету в «точке равновесия взрыва» (рисунок 3).

Во время проведения экспериментов Институтом геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (ИГИ НЯЦ РК) был выставлен профиль полевых сейсмических станций, на расстояниях от 200 м до 24 км от угольного разреза. Станции были укомплектованы 24-разрядным дигитайзером DAS-6102 PMD/eentec, США, в качестве сейсмометров использованы трехкомпонентные узкополосные сейсмические приемники СК-1П и СМG40-Т. Данные приборы обладают возможностью трехкомпонентной регистрации сейсмических сигналов (две горизонтальных и одна вертикальная компоненты). Кроме того, на самом разрезе вблизи от эпицентра взрыва был установлен акселерограф сильных движений CLA100. Взрывы также были зарегистрированы рядом станций стационарной сети мониторинга ИГИ НЯЦ РК на расстоянии ~ 80 км.

Характер записи объемных волн на каждой станции для обоих взрывов аналогичен, однако амплитуды экспериментального взрыва немного больше типового. Наблюдается для обоих событий характерная для карьерных взрывов волновая картина, четкие вступления продольной Р-волны, мощные поверхностные P_g-волны, а также наличие акустического сигнала (ударная воздушная волна) на всех записях [6].

На рисунке 4 приведены сейсмограммы типового и экспериментального взрывов по Z-компоненте станции KURK, отфильтрованные фильтром CKM.

Для всех станций были проведены замеры амплитуд после узкополосной частотной фильтрации фильтром с центральной частотой 5.0 Гц.

Для обоих взрывов были также определены динамические параметры: магнитуда *M* и энергетический класс *K*.



Рисунок 3. Схемы расположения детонаторов в типовом (черные точки) и экспериментальном (красная точка) взрыве

В таблице 1 приведены магнитуды и энергетические классы типового и экспериментального взрывов, рассчитанные по разным станциям, а также средние значения. Также видно, что высвобожденная подземная сейсмическая энергия экспериментального взрыва увеличилась на 25%.



Рисунок 4. Сейсмограмма типового (вверху) и экспериментального (внизу) взрывов. Z-компонента. Станция KURK, фильтр СКМ

Таблица 1.

Сойомоотонния	Boootoguuo ya	Типово	ой взрыв	Эксперимент	альный взрыв	
Сеисмостанция	Расстояние, км	М	K	М	K	
S09	15.7	2,90	6,60	2,96	6,79	
S16	17.8	2,74	7,23	2,82	7,33	
S17	19.8	2,61	6,19	2,71	6,38	
S19	23.9	2,51	6,41	2,56	6,45	
KURK	78	2,78	6,94	2,81	6,99	
Средни	е значения	2,708	6,674	2,772	6,788	
Высвобожденная сей	смическая энергия <i>Es</i> , Дж	472	20630	6137620		

Балансировка энергии поверхностных P_g сейсмических волн

В 2010-2011 гг. велись взрывные работы на месторождении строительного камня на карьере «Скальное» в черте промышленной зоны г. Усть-Каменогорска Восточно-Казахстанской области. Здесь же территориально расположены прудыиспарители (карты) жидких промышленных отходов производств одного из металлургического заводов города. Общий объем жидких отходов всех карт хвостохранилища около 10 млн. м³. Скальный грунт предназначен для реконструкции карт прудовиспарителей.

Ближайший борт дамбы карты №2 находится в 400 м от места проведения массовых взрывов (рисунок 5).



Рисунок 5. Общий вид со спутника охраняемых сооружений – прудов испарителей (карт) и мест проведения взрывных работ

При расчете сейсмического воздействия взрыва на охраняемые объекты (карты), проектом, на основании заключения РГП «Казахский государственный центр взрывных работ Республики Казахстан», принят вес взрываемого блока не более 2000 кг BB с учетом расстояния для охраняемых зданий и сооружений от мест проведения взрывных работ.

Опасения были вызваны по поводу сейсмической устойчивости гидротехнических сооружений (карт), которые находятся в непосредственной близости от места проведения взрывных работ, с учетом многократного воздействия взрывов.

Надо учесть, что общепринятым критерием сейсмической опасности промышленного взрыва являются повреждения, вызванные сотрясением почвы, которые связаны с поверхностными сейсмическими P_g -волнами. Важнейшие характеристики сейсмических волн это энергия, импульс и скорость. Таким образом, измерив скорость P_g -волн в результате взрыва можно прогнозировать степень повреждения зданий и сооружений. По Российской классификации предельно допустимые значения скоростей колебаний грунта для наземных и подземных охраняемых объектов в нашем случае определены 1-3 см/с [7]. В результате было принято решение осуществить мероприятия, направленные на предупреждение и снижение вредного воздействия опасных производственных факторов и их последствий: при взрывании каждого взрывного блока на карьере для снижения энергии поверхностных Р_g сейсмического волн взрыва перед охраняемыми объектами (карты №№2, 3) предусмотреть контурную щель предварительного откола параллельно фронта карт хвостохранилищ, играющей роль экрана для сейсмических волн, дополнительно в целях лучшей балансировки взрыва принять инициирование заряда взрывчатых веществ с расположением детонатора в «точке равновесия взрыва».

Сейсмический контроль территории мест проведения взрывных работ проводился с участием РГП КазНИИССА (Институт сейсмостойкого строительства и архитектуры, г. Алматы). Работы по сейсмоконтролю выполнялись с помощью цифрового комплекса РСМ-8 с акселерометрами (измерителями ускорений) ADXL и СПМ-16. Акселерометр применяется, как для измерения ускорения в сторону, в которую произошло смещение, так и для измерения ускорения, вызванного силой тяжести Земли.

Отрезная щель предварительного откола была использована при пробном взрыве в 535 кг ВВ. При этом сейсмическое воздействие по грунту на тело плотины, возбужденное пробным взрывом в 535 кг ВВ, составило по Российской 12-ти бальной шкале сейсмической интенсивности MSK-64 (Медведева-Шпонхойера-Карника) менее 3-х баллов (скорость колебаний грунта в основании плотины составила 0,045 см/с), по типовому взрыву в 1415 кг ВВ около 3-х баллов (скорость колебаний грунта в основании плотины составила 0,07 см/с) [8].

Третий и четвертый экспериментальные взрывы [9] были проведены по методу «Точка равновесия взрыва» и дополнительно с созданием щели предварительного откола.

Взрывные блоки типовой, пробный и экспериментальные по геометрии взрыва и характеристикам взрываемых горных пород, характеристикам и типам взрывчатых материалов были аналогичны. Разница заключалась лишь в размещении боевика в заряде ВВ в экспериментальном взрыве по расчету в «точке равновесия взрыва».

В частности при пробном взрыве взрывная волна, дошедшая до основания плотины отстойника карты №2 со скоростью 0,045 см/с (менее 1 балла), возбудила колебание водяной массы (около 2,0 млн. м³), которая в свою очередь раскачала тело плотины со скоростью 0,06 см/сек (около 3 баллов).

Во всех взрывах отмечено преобладание горизонтальной составляющей поверхностных сейсмических P_g-волн. Инструментальные данные сейсмического воздействия на плотины охраняемых сооружений (карт) по проведенным взрывам сведены в таблицу 2. Анализ полученных инструментальных данных по ускорениям и скоростям движения грунта свидетельствует о снижении энергии от взрывов 3, 4 поверхностных сейсмических Р_g-волн.

На рисунке 6 приведена гистограмма типового, пробного и экспериментальных взрывов по Х-компоненте сейсмоприемников, т.е. по направлению от плотин на взрыв.



Рисунок 6. Гистограмма по проведенным типовым, пробным и двум экспериментальным взрывам на карьере «Скальное»

Из гистограммы видно, что ни один из взрывов не достиг показателей скорости смещения грунта в 1-3 см/с, которая ограничивает относительно безопасную зону от зоны вероятной опасности. При этом, согласно отчетов РГП КазНИИССА при экспериментальных взрывах получен незначительный сейсмоэффект около 2-х баллов (скорость колебаний грунта в основании плотины составила 0,022 см/с), и соответственно *отсутствие смещения тела плоти*-

Таблица 2.

ны, равномерное улучшенное дробление скального грунта, «мягкое» воздействие на окружающую среду.

В конце 2011 г. независимой специализированной организацией дополнительно проведена экспертиза состояния прудов испарителей (карт) жидких производственных отходов. В результате установлено, что техническое состояния прудов-испарителей (карты №№2, 3) жидких производственных отходов соответствует требованиям промышленной безопасности.

Балансировка энергии ударных воздушных волн

Однако вернемся к нашим взрывам на угольном разрезе «Каражира».

Скорость акустического сигнала составила для типового взрыва v=331 м/с, для экспериментального взрыва v=336 м/с. Заметим, что обычная скорость звуковых волн при температуре воздуха 18-20 °С – 1240 км/ч или 344 м/с. Так как скорость звука в воздухе зависит от температуры, то она может быть вычислена по формуле:

$$C = 331 (1 + T/546),$$
 (3)

и соответственно можно «прикинуть», что температура воздуха в районе проведения взрывных работ была около 3-6 °С. Октябрь месяц, однако.

В таблице 3 приведены замеренные на Z-компоненте амплитуды акустического сигнала для типового и экспериментального взрывов.

Как видно из таблицы 3 по проведенным сейсмозамерам в нескольких точках временной сети профиля сейсмостанций амплитуды (Амр) акустической (ударной воздушной) волны для типового взрыва в среднем в 4.9 раза больше, чем для экспериментального.

№ взрыва	Название взрыва	Расход ВВ на взрыв, кг	Ускорение Р _g -волн, см/с ²	Скорость Р _g -волн, см/с	Смещение плотины, см	Баллы по шкале МСК-64
1	типовой	1415	7,95	0,085	1,5	> 3
2	пробный с отрезной щелью	535	3,9	0,06	1,2	~ 3
3	экспериментальный для карты №2	1284	0,01	0,018	нет	~ 2
4	экспериментальный для карты №3	1260	0,013	0,019	нет	~ 2

Таблица 3.

сейсмостанция	Амр для типового взрыва, нм	Амр для экспериментального взрыва, нм	Отношение амплитуд акустического сигнала
S07-PK	373,00	65,40	5,703364
S08-PK	311,90	60,80	5,129934
S09-PK	68,30	15,90	4,295597
S16-PK	66,40	14,30	4,643357
	4,943063		

Выводы

Таким образом, используя способ «точка равновесия взрыва» мы имеем: увеличение подземной мощности воздействия взрыва на горный массив на 20-25%, увеличение кпд взрыва на дробление горной массы, снижение поверхностной мощности (землетрясение) воздействия взрыва на здания и сооружения, снижение в 3-5 раз мощности воздействия ударной воздушной волны на людей, здания и сооружения. Как производные – повышение уровня промышленной безопасности и экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Пат. 25145 Республика Казахстан, КZ А4 F42D. Способ взрывания удлиненных скважин/ С.И. Григорьев; опубл. 15.12.2011, Бюл. № 12. 2011.
- 2. Б.Н. Кутузов. Методы ведения взрывных работ, часть 1, Разрушение горных пород взрывом, Москва, Горная книга, 2009 г., 471 с.
- Ефремов Э.И., Ищенко Н.И., Пономарев А.В. Выбор места размещения и параметров промежуточного детонатора при инициировании скважинных зарядов ВВ., Информационный бюллетень Ассоциации инженеров-взрывников Украины, январь-март, 2011 г., с.2-6.
- Ричард Л.Эш. Проектирование взрыва. Труды Американского института горных инженеров, инженеров-металлургов и нефтяников. «Недра», Москва, 1971 г., 456 стр.
- 5. Взрывной сайт Сергея Григорьева «Точка равновесия взрыва». URL: http:// www.grisi.narod.ru.
- 6. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование динамических характеристик карьерных взрывов 5,6 октября 2011 г. на угольном месторождении Каражира», инв.№ 4-2012, УДК 550.334, 2012 г.
- 7. Руководящий технический материал «Руководство по проектированию и производству взрывных работ при
- реконструкции промышленных предприятий и гражданских сооружений» РТМ 36.9-88, Москва, 1988.
- Отчет РГП КазНИИССА № 146-10/28-04-01, 2010 г. «Месторождение «Скальное». Сейсмический контроль территории при проведении взрывных работ».
- 9. Отчет РГП КазНИИССА № 10-11/28/-04-01, 2011 г. «Месторождение «Скальное». Сейсмический контроль территории при проведении взрывных работ».

ЖАРЫЛЫСТЫ ТЕҢГЕРУ

Григорьев С.И.

Қазақстан Республикасы Шығыс Қазақстан облысының ТЖ жөніндегі департаменті

Өнеркәсіптік жарылыстардың сейсмикалық толқындарының тау жыныстарының бөлшектенуіне және ғимараттар мен құрылыстардың қауіпсіздігіне әсер етуінің іс жүзіндегі нәтижелері қарастырылды Салыстырмалы өнеркәсіптік жарылыстар жарылыс жұмыстарын жүргізудің неғұрлым оңтайлы нұсқасы «Жарылыстың тепе-теңдік нүктесі» тәсілін қолдану екндігін көрсетті.

BLAST BALANCING

S.I. Grigoryev

Emergency Department, East-Kazakhstan Region, Republic of Kazakhstan

The practical results of the influence of the seismic waves industrial blast are considered on crushing the mountain sorts and on safety of the buildings and buildings. The Results comparative industrial blast have shown that the most optimum variant of the undertaking the blasting is an using the way "Point of the balance of the blast".

БАЗА ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМ РЕАКТОРАМ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹⁾ Горин Н.В., ¹⁾ Корнеев А.А., ¹⁾ Липилина Е.Н., ¹⁾ Чуриков Ю.И., ²⁾ Архангельский Н.В.

¹⁾ РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Челябинская обл., Россия ²⁾ Госкорпорация «Росатом», Москва, Россия

Создана оболочка базы данных и начато наполнение ее информацией по советским/российским и американским исследовательским реакторам. База предназначена для помощи экспертам при идентификации «неизвестного ЯМ» с целью определения мест его производства и хищения. Одновременно база данных может быть полезна как для исследовательских, конструкторских и информационных целей, так и для сохранения и концентрации знаний. Рассмотрены возможности идентификации твэлов и ТВС активных зон исследовательских реакторов СССР/РФ и США. Собраны рисунки твэлов, опубликованные в различных научных изданиях, показано, что твэлы разные и для их идентификации в большинстве случаев можно ограничиться осмотром и измерением размеров. Однако если твэл или ТВС реактора полностью разрушены, то для идентификации обломков становится необходимым измерение обогащения, изотопного состава ядерного материала и состава примесей.

Введение

Реальным механизмом предотвращения незаконного оборота ядерных материалов (НОЯМ) является их учет, контроль и физическая защита, но поскольку илеальных систем зашиты не существует, то хиядерного материала (ЯМ) возможно. шение В частности, злоумышленников может привлекать топливо исследовательских реакторов, так как оно изготовлено из высокообогащенного урана. Согласно базе данных МАГАТЭ [4] на январь 2013 г. в мире насчитывалось 698 исследовательских ядерных установок, из них 244 - действуют, 130 - остановлены, 316 - выведены из эксплуатации, 4 - строятся, 4 – запланированы к сооружению. В России – 89 исследовательских ядерных установок, из них 64 - действуют, 6 - законсервированы, 16 - выводятся из эксплуатации, 2 - строится, 1 - планируется к сооружению [1].

При задержании «неизвестного ЯМ» и для пресечения дальнейших противоправных действий необходима его идентификация с целью определения мест производства, эксплуатации и хищения. Для помощи экспертам при идентификации специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ и LLNL было предложено [2, 3] создать базу данных по характеристикам всех исследовательских реакторов в мире, как бывших, так и действующих, с помощью которой возможно идентифицировать и «неизвестное» топливо, и «неизвестные» твэлы и ТВС активных зон. Существующая база данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам [4] практически не содержит данных по топливу и для идентификации не может быть использована.

База данных

В настоящее время база данных создана. Программное обеспечение разработано в среде Microsoft Access 2010, все инструкции и руководства – с использованием текстового редактора Microsoft Word 2010, все загруженные презентации выполнены в среде Microsoft PowerPoint 2010. На персональном компьютере установлена операционная система Windows XP, офисный пакет Microsoft Office 2010, программное обеспечение сканирования и распознавания графической информации, антивирусные программы. Требования к персональному компьютеру – процессор Pentium IV, оперативная память 1 Гбайт, съемный жесткий магнитный диск емкостью не менее 250 Гбайт, привод DVD-RW, монитор с экраном не менее 22 дюймов. Пользователь базы данных оперирует с информацией посредством графического интерфейса в виде форм Microsoft Access 2010. Объем оболочки базы ~6 Мб. объем введенной информации по исследовательским реакторам первого поколения СССР (7 реакторов) и США (10 реакторов) ~700 Мб. Пока, с малым объемом введенной информации, база не эффективна ни для решения задач идентификации неизвестного топлива, ни для противодействия незаконному обороту ядерных материалов, ни даже как справочник по характеристикам реакторов. Работы по наполнению базы информацией об исследовательских реакторах продолжаются и, по мере наполнения, ее эффективность будет повышаться.

Одно из основных назначений базы данных – хранить информацию в форме, удобной для подбора твэла (ТВС), совпадающим с «неизвестным ЯМ» наилучшим образом. Критериев совпадения несколько – по форме, по размерам, по особенностям конструкции, по типу ЯМ, по элементному составу, по плотности, по обогащению, по легирующим добавкам и примесям. Одновременное удовлетворение всем критериям означает, что «неизвестный ЯМ» идентифицирован как твэл или ТВС конкретного исследовательского реактора и, тем самым, сразу же определяется место его изготовления и эксплуатации.

Идентификация «неизвестного» ЯМ

Проблема идентификации может быть сформулирована следующим образом. В распоряжение эксперта поступил «неизвестный ЯМ» в виде целой детали или фрагмента, и существуют подозрения, что он может быть твэлом или ТВС исследовательского реактора. Требуется либо опровергнуть подозрения, либо полтвердить и назвать этот реактор. При решении задачи действия эксперта должны быть основаны на том, что исходные твэл/ТВС были изготовлены на металлообрабатывающих станках и содержали плоские, цилиндрические, конические или сферические поверхности. Качество обработки поверхностей при изготовлении было высоким, но в результате противоправных действий и незаконного оборота они могли получить повреждения. На первом этапе идентификации эксперту следует определить геометрические характеристики – радиусы цилиндрических или сферических поверхностей, линейные размеры параллелепипеда или пластины, длины стержней и т.д. - и ввести запрос в базу данных, т.е. попытаться идентифицировать деталь самым простым способом по форме и геометрическим размерам. Если «неизвестный ЯМ» действительно является твэлом или TBC исследовательского реактора, а база данных содержит информацию обо всех реакторах, то этот реактор будет обнаружен, возможно, среди нескольких других, имеющих либо одинаковые твэлы и ТВС, либо разные, но с совпадающими некоторыми размерами. По эскизу TBC, имеющемуся в базе, эксперт сможет проверить надежность идентификации, а для фрагмента твэла/ТВС подготовить эскиз отсутствующих частей.

Если попытка идентификации по форме и размерам окажется неудачной (например, из-за погрешностей измерений в связи с малыми размерами фрагмента), то следует провести следующий более трудоемкий этап идентификации – определить плотность ЯМ, его элементный состав, обогащение, легирующие добавки и примеси. При этом эксперт полагает, что злоумышленник не сможет изменить в ЯМ ни плотность, ни элементный состав, ни обогащение урана. Он сможет легко изменить элементный состав и концентрацию урана в топливном растворе, добавив в него какой-либо жидкости, но обогащение урана останется неизменным. Повторный запрос в базу данных по дополнительным критериям поиска сможет подтвердить или опровергнуть исходное подозрение эксперта.

Идентификация на основе измерения геометрических размеров и характеристик ЯМ применима, главным образом, к необлученным твэлам и ТВС. Топливо, отработавшее свою кампанию в активной зоне исследовательского реактора, будет иметь высокий уровень остаточного γ-излучения, и любые измерения в интересах противодействия НОЯМ при такой радиационной обстановке становятся затруднительными, но, с другой стороны, радиация – эффективный защитный барьер от противоправных действий.

ИНДИВИДУАЛЬНОСТЬ ТВЭЛОВ И ТВС И возможность их идентификации

Объем опубликованной к настоящему времени информации по исследовательским реакторам обширен, ее анализ показывает, что устройство активной зоны, конструкции твэлов и ТВС, их основные геометрические размеры, конструкционные материалы и обогащение топлива подробно представлены в открытой печати для всех реакторов СССР/РФ и США. Для некоторых реакторов опубликованы основные легирующие добавки в топливо (на уровне ~3-10%), однако элементный состав топлива на уровнях 0,1-1% публикуется очень редко. Поэтому на первых этапах создания базы данных следует ограничиться той информацией, которая представлена в открытой печати и не относится к «чувствительной».

Для демонстрации того, что твэлы и ТВС настолько разные, что эксперт различит не только целые твэлы и ТВС, но и их фрагменты, достаточно изобразить твэлы и TBC на одном рисунке в одном масштабе. Однако наибольшая длина ТВС реактора BGRR составляет ~3300 мм, а минимальный диаметр твэла реактора ИВГ ~2,2 мм, и в едином масштабе они несопоставимы. Поэтому на рисунках 1а и 1б некоторые советские/российские и американские твэлы и ТВС показаны в разном масштабе для наглядности изображения, но с указанием хотя бы одного характерного размера. Некоторые особенности конструкции не показаны, но в первоисточниках [5-51] они приведены. Твэлы и ТВС простейших форм, например, стержни реакторов Ф-1, СР-1, Х-10, EBR I, БР-1, -2 на рисунке не показаны. Также не представлены рисунки деталей из делящегося материала активных зон импульсных реакторов, все они собраны в двух книгах [10, 11] и их анализ может быть проведен достаточно просто. Рисунки твэлов и ТВС заимствованы из статей, книг [7-18], материалов международных конференций [19-41], в том [24-41], заводовчисле Женевских сайтов производителей ТВС и эксплуатирующих организаций [42, 44]. Безусловно, рисунки в журнальных статьях это не чертежи, но, тем не менее, они содержат достаточно информации для идентификации. На рисунках ЯМ выделен красным цветом, оболочки и неотъемные конструкционные элементы показаны другим цветом. Топливные блоки ИГР и TREAT, представляющие собой графитовую матрицу с ураном, раскрашены серым цветом с вкраплением красного.

В твэлах исследовательских реакторов редко используются урансодержащие материалы без инертного разбавителя. Наиболее распространенная топливная композиция – диоксид, закись-окись или силицид урана в алюминиевой матрице. Встречаются другие дисперсионные композиции с матрицами из нержавеющей стали, магния и других материалов, однако они не нашли широкого применения в твэлах исследовательских реакторов. В ходе эволюции изделий для ядерной энергетики на Новосибирском заводе химконцентратов [41] пройден путь от ТВС первого поколения с твэлами стерженькового типа к тепловыделяющим сборкам второго поколения с трубчатыми твэлами (ВВР-М2. ИРТ-2М. МР. ВВР-Ц). В настоящее время завод изготавливает ТВС третьего поколения с тонкостенными трубчатыми твэлами (ВВР-М5, ИРТ-ЗМ, ИВВ-10). Совершенствуется также топливная композиция твэлов. Повышение концентрации урана с 1,3 г/см³ до 1,7 г/см³, достигнутое в 70-е годы, стало возможным, благодаря переходу с уран-алюминиевого сплава к топливной композиции в виде диоксида урана, диспергированного в алюминиевой матрице. В 80-е годы освоена топливная композиция с концентрацией урана 2,5 г/см³.



Рисунок 1а. Твэлы и ТВС реакторов МТR(1), СМ(2), ATR(3), ИГР(4), ТВР(5), EBR-I(6), BGRR(7), TREAT(8), ИВГ.1(9), ТВС (10) и твэлы (11) нового поколения, ПИК(12), РФТ(13), TRIGA(14). Размеры в мм.

В настоящее время существует более десятка видов топлива для исследовательских реакторов МР, ИРТ, ВВР-М, ВВР-К, ИВВ-2М, ИР-8, БР-10, ИБР-30, ИР-НИИАР, отличающегося по составу, числу элементов и вариантам сборок. Топливные элементы и сборки отличаются своей геометрией и степенью загрузки ураном. Топливные композиции также существенно отличаются друг от друга. Большинство реакторов используют топливо UO₂+Al.

Из рисунков 1a и 1б видно, что российские и американские TBC отличаются друг от друга по конструкции и размерам, и эксперт сможет надежно идентифицировать TBC или ее фрагмент достаточных размеров. Труднее определить тот реактор, к которому эта ТВС принадлежит. Это справедливо как для российских, так и для американских реакторов. Например, российские ТВС одного типа входят в состав активных зон нескольких реакторов, расположенных не только в РФ, но и в СНГ и за рубежом, но число таких реакторов невелико, и это упрощает задачу. Лействительно, активные зоны реакторов РБТ-6 и РБТ-10 состоят из ТВС, отработавших свою кампанию в реакторе CM-2. Поэтому однозначно определить реактор, которому принадлежит такая ТВС, будет трудно, но все эти реакторы эксплуатируются в одном научном центре – ГНЦ НИИАР, и это упрощает процесс идентификации. Другой пример неопределенности связан со стержневыми твэлами реакторов ПИК (рисунок 1а, позиция 12), СМ, ИВГ (рисунок 1а, позиция 9) и твэлов нового поколения (рисунок 1а, позиция 11). Характерная особенность, позволяющая идентифицировать их по внешнему виду, связана с закрученностью вдоль оси. Эксперт относительно просто идентифицирует эти твэлы, так как закрученная пластина и закрученные стержни крестообразного и квадратного сечения заметно различаются между собой. Однако, твэлы реактора ПИК отличаются от твэлов реактора СМ-3 только по высоте (твэлы ПИК – 500 мм, твэлы СМ-3 – 350 мм). Поэтому если приходится идентифицировать обломок твэла длиной менее 350 мм, могут возникнуть трудности при определении реактора.



Рисунок 1б. Твэлы и ТВС реакторов SRHFD(1), ИРТ-3M(2), MP(3), РФТ(4), МИР(5), ИРТ-2M(6), PBF(7), HFIR(8), BBP-Ц(9), AM(10), ИРТ-M2(11), BBP-M5(12), ИBB-10(13), ИР-50(14). Размеры в мм.

Следует обратить внимание на различия в конструкции российских и американских пластинчатых твэлов, из которых собраны ТВС реакторов СМ-2 (рисунок 1а, позиция 2), МТК (рисунок 1а, позиция 1), АТК (рисунок 1а, позиция 3). Для реактора СМ-2 твэлы плоские, для американских ИР – изогнутые. Благодаря этому, можно легко отличить российские твэлы от американских. Российские пластинчатые твэлы использовались только в реакторе СМ-2, тогда как американские – в нескольких реакторах, например, MTR, ATR, CP-5, BSR, GSR, LITR, ETR.

Топливный блок реактора TREAT (рисунок 1а, позиция 8) не похож ни на один твэл или ТВС любого ИР и его практически невозможно ни с чем перепутать. По материалу – это графит, урана в нем мало и его можно рассматривать как примесь, блок похож на топливный блок реактора ИГР (рисунок 1а, позиция 4), который также является графитом, но размеры и другие конструктивные особенности у этих блоков разные (например, срезанные углы у блоков TREAT, осевое отверстие у блоков ИГР). Очевидно, что если появится необходимость идентифицировать небольшой обломок блока, не содержащий информации об его первоначальных размерах или конструктивных особенностях, то придется проводить измерения концентрации урана и элементного состава графита. Блок TREAT представляет собой гомогенную смесь графита и окиси урана, блок ИГР – графит пропитанный раствором UO₂(NO₃)₂ и затем просушенный при температуре ~1000 °C.

Среди исследовательских реакторов существует класс импульсных реакторов, наиболее широко представленных в США и РФ [10, 11]. Ранее в работах [2, 3, 5, 6] были продемонстрированы возможности идентификации топливных деталей активных зон этих реакторов и показано, что они отличаются друг от друга как по форме и геометрическим размерам, так и по материалу, агрегатному состоянию (металл, графитовая матрица, пропитанная ураном или раствор), наличию защитного покрытия, герметизирующего чехла и т.д. Этот вывод интуитивно был почти очевиден перед началом работ, он основывался на том, что каждый импульсный реактор настолько индивидуален, что вероятность совпадения топливных деталей мала. Различия в конструкции существенно облегчают процесс идентификации. Действительно, если деталь не переплавлена, не растворена в кислоте и не превращена в скрап, то для предварительной идентификации достаточно ограничиться внешним осмотром. Эксперт безошибочно (или с очень большой вероятностью) определят происхождение «неизвестного ЯМ», выполнив, при необходимости, измерения размеров и массы. Такая идентификация возможна даже в том случае, когда похищенная деталь АЗ реактора повреждена (например, разбита на несколько обломков разных размеров), но ее фрагменты все-таки позволяют восстановить и оценить форму и размеры исходной детали.

Одновременно с исследовательскими реакторами с активными зонами на основе сплавов и оксида урана в СССР и США создавались реакторы, активная зона которых представляла собой раствор соли урана в воде. При идентификации топливного раствора его внешний осмотр малоэффективен. Для этого необходимо, прежде всего, измерение плотности и концентрации урана в растворе и, лишь как окончательная мера, измерение обогащения. Состав примесей в растворе малоинформативен, так как он может медленно изменяться при перетариваниях по мере эксплуатации реактора, а может существенно измениться в результате одного противоправного действия. Если все-таки идентифицировать раствор по примесям и концентрации, то необходимо знать периодически обновляемую информацию в базе данных о составе топливного раствора реактора.

В США существовал еще один тип исследовательских реакторов первого поколения – на расплавленных солях, например, реактор ARE [49], топливом которого была соль NaF–ZrF₄–UF₄. При комнатной температуре топливная соль будет в виде порошка или куска плава. Ее внешний осмотр малоэффективен, для идентификации необходимо измерить плотность, элементный состав и, возможно, обогащение урана.

Таким образом, исследовательские реакторы, работающие на постоянном уровне мощности, уже не так индивидуальны, как это было в случае импульсных реакторов. Индивидуальность сохранялась для первых ИР (Ф-1, РФТ, ТВР, АМ), но активные зоны серийных реакторов (ИРТ и ВВР) были составлены уже из типовых ТВС. По мере развития ТВС совершенствовались и эксплуатировались в составе модернизированных реакторов. Сами твэлы и ТВС могут быть идентифицированы относительно просто, но идентификация реакторов, где эта ТВС эксплуатировалась, становится затруднительной.

ПРОЦЕДУРА ИДЕНТИФИКАЦИИ

Предварительные проработки показывают, что любая топливная деталь реактора может быть описана относительно небольшим набором параметров. Их будет задавать эксперт при формировании запроса к базе данных при идентификации:

 несколько геометрических форм – пластина, цилиндр, сфера, параллелепипед, витой твэл;

– несколько геометрических размеров, например, для твэла реактора СМ-2 необходимо задать длину, ширину, толщину пластины и топливного слоя. Для изогнутой пластины реактора МТК необходимо задать на один параметр больше – радиус кривизны пластины, – хотя на малых и деформированных фрагментах пластины эксперт может не заметить ее кривизну;

 параметры оболочки детали – материал и толщину оболочки, маркировку или особенности конструкции, например, ребра охлаждения, как на американском реакторе BGRR;

 параметры самой детали – материал, обогащение, плотность, массу, концентрацию ЯМ;

БАЗА ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИМ РЕАКТОРАМ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В Идентификация топлива х																	
Укажит	е клю	и иденти	фикации, в	ведите з	начен	ия ключеі	і и их доп	уск:									
Изотопы		Значение	е, допуск	Добавки	4	Значение	, допуск	Приме	и Зна	чение, д	опуск	Форма детали		Геом. парал	иетры	Значение	, допуск
Pu238				AI				Ag				куб		длина			
Pu239				С				Al				кольцо		высота		133	1
Pu240				Fe				В				цилиндр		ширина			
Pu241				Mg				Ba				шар		диаметр			
Pu242				Мо				Be				призма		радиус		21	1
U234				Nb				С				стержень		площадь			
U235		90	1	Ni				Ca				пластина гнутая		объем			
U236				w				Cd				пластина прямая					
U238				Zr				Со				витой твэл					
								Cr				паралелепипед					
								F				труба					
								Fe									
								Gd			-						
			Значени	e,	Допус	ж	Текс	г запроса	на иден	тификаци	ю						
	Macc						Изот	Изотоп: U235; значение-90; допуск-1									
	Wate	адетали.					Геом	Геометрические размеры: высота-133; допуск-1									
Ma	териа	1 детали:	графит				Мате	Геометрические размеры: радиус-21; допуск-1 Материал летали-графит									
Материал покрытия:								Толщина покрытия-1; допуск-0.1									
Толщина покрытия: 1 0.1						Map	Маркировка-*48F*										
Manuunanua A4058							4										
Маркировка.																	
										۰. ۲		x =			_		
+	/[*]	= >	< <> A	n Or N	ot Lik	æ ()	2	Показать	запрос	🐺 Удал	ить запр	ос Выполнить	иден	тификацию	Πα	оказать отч	ет

Рисунок 2. Бланк запроса для идентификации «неизвестного ЯМ»



Рисунок3. «Информационный лист» базы для реактора Ф-1. Открыта вкладка «Общие».

– элементный состав топлива может быть задан несколькими делящимися изотопами U или Pu, и некоторыми ~20...25 другими элементами, которые могут быть как примесями, сопутствующими технологическому процессу завода-изготовителя, так и легирующими добавками.

При проведении идентификации экспертом либо определяется форма «неизвестного ЯМ», либо в случае малых размеров фрагмента прогнозируется. При этом измеряются линейные размеры пластины (длина, ширина и толщина), диаметр цилиндрической или сферической поверхности, длина и диаметр стержня и т.д. и вводятся эти результаты в запрос. На рисунке 2 представлена форма запроса, которая заполняется экспертом при идентификации неизвестного топлива или детали. В каждом запросе будут заполняться только несколько полей из перечисленных. На первом этапе идентификации будут заполнены поля по форме и размерам детали, на втором этапе – поля элементного состава, легирующих добавок, примесей и т.д.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

Случаев пропажи и обнаружения топлива исследовательских реакторов не может быть много, и поэтому база данных, созданная только для противодействия, будет не столько эксплуатироваться, сколько находиться в режиме ожидания, т.е. обнаружения «неизвестного ЯМ». Поэтому целесообразно создавать такую структуру базы, которая была бы одновременно полезна как для исследовательских, конструкторских, информационных целей, так с целью концентрации знаний. На рисунке 3 представлен один «информационный лист» такой базы о первом советском реакторе Ф-1. В его верхней части представлено название реактора, страна и индекс реактора в базе данных МАГАТЭ, указан статус реактора («в эксплуатации», «остановлен», «демонтирован»), дата постановки под гарантии МАГАТЭ, наличие на реакторе системы учета и контроля ЯМ. Ниже, на нескольких вкладках, систематизирована информация по основным характеристикам реактора, его топливу и деталям, организациям и опубликованным первоисточникам:

«Общие» – приведено количество деталей и общая масса ЯМ в активной зоне реактора, расположена «иконка», открывающая таблицу физикотехнических характеристик реактора и представлен обзор публикаций о реакторе, а так же ряд фотографий.

«Активная зона» - расположены поля «Компоновочная схема АЗ», «Охлаждение», «Управление» и «Защита», а так же представлены фотографии и эскизы активной зоны. Эти информационные поля, как краткие справочные материалы, заполняет администратор базы из первоисточников, введенных в базу и относящихся к этому реактору. Одно из достоинств базы в том, что в нее введены отсканированные первоисточники без сокращений и это дает возможность пользователю самому выбирать интересующую информацию сообразно своим целям. Фотографии и эскизы активной зоны эксперт может использовать при идентификации твэлов и TBC, а при идентификации фрагментов твэлов и ТВС может использовать эскизы для определения их недостающих частей.

«Детали и топливо» – представлено описание топлива и приведена подробная информация о каждой детали с фотографиями и эскизами. Информация на этой вкладке будет «чувствительной» и доступ к ней будет ограничен.

«Организации» – перечислены предприятияразработчики реактора, топлива, эксплуатирующая организация и приведена необходимая контактная информация, которая поможет оперативно связаться с владельцами идентифицированного ЯМ.

«Источники информации» – перечислены все имеющиеся в базе первоисточники. Эта вкладка необходима, прежде всего, пользователям, использующим базу как справочник по реакторам или как базу знаний. Обзор этих первоисточников выполнен администратором базы и помещен на вкладке «Общие».

При работе с базой данных пользователи могут преследовать разные цели и использовать ее, прежде всего, по своему основному назначению как инструмент противодействия НОЯМ. В этом случае число экспертов будет малым и каждый из них должен будет иметь права доступа ко всем ее ресурсам. Возможно использовать базу данных как библиотеку, где собраны и сохранены первоисточники – отчеты, книги, статьи, доклады, диссертации, патенты, адреса наиболее представительных сайтов Internet. При использовании базы в этом качестве число пользователей будет наибольшим и, скорее всего, они будут иметь право доступа к массиву общедоступных первоисточников и разные права доступа к массиву «чувствительной информации».

Заключение

Таким образом, база данных по характеристикам исследовательских реакторов, их деталей и топлива, окажет помощь экспертам в идентификации «неизвестного ЯМ», определении мест его изготовления и хищения, т.е. будет способствовать противодействию незаконному обороту ядерных материалов. Одновременно, база данных будет полезна широкому кругу специалистов по исследовательским реакторам и позволит сохранять и концентрировать знания, накопленные за 70 лет развития.

База данных создана в рамках партнерских проектов МНТЦ №3596 и №3992.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Н.П. Волошину (РФЯЦ-ВНИИ-ТФ) А.П. Васильеву (НИКИЭТ) и В.А. Павшуку (РНЦ Курчатовский институт») за поддержку направления работ, поблагодарить специалистов РФЯЦ-ВНИИТФ Н.П. Савину и Е.А. Прудникову за помощь в поиске информации, А.Н. Ахлюстина, М.В. Красносельских, Д.И. Левченко, И.В. Нефедову, В.И. Тальдрика и А.В. Федорова за подготовку материалов по конструкциям твэлов и ТВС, а также выразить благодарность американским коллегам M. Kristo, I. Hutcheon, W. Dunlop (LLNL) и D. Chamberlain (ANL) за полезные дискуссии при обсуждении постановки и результатов работ.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Исследовательские ядерные установки России. / Под редакцией Н.В.Архангельского, И.Т. Третьякова, В.Н. Федулина // ОАО «НИКИЭТ», 2012 326 с.
- Идентификация топливных деталей исследовательских реакторов / Н.В.Горин [и др.] Атомная энергия. 2007. Т. 102, вып. 4. – С. 233–237.
- Возможности идентификации твэлов и ТВС исследовательских реакторов СССР и США первого поколения / Н.В.Горин [и др.], там же, – 2012, –Т.113, – Вып.4, – С.218-222.
- Электронная база данных МАГАТЭ по исследовательским ядерным установкам / [Электронный ресурс] http:nucleus.iaea.org/RRDB/.
- Особенности идентификации стержневых твэлов ЯРД / И.И.Дерявко [и др.] Вестник НЯЦ РК. 2010. Вып. 4. с. 95– 105.

- Идентификация цирконий-урановых твэлов исследовательского реактора ИВГ.1М. / И.И.Дерявко [и др.], там же, 2011, Вып. 2, – С.91–97.
- 7. Энергетические, опытные и исследовательские ядерные реакторы: Альбом ядерных реакторов. / М.: Атомиздат, 1959.
- 8. Бать, Г.А. Исследовательские ядерные реакторы / Г.А.Бать, А.С.Коченов, Л.П.Кабанов. М.: Энергоиздат, –1985. 264 с.
- 9. Гончаров, В. В. Исследовательские реакторы. Создание и развитие / В.В. Гончаров. М.: Наука, –1986, 318 с.
- 10. Колесов, В.Ф. Апериодические импульсные реакторы / В.Ф.Колесов. РФЯЦ-ВНИИЭФ, г.Саров, 2000.
- 11. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ / Леваков Б.Г. [и др.] РФЯЦ ВНИИТФ, Снежинск, 2002.
- 12. Цыканов, В.А. Тепловыделяющие элементы для исследовательских реакторов / В.А.Цыканов. ГНЦ РФ НИИАР, 2001, Димитровград.
- 13. Исследовательские реакторы института и их экспериментальные возможности, Димитровград-10, НИИАР, 1991.
- Круглов, А.К. Как создавалась атомная промышленность СССР / А.К.Круглов. Москва, ЦНИИАтоминформ, 1995.
 Жежерун, И.Ф. Строительство и пуск первого в Советском Союзе атомного реактора / И.Ф.Жежерун. М.: Атомиздат, 1978
- 16. Шабалин, Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах / Е.П.Шабалин. М.:, Атомиздат, 1967.
- 17. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Препринт НЯЦ РК №00-12, Курчатов, 2000.
- 18. Атомной энергетике XX лет. / М.: Атомиздат, 1974.
- 19. Материалы международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы: Наука и высокие технологии» / г.Димитровград, 25-29 июня 2001 г.
- 20. Материалы международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы в 21 веке» / ФГУП НИКИЭТ, Москва, 2006 г.
- 21. Материалы VIII российской конференции по реакторному материаловедению / Димитровград, 2007.
- 22. Материалы 11-го ежегодного российского совещания «Безопасность исследовательских ядерных установок» / Димитровград, 2009.
- 23. Материалы международной научной конференции «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях» / ГНЦ РФ НИИАР, Димитровград, 5-9 декабря 2011.
- 24. Программа исследований и опыт работы на реакторах Окриджской национальной лаборатории / М.Рамси, С.Кэгл Труды I Женевской конференции, т.2. Физика; экспериментальные реакторы. М., Гос.изд-во.физ.мат. лит. –1958, –С. 324–355.
- 25. Алиханов, А.И. Опытный физический реактор с тяжелой водой. / А.И.Алиханов [и др.], там же, -Т.2, -С.391-396.
- 26. Кружилин, Г.Н. Реактор для физических и технических исследований / Г.Н.Кружилин, там же, –Т.2, –С.507-522.
- 27. Вейнберг, Реактор для испытания материалов и другие исследовательские реакторы этого типа / Венберг, Колл, Мэнн, там же, –Т.2, –С.473—491.
- 28. Реактор для испытания материалов. Программа опытов и эксплуатация /Дон, Хафменн, там же, –Т.2, –С.312-323.
- Производство тепловыделяющих элементов для реактора Брукхейвенской национальной лаборатории / Гуринский Д. [и др.], там же, –Т.9. Технология реакторов и химическая обработка ядерного горючего, –С.274–285.
- 30. Тепловыделяющие элементы реактора MTR / Каннингем Дж.Э., Бойл Э.Дж., там же, т.9, с.252-257.
- Гончаров, В.В. Некоторые новые и реконструированные исследовательские реакторы / В.В.Гончаров [и др.] Труды II Женевской конференции, – Т.2. Ядерные реакторы и ядерная энергетика, М.: Атомиздат, –1959, –С.243–318.
- 32. Лейпунский, А.И. Экспериментальные быстрые реакторы в СССР / А.И.Лейпунский [и др.] Материалы Второй Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958. М.: Доклады советских ученых, Ядерные реакторы и ядерная энергетика, –1959, –С.215-231.
- 33. Лейпунский, А.И., Исследования по физике реакторов на быстрых нейтронах / А.И.Лейпунский [и др.], там же, Женева, 1959, –С.377-397.
- 34. Импульсный реактор TREAT с графитовым замедлителем для экспериментов по кинетике / Г.А.Фройнд, Х.П.Искендериан, Д.Окрент Доклад Р-1848 на 2-ой Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии, –1958, –Т.10, –С.461.
- 35. Описание и конструкция реакторов-водоподогревателей / Кинг. Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Т.2, Физика; экспериментальные реакторы, М.: ГИФМЛ, 1958
- 36. Исследования устойчивости на реакторе EBR-I / Ф.Тэлготт [и др.], Труды II Женевской конференции. Избр. докл. иностр. ученых, Физика ядерных реакторов, М., Атомиздат, 1959, -С.600-620.
- Энергетический ядерный реактор без замедлителя (EBR-II) / Л.Кох [и др.], Избранные доклады иностранных ученых, Ядерные реакторы и ядерная энергетика, Москва, 1959.
- Красин, А.К. Физические характеристики исследовательского реактора погружного типа ИРТ-2000 с петлевым каналом /А.К.Красин [и др.], Труды третьей Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, Нью Йорк: ООН, 1965. т.7: Исследовательские и испытательные реакторы, Доклад Р/718 (БССР), С.148-155.
- 39. The NRTS Advanced Test Reactor / D.R.deBoisblanc [at al.], там же, –Т.7, –С.303-313.
- 40. The Oak Ridge high flux isotope reactor / J.A.Swartout [at al.], там же, -Т.7, -С.360-371.
- 41. Фейнберг, С.М. Физические и эксплуатационные характеристики реактора СМ-2 / С.М. Фейнберг [и др.], там же, -Т.7, -С.384-397.
- 42. Сайт завода производителя ОАО НЗХК / [Электронный pecypc] http://www.nccp.ru/ir
- 43. Разработка тепловыделяющего элемента вафельного типа для экспериментального реактора-размножителя EBR-II / С.И.Мегеф [и др.] Атомная техника за рубежом, №8, 1958.
- 44. Сайт НИКИЭТ, раздел «Экспериментальная база» / [Электронный ресурс] http://www.nikiet.ru

- 45. Экспериментальный самолетный реактор. Проект и сооружение. / Е.Беттис [и др.] Атомная техника за рубежом, №5, 1958, -С.16-30.
- 46. Фейнберг, С.М. Исследовательский реактор СМ мощностью 50 Мвт. / С.М.Фейнберг [и др.] Атомная энергия, 1960, Т.8, вып.6, –С.493–504.
- 47. Курчатов, И.В. Импульсный графитовый реактор ИГР / И.В.Курчатов [и др.], там же, 1964 г., -Т.17, вып.6, -С.463-474.
- 48. Петров Ю.В. Реактор ПИК-2 с пониженным расходом высокообогащенного урана. / Ю.В.Петров [и др.], -там же, 2003, Т.95, вып.4, -С.261-270.
- Цыканов, В.А. Создание реактора СМ-2 / В.А.Цыканов. Доклад на международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы: Наука и высокие технологии», г.Димитровград, 25-29 июня 2001 г., том 1 «Пленарные доклады», –С.25-40.
- 50. Цыканов, В.А. Модернизация активной зоны реактора СМ / В.А.Цыканов [и др.], там же, -Т.2, -С.3-16.
- 51. Солонин, М.И. Разработка твэлов и ТВС нового поколения для исследовательских реакторов / М.И.Солонин [и др.], там же, –С.176-186.

ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЛАРЫ ЖӨНІНДЕГІ ДЕРЕКТЕР БАЗАСЫ ЯДРОЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ЗАҢСЫЗ АЙНАЛЫМЫНА ҚАРСЫ ӘРЕКЕТ ЖАСАУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ

¹⁾ Горин Н.В., ¹⁾ Корнеев А.А., ¹⁾ Липилина Е.Н., ¹⁾ Чуриков Ю.И., ²⁾ Архангельский Н.В.

¹⁾ РФЯО-БРТФҒЗИ, Снежинск, Челябинск обл., Ресей ²⁾ «Росатом» мемлекеттік корпорациясы, Мәскеу, Ресей

Деректер базасының қоршамы жасалды және оны кеңестік/ресейлік және америкалық ақпаратқа толтыру басталды. База сарапшыларға «белгісіз ЯМ» өндірілу және ұрлану орнын анықтау мақсатында сәйкестендіру кезінде көмек үшін көзделген предназначена. Сонымен қатар деректер базасы зерттеушілік, конструкторлық және ақпараттық мақсатта және білім жинау және шоғырландыру үшін де пайдасын тигізе алады. КСРО/Ресей және АҚШ зерттеу реакторларының активті аймақтарының ЖБЖ мен твэлдерін сәйкестендіру мүмкіндігі қарастырылды. Әртүрлі ғылыми басылымдарда жарияланған твэлдердің суреттері жиналған, твэлдердің әртүрлі екендігі және көбінесе оларды сәйкестендіру үшін оларды қарап шығумен және көлемдерін өлшеумен шектелуге болатындығы көрсетілген. Алайда, егер реактор ЖБЖ немесе твэл толық күйреген болса, сынған бөлшектерін сәйкестендіру үшін, ядролық материалдың изотоптық құрамын, байытылуын және қоспалар құрамын өлшеу қажет болады.

THE DATABASE ON RESEARCH REACTORS AS A TOOL COUNTERING THE ILLICIT TURNOVER OF NUCLEAR MATERIALS

¹⁾N.V. Gorin, ¹⁾A.A. Korneev, ¹⁾E.N. Lipilina, ¹⁾Yu.I. Churikov, ²⁾N.V. Arkhangelskij

¹⁾ RFNC-ARITF, Snezhinsk, Russia ²⁾ Rosatom, Moscow, Russia

The database shell has been developed and its filling with information on the Soviet/Russian and American research reactors has been started. The database is intended for helping the experts to identify the "unknown" nuclear material in order to determine the place where it was manufactured and stolen. At the same time, the database can be useful for research, design, and information purposes, as well as for knowledge preservation and concentration. Possibilities to identify fuel cells and fuel rod arrays of the Soviet/Russian and the US research reactor cores have been considered. Drawings and characteristic dimensions of research reactors provided in different scientific publications are presented. It is shown that fuel cells and fuel rod arrays have peculiar features and in most cases visual analysis and size measurement are sufficient to identify an "unknown" fuel part. However, if a fuel cell or a fuel rod array is destroyed completely, then identification of its debris requires measurements of enrichment, nuclear material isotopic composition and composition of dopants.

УДК 550.34

КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 МАЯ 2011 ГОДА

Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассмотрен вопрос параметризации основного толчка землетрясения 1 мая 2011 г. с магнитудой mb=5.6. Изучены пространственные характеристики очага, механизм и тензор момента центроида (СМТ), закономерности афтершоковой деятельности. С большой вероятностью установлена плоскость разрыва в очаге.

1 мая 2011 г. в 08 часов 31 минуту по местному времени жители г. Алматы ощутили землетрясение, интенсивность которого на территории города составила 4 – 5 баллов. Событие такой интенсивности последний раз на территории города отмечалось более трех лет назад. Особенностью землетрясения 1 мая 2011 г. явилось то, что после него в течение всего дня и последующей ночи неоднократно повторялись ощутимые толчки небольшой интенсивности. Так, уже через 34 минуты после первого толчка повторились колебания с интенсивностью 2 - 3 балла, через шесть часов - с интенсивностью 3 -4 балла. К вечеру 1 мая 2011 г. колебания от землетрясений жители почувствовали не менее 6 раз. Сведения о регистрируемых толчках, аналитические обзоры о происходящем сейсмическом событии и его афтершоках в круглосуточном режиме оперативно предоставлялись на веб-сайте Центра данных РГП ИГИ (www.kndc.kz). Посешение веб-сайта жителями Алматы за эти сутки было рекордным и достигало десятков тысяч. Однако избежать паники в городе не удалось. К ночи многие люди с вещами вышли на улицу с намерением ночевать там в ожидании более сильного землетрясения. Только после полуночи, после выступления по телевидению представителей Министерства по чрезвычайным ситуациям и Института сейсмологии РК, удалось успокоить людей. Следует отметить, что землетрясению 1 мая 2011 г., несмотря на его небольшую силу по меркам глобальной сейсмологии, уделялось особое внимание и в мировых центрах данных, что объясняется его близостью к крупнейшему мегаполису Казахстана. Так, в Европейском средиземноморском Центре данных (EMSC) этому землетрясению был посвящен специальный отчет, представленный на веб-сайте www.emsc-csem.org. В настоящей статье приводится подробный отчет о землетрясении 01 мая 2011 г. по казахстанским данным (КНЦД – Казахстанский национальный центр данных, СОМЭ – сейсмологическая опытно-методическая экспедиция) и материалам ряда зарубежных Центров обработки данных: EMSC, USGS (United States Geological Survey, США), ГС (Геофизическая служба) РАН.

Координаты гипоцентра и магнитуда землетрясения по разным источникам приведены в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, различие в положении гипоцентра землетрясения по разным источникам не превышает 0.2° по широте, 0.07° по долготе и 3 км по глубине. По инструментальным данным РК гипоцентр землетрясения расположен (рисунок 1) южнее Капчагайского водохранилища в Алматинской впадине на глубине 22 км и приурочен к узлу пересечения разломов высших порядков, выделенных по результатам дешифрирования космоснимков. Один из разломов субпараллелен Капчагай-Чиликскому сдвигу, другой – имеет северо-восточное простирание.

Алматинская впадина является слабосейсмичной зоной, разделяющей Северо-Тянь-Шаньскую и Жонгарскую сейсмоактивные зоны Казахстана. Кристаллический фундамент каледонской консолидации перекрыт здесь толщами мезо-кайнозойских пород. По данным сейсмического районирования Казахстана [1] сейсмопотенциал ближайшей сейсмогенерирующей (Алтынэмельской) зоны на севере составляет 6.5. На юге, в Алматинской сейсмогенерирующей зоне, максимально сильными могут быть землетрясения с магнитудой 7.0. Основная масса слабых землетрясений, зарегистрированных ранее, приурочена к Алматинскому прогибу, небольшая их часть трассирует Капчагай-Чиликский разлом. Южнее этого разлома 23.08.1960 г. было зарегистрировано событие с M_s=4, которое до землетрясения 01.05.2011 г. являлось самым сильным в Алматинской впадине (рисунок 2).

Источник	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Время to, ч:м:с	Магнитуда mb	Глубина Н, км
USGS(США)	43.543	77.737	2:31:29	5.4	20
EMSC(Франция)	43.63	77.76	2:31:29	5.4	23
ГС РАН (Россия)	43.75	77.69	2:31:28.3	5.1	20
РК (КНЦД+СОМЭ)	43.62	77.70	2:31:28.6	5.6	22

Таблица 1. Характеристики Капчагайского землетрясения 1 мая 2011 года по инструментальным данным



(1 – 4) – эпицентры: 1- землетрясения 01.05.2011, 2 – афтершоков с М≥4, 3- афтершоков с М<4; 4 – землетрясения 1960 г.; 5 – разлом

Рисунок 1. Эпицентры главного толчка Капчагайского землетрясения и его афтершоков, стереограммы механизма очага главного толчка, определенного по стандартной методике (MO) и CMT (определение GFZ)



1 – катастрофические землетрясения с магнитудой Ms ≥ 7.1; 2 – Ms ≥ 6; 3 – Ms ≥ 5; 4 – Ms ≥ 4; 5 – Ms ≥ 3, звездочка – эпицентр землетрясения 1.05.2011 г.

Рисунок 2. Схема расположения эпицентров землетрясений в Северном Тянь-Шане и Джунгарии за весь исторический период

КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 МАЯ 2011 ГОДА



а – коэффициент Лоде-Надаи





в – угол погружения оси максимального укорочения

Рисунок 3. Характер сейсмотектонического деформирования за два года до Капчагайского землетрясения и стереограммы фокальных механизмов главного толчка и наиболее сильных афтершоков на схеме разломов (желтые точки – слабые афтершоки)

го удлинения

Таблица 2. Параметры механизма очага Капчагайского землетрясения по данным регионального и СМТ (GFZ) каталогов

N⁰	Каталог	AzP	eР	AzT	еТ	AzN	eN	STR1	DIP1	SLIP1	STR2	DIP2	SLIP2	N
1	МО (КНЦД)	182	14	118	61	85	25	122	38	135	252	64	62	51
2	CMT(GFZ)	175	15	121	65	79	19	110	34	125	249	63	69	12

На рассматриваемой территории Капчагай-Чиликский разлом относится к наиболее крупным (трансрегиональным) сдвигам, он протягивается от хребтов Кокшаал-Тау под кайнозойские отложения Южно-Прибалхашской впадины. Простирание разлома C3 300° - 305°, падение плоскости разлома крутое, почти вертикальное. По существующим представлениям вдоль субтрансформных сдвигов в результате субмеридионального сжатия происходит движение литопластин верхней части земной коры в виде конвейера и образование асимметричных (вергентных) чешуйчато-надвиговых складчато-глыбовых морфоструктур. Капчагай-Чиликский сдвиг является границей между Жонгаро-Кетменской и Кунгей-Заилийской разнонаправленными системами морфоструктур. В первой из них движение деформируемых блоков земной коры происходит в юговосточном направлении, во второй - в северозападном направлении [1]. Фоновое сейсмотектоническое деформирование (СТД) в рассматриваемом районе Алматинской впадины характеризуется условиями одноосного горизонтального укорочения и вертикального удлинения [2]. С 2007 г. наблюдалось противофазное изменение параметров СТД в соседних ячейках указанного района, и уже в 2009 г. сформировались участки с контрастными параметрами сейсмотектонического деформирования, вблизи границ которых 1 мая 2011 г. реализовалось землетрясение. На рисунке 3 показано распределение по площади параметров СТД: коэффициента Лоде-Надаи (а), характеризующего тип деформирования, и углов погружения (с горизонталью) осей максимального удлинения (б) и укорочения (с). Фоновый характер деформирования – одноосное горизонтальное укорочение при вертикальном максимальном удлинении – сохранился юго-восточнее очага.

Севернее очага деформирование среды одноосным укорочением происходило при горизонтальном максимальном удлинении в субширотном направлении. К западу и северо-востоку от очаговой зоны сформировался контрастный тип деформирования – одноосное горизонтальное удлинение, причем ориентация максимального укорочения изменяется на близвертикальную. Как известно, рассогласованность параметров СТД в соседних точках области компенсируется дополнительными внутренними упругими деформациями и напряжениями и может инициировать разрушение [3, 4], что и произошло вблизи границ контрастно деформированных зон в Алматинской впадине 1.05.2011 г.

Фокальный механизм главного толчка получен лвумя методами: по методу тензора центроида сейсмического момента (СМТ) с использованием данных 12 станций в Центре геофизических исследований (GFZ) ФРГ и по первым смещениям Р-волн, зарегистрированных сейсмическими сетями РК (ИГИ и СОМЭ), KNET, CAREMON. О надежности решения фокального механизма по первым вступлениям объемных волн свидетельствует использование 51 равномерно распределенных знаков, согласованность которых составила 98%, а вариации параметров не превысили 1 – 2°. Параметры фокального механизма, определенные по двум методам: МО - и СМТ - приведены в таблице 2, а стереограммы показаны на карте эпицентров главного толчка и его афтершоков (рисунок 1).

Видно, что решения по двум методам хорошо согласуются, максимальная разница в значениях параметров не превышает 12°. По результатам решения механизма очага землетрясение реализовалось под действием системы напряжений, характеризуемой близгоризонтальной и субмеридиональной ориентацией оси напряжения сжатия, и субширотной, круто погружающейся оси напряжения растяжения. Одна из нодальных плоскостей имеет северо-восточное простирание (STR2) и крутое падение (64°) в северо-западном направлении, подвижка по этой плоскости характеризуется взбросом. Другая плоскость северо-западного простирания (STR1) полого падает на юго-запал. Висячее юго-запалное крыло смешено по простиранию этой плоскости в северо-западном направлении и вверх. Подобие решений по стандартной методике и по методу СМТ, отражающих, соответственно, первое движение по разрыву и характер разрыва в главной фазе, свидетельствует, что характер подвижки и ориентация разрыва при его развитии не изменяется. Найденная ориентация разрывов в очаге согласуется с направлением разломов высшего порядка, к пересечению которых приурочен эпицентр землетрясения. В результате подвижки по одному из них и произошло снятие возникших в блоке напряжений.

Для установления истинного направления разрыва протяженного очага применена методика Горбуновой И.В. [5], основанная на построении и анализе азимутального годографа. Годограф построен с использованием материалов станций СОМЭ. По вертикальной шкале приведены значения $\delta t = (tp_{max} - tp_1)$, где $tp_{max} - время$ наступления максимума в цуге Р-волн, $tp_1 - время$ первого вступления Р-волны (рисунок 4).



Рисунок 4. Азимутальный годограф для землетрясения 1.05.2011 г.

Из рисунка 4 видно, что годограф имеет два нечетко выраженных максимума, разнесенных на ≈180°, что характерно для двунаправленного разрыва. Однако, на основании того, что максимумы годографа выражены слабо, можно предположить, что распространение разрыва происходило как по простиранию плоскости в обе стороны, так и по падению плоскости. Сопоставление с механизмом очага показывает соответствие максимумов азимутам простирания первой нодальной плоскости (на рисунке 4 – пунктирные линии). Из такого вида азимутального годографа следует, что ориентация плоскости разрыва близка к 301° (121°), вдоль этой плоскости разрыв распространялся как в северо-западном, так и юго-восточном направлении и вверх по падению плоскости.

Главное событие предварял слабый форшок с K=5.8, зарегистрированный за 2.5 часа. После землетрясения последовала серия афтершоков, аномально высокая как по общему числу повторных толчков для такого сравнительно несильного главного толчка, так и по количеству относительно сильных афтершоков с $K\geq9$. Всего в каталог и сейсмологические бюллетени включено более 200 афтершоков этого землетрясения, большая часть из которых была зарегистрирована в первые 10 дней. Распределение афтершоков по энергии и во времени характеризует рисунок 5: тринадцать наиболее сильных толчков с $K\geq9$ произошли в первые 4 дня. Через месяц, 2 июня, был зарегистрирован еще один афтершок с K=9.



Рисунок 5.Затухание афтершоковой деятельности в очаге Капчагайского землетрясения

Афтершоковая активизация происходила в компактном объеме геологической среды изометричной формы, ограниченном со всех сторон разломами высокого порядка – субпараллельными и секущими Капчагай-Чиликский сдвиг. Все наиболее сильные повторные толчки с К≥9 сконцентрированы в области еще меньших размеров (рисунок 1). Линейные размеры основного облака афтершоков в плане составляют 10 км × 10 км. Примерно в 10 км западнее основной афтершоковой области, в равновеликом блоке, расположен эпицентр землетрясения 1960 г. Следует отметить приуроченность очага этого землетрясения, как и очага землетрясения 2011 г., к узлу пересечения разрывов, ориентированных субпараллельно и вкрест Капчагай-Чиликскому сдвигу.

Известно, что только по положению облака афтершоков в плане нельзя делать выводы о направлении и размерах разрыва в главном толчке. Необходимо проанализировать объемную модель очага в земной коре. Поэтому было рассмотрено распределение проекций гипоцентров афтершоков на вертикальные плоскости, ориентированные по простиранию и ортогонально первой и второй нодальным плоскостям главного толчка (рисунок 6).



б – простирание первой нодальной плоскости

Рисунок 6. Облака афтершоков по глубинным разрезам, ориентированным ортогонально и по простиранию первой нодальной плоскости главного толчка землетрясения 1 мая 2011 г.

Анализ глубинного распределения афтершоков показал, что большинство гипоцентров распределено в земной коре на глубине 20 – 10 км, а наиболее сильных толчков – на глубине не менее 15 км. Выше отметки 10 км зафиксированы только единичные очаги. Наилучшим образом распределению афтершоков в разрезе соответствует ориентация первой нодальной плоскости главного толчка (STR1). Все афтершоки расположены в южном висячем крыле первой нодальной плоскости (рисунок 6а), глубины их гипоцентров уменьшаются вдоль пологой плоскости с удалением от главного толчка на север. Выше глубины 15 км распределение гипоцентров изменяется, они выстраиваются вдоль крутой плоскости, составляющей клинообразную структуру с плоскостью 1 главного толчка. Такой же крутой плоскостью ограничено распределение афтершоков к югу от очага. Полученное распределение афтершоков на разрезе, ортогональном простиранию первой нодальной плоскости, позволяет предположить, что имеющиеся в этой зоне тектонические разрывы, субпараллельные Капчагай-Чиликскому слвигу. круто падают в противоположные стороны и являются естественным ограничением очага с юга и севера. Вдоль простирания плоскости 1 (рисунок 6-б) распределение афтершоков с востока и запада ограничено крутыми плоскостями, которые в плане соответствуют разрывам, ориентированным вкрест Капчагай-Чиликскому сдвигу. Геометрические размеры очага, оцененные по вертикальным разрезам распределения афтершоков (рисунок 6), составляют: 20 км × 10 км × 10 км. Такие размеры очага по существующим зависимостям [6], связывающим размеры очага с магнитудой, соответствуют M=5 и фиксированы размерами блока между разломами высокого порядка. Одинаковые вертикальные и горизонтальные размеры очага свидетельствуют об одинаковом развитии разрыва по падению плоскости вверх и по ее простиранию, что подтверждает слеланные выше выволы.

Для 14 наиболее сильных афтершоков найдены решения фокальных механизмов. Анализ простирания нодальных плоскостей (рисунок 7) и характера подвижек показал подобие их главному толчку.



Рисунок 7. Диаграммы распределения азимутов простирания нодальных плоскостей афтершоков Капчагайского землетрясения 01.05.2011 г.

Вероятно, повторные толчки, как и главное событие, генетически связаны с имеющимися в очаговой зоне разломами, субпараллельными Капчагай-Чиликскому сдвигу, либо с секущими его разрывами. Очаги пяти афтершоков, как и главного толчка, реализовались в условиях регионального поля напряжений, характеризующегося горизонтальным сжатием в субмеридиональном направлении и вертикальным растяжением. Восемь афтершоков, в том числе июньский с К=9, произошли под действием близгоризонтально ориентированных осей напряжений сжатия и растяжения, чем обусловлены сдвиговые подвижки по простиранию обеих плоскостей.

КАПЧАГАЙСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 1 МАЯ 2011 ГОДА



Рисунок 8. Изосейсты землетрясения 01.05.2011 г. [7]

Такой характер напряжений, снимаемых в повторных толчках, соответствует ситуации различных типов сейсмотектонического деформирования к северу и к югу от очага, сформировавшейся перед землетрясением (рисунок 4). Только один афтершок, со сбросовым типом механизма, реализовался, видимо, под действием вторичных напряжений. Полученные результаты анализа инструментальных наблюдений не противоречат данным макросейсмического обследования, проведенного сотрудниками СОМЭ и НПК «ПРОГНОЗ» [7]. Изосейсты этого события показаны на рисунке 8. Область шестибалльных сотрясений, небольшая по размеру, слегка вытянута, как и пятибалльная область, в северовосточном направлении по азимуту (319 – 322°), близкому к простиранию 1-ой плоскости разрыва.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ РАЗРЫВА В ОЧАГЕ Капчагайского землетрясения

Анализ совокупности разнородных сейсмологических материалов позволяет сделать вывод, что землетрясение 01.05.2011 г. произошло под действием регионального близгоризонтального напряжения сжатия в субмеридиональном направлении, в ослабленной среде с контрастными параметрами сейсмотектонического деформирования. Предлагаемая интерпретация процесса в очаге Капчагайского землетрясения отражена на рисунке 9 (надо иметь в виду, что разрыв, показанный на рисунке, находится на глубине 20 км). Очаг главного толчка и облако афтершоков располагались в блоке между разломами высокого порядка, ориентированными субпараллельно и вкрест простирания Капчагай-Чиликского сдвига, и генетически связаны с этими разломами. Геометрические размеры очага ограничены размерами: L≈10 км, W≈10 км, Н=20 км, что достаточно хорошо согласуется с магнитудой землетрясения. По пологому разрыву северо-западного простирания (STR1) произошло смещение южного крыла вверх и на северо-запад. Вспарывание разрыва, вероятнее всего, развивалось одновременно по падению плоскости вверх и в обе стороны по ее простиранию. На всем протяжении разрыва сохраняется ориентация смещений, зафиксированная в начальной стадии. Вся афтершоковая активизация сосредоточена юго-восточном в висячем крыле разрыва.



 пологий взбросо-сдвиг на глубине 20 км, генерировавший землетрясение (стрелки показывают направление разрыва в горизонтальной плоскости, зубцы – падение разрыва); 2 – эпицентр землетрясения 2011 г., 3 – эпицентр землетрясения 1960 г.; 4 – линии разломов

Рисунок 9. К интерпретации очага Капчагайского землетрясения 01.05.2011 г.
В процессе афтершоковой деятельности снимались напряжения, сформировавшиеся в очаговой зоне перед землетрясением. Релаксация напряжений происходила в результате взбросо-сдвиговых и сдвиговых подвижек по плоскостям либо северовосточного, либо северо-западного направления, согласующегося с простиранием имеющихся в зоне разломов высокого порядка, преимущественно на глубине H>10 км. Следует отметить, что рассматриваемая зона Алматинской впадины расчленена разломами высокого порядка на примерно равновеликие блоки, что хорошо видно из рисунка 9.

В дизъюнктивных узлах двух таких блоков произошли землетрясения 1960 и 2011 гг. с М=4 – 5. В условиях следующей активизации подобные блоки вдоль Капчагай-Чиликского сдвига можно рассматривать как места будущих землетрясений с аналогичными геометрическими размерами и М≈5.

Параметры сильных движений

Для анализа использованы записи ускорений колебаний грунта в двух пунктах: на станции KNDC в г. Алматы (главного толчка и девяти афтершоков) и на станции Подгорная (главного толчка). Станция KNDC находилась на расстоянии 79 км от эпицентра, станция Подгорная – 153 км. Оценены характеристики записей и соответствующих им спектров реакции. На рисунке 10 приведены акселерограммы землетрясения 1 мая в 02^h31^m, зарегистрированные станцией KNDC, а на рисунке 11 – станцией Подгорная (PDGN).

При главном толчке пиковые ускорения грунта в

пункте KNDC составили 8.4 см/с². По шкале интенсивности землетрясений MSK-64 (K) [8] такие значения характеризуют интенсивность 4 балла. Станция KNDC расположена в южной части города. Сильнее это землетрясение ощущалось в северной части г. Алматы, где интенсивность могла достигать 5 баллов. Как следует из значений амплитуд, приведенных в таблице 3, афтершок в $20^{h}29^{m}$ 1 мая 2011 г. имел такие же амплитуды ускорений, как и при главном толчке – на уровне 8 см/с².

Однако магнитуда этого афтершока была намного меньше, чем у главного толчка (mpv=4.25 против mpv=5.34). На самом деле, при этом афтершоке высоких значений достигла амплитуда только одного колебания (рисунок 12), чем и объясняется его меньшая интенсивность по сравнению с главным толчком.

По каждой акселерограмме были построены спектры реакций, позволившие оценить преобладающие периоды колебаний при землетрясении и его афтершоках. На рисунке 13 представлены результаты обработки акселерограмм главного толчка с использованием программы View Wave (автор Т. Кашима). Спектры реакции строились для наиболее интенсивной части акселерограммы, включающей S-волну. Максимальные воздействия при горизонтальных колебаниях были достаточно высокочастотны. Преобладающие периоды составляют 0.13 с. На вертикальной компоненте отмечаются несколько большие периоды колебаний – 0.22 с. Максимальные ускорения спектров реакции достигают значений 25 см/с².



Рисунок 10. Акселерограммы главного толчка. Станция KNDC Рисунок 11. Акселерограммы главного толчка. Станция PDGN

Дата	Время, ч. м.	KNDC			PDGN		
		A _N , см/с ²	A _E , см/с ²	A _Z , см/с ²	А _N , см/с ²	A _E , см/с ²	A _Z , см/с ²
1.05.2011	02-31	5,1	8,4	4,5	1,3	1,2	1,2
1.05.2011	03-05	0,6	0,3	0,2			
1.05.2011	09-13	2,2	2,1	1,3			
1.05.2011	11-37	3,7	1,8	1,1			
1.05.2011	20-29	8,7	8,7	1,6			
1.05.2011 (двойной толчок)	23-27	1,4	1,0	0,3			
1.05.2011	23-52	1,3	1,2	0,3			
2.05.2011	02-31	1,1	0,7	0,3			

Таблица 3. Параметры сильных движений (максимальные амплитуды ускорений)



Рисунок 12. Акселерограммы афтершока землетрясения 1 мая 2011 г. в 20^h 29^m



а – записи ускорений S-волн некорректированные





б – расчетные трассы скоростей колебаний грунта



Рисунок 13. Результаты обработки акселерограмм главного толчка по записям станции KNDC

Выводы

Капчагайское землетрясение реализовалось под действием регионального напряжения сжатия в субмеридиональном направлении вблизи границ зон с контрастными параметрами сейсмотектонического деформирования. Гипоцентры главного и повторных толчков располагались в блоке между разломами высокого порядка, ориентированными субпараллельно и вкрест простирания Капчагай-Чиликского сдвига и генетически с ними связаны. Геометрические размеры очаговой зоны ограничены размерами блока и соответствуют средним размерам очагов землетрясений с магнитудой M=5.

По пологому разрыву северо-восточного простирания произошло смещение южного крыла вверх и на северо-запад, что согласуется с ориентацией и кинематикой Капчагай-Чиликского трансрегионального сдвига.

Вспарывание разрыва с большой вероятностью происходило одновременно по падению плоскости вверх, и в обе стороны по ее простиранию. На всем протяжении разрыва сохранялась ориентация смещений, зафиксированная в начальной стадии.

Продолжительная во времени афтершоковая активизация сконцентрирована в южном, висячем крыле разрыва, преимущественно на глубине H>10 км. В процессе афтершоковой деятельности снимались напряжения, сформировавшиеся в очаговой зоне за два года до землетрясения. Релаксация напряжений происходила в результате взбрососдвиговых и сдвиговых подвижек по плоскостям либо северо-восточного, либо северо-западного направления, согласующихся с простиранием имеющихся в зоне разломов высокого порядка.

Параметры сильных движений на территории г. Алматы демонстрируют преимущественно высокочастотные сейсмические воздействия с преобладающими периодами 0.13 с . Интенсивность воздействий на уровне 8 см/с².

Ориентация разрывов в очагах главных толчков и их афтершоков и пространственное распределение гипоцентров свидетельствуют о том, что разрывы высоких порядков в Алматинской впадине, по всей вероятности, имеют крутое падение и проникают в земную кору на глубину 10 - 25 км, разбивая ее на блоки.

В условиях следующей активизации такие блоки вдоль Капчагай-Чиликского сдвига можно рассматривать как места будущих землетрясений с аналогичными геометрическими размерами очагов и магнитудой М≈5.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Сейсмическое районирование Республики Казахстан. // Алматы: изд-во Эверо, 2000. 219 с.
- Полешко, Н.Н. Механизмы очагов землетрясений и сейсмотектоническое деформация земной коры Северного Тянь-Шаня и Жонгарии / Н.Н. Полешко // Афтореферат дисс. канд. геол.-мин.наук. / Н.Н. Полешко // Алматы, 2009. – 21 с.
- 3. Садовский, М.А. Прогноз землетрясений./ М.А. Садовский // Душанбе: Дониш, 1983-1984. №3-100 с.
- Михайлова, Н.Н. Временные вариации параметров механизмов очагов сейсмотектонических региов Казахстана / Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко // Вестник НЯЦ РК, 2009. – вып.3 – С. 104 - 110.
- 5. Горбунова, И.В. Интерпретация очаговых волн на записях землетрясений / И.В. Горбунова [и др.] // Бишкек-Москва: Наука, 1992.
- 6. Сыдыков, А. Сейсмический режим территории Казахстана / А. Садыков // Алматы: изд-во Гылым, 2004. 268 с.
- Нысанбаев, Т.Е. // Отчет по результатам макросейсмического обследования землетрясения 01.05.2011 г. // Т.Е.Нысанбаев [и др.]
- 8. Шкала для оценки интенсивности землетрясений MSK-64 (К). Алматы: изд-во Комитета по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан, 2004. 16 с.

ҚАПШАҒАЙ ЖЕРСІЛКІНУІ, 2011 Ж. 1 МАМЫР

Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

2011 ж. 1 мамырда болған магнитудасы m_b=5.6 жерсілкінудің негізгі соққысын параметрлеу мәселелері қаралған. Ошақтың кеңістік сипаттамалары, механизмдері мен центроид моментінің тензоры (СМТ), афтершоқтық іс-қимылдың заңдылықтары зерделенген. Үлкен ықтималдығында ошақтағы айырылымның жазықтығы белгіленген.

KAPCHAGAY EARTHQUAKE ON MAY 1, 2011

N.N. Mikhaylova, N.N. Poleshko

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

The issue of parameterization of the main shock on May 1, 2011 with mb=5.6 has been considered in the article. Spatial characteristics of the focal point, the mechanism and Centroid - moment Tensor (CMT), regularities of aftershock activities have been studied. With a high probability the fracture plane in the focus has been determined.

УДК 621.039.9:504.054

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СОДЕРЖАНИЯ ¹³⁷Cs В СКВАЖИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ГАММА-КАРОТАЖА

Гринштейн Ю.А., Мурзадилов Т.Д., Логвинов О.В.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Приведена методика гамма-спектрометрического анализа при каротаже скважин для определения содержания ¹³⁷Cs по его гамма-излучению. Суть методики сводится к измерению спектрального распределения гаммаизлучения горных пород по разрезу скважины, коррекции показаний на скважинные условия, нахождению градуировочной характеристики спектрометра. При этом каждый измеренный спектр разделяют на фоновую и информационную часть, градуировочную характеристику получают для каждого спектра индивидуально, а содержание ¹³⁷Cs рассчитывают по специальной формуле.

В настоящее время в мировой практике определение содержания ¹³⁷Cs в скважинах проводят путем анализа проб воды, отобранных из ствола скважин. В 1966 – 1979 гг. на участке Азгир в Западном Казахстане проводились работы по изучению возможности создания подземных полостей в соляных куполах с помощью ядерных взрывов для хранения углеводородов. Исследования показали, что содержание ¹³⁷Cs в воде скважин, пройденных вблизи ядерных полостей, в основном, не превышает 10 Бк/л, в то время как в нерастворимом остатке его содержание достигало 9000 Бк/кг, т.е. основная масса цезия, возникшая в результате взрыва, находится в нерастворимой форме [1].

При отборе водных проб в гидрогеологических скважинах на участке Балапан бывшего Семипалатинского испытательного полигона было обнаружено только значимое присутствие стронция-90 и трития, тогда как цезий-137 найден не был. Однако известно, что при взрыве атомной бомбы образуется 180 Кюри радиоактивного цезия на каждую килотонну мощности взрыва, т.е. миграция цезия-137, если она имеет место, происходит путем его переноса коллоидными растворами. Таким образом, совершенно очевидно, что для выявления и контроля за процессами миграции необходимо разработать способ, позволяющий определять содержание цезия-137 в стенках скважин. Исходя из условий постановки задачи можно утверждать, что единственным способом, позволяющим провести прямое определение ¹³⁷Сѕ в стенках скважины, является спектрометрический гамма-каротаж.

При лабораторном анализе проб горных пород и руд на естественные гамма-излучающие радиоактивные элементы (ЕРЭ) – радий, торий и калий, – широко применяется спектрометрический анализ с использованием в качестве детектора полупроводниковых детекторов (ППД), а в качестве анализаторов – многоканальных амплитудных анализаторов. Однако разработанные для проведения такого анализа способы и устройства не пригодны для решения поставленной задачи в условиях скважинного пространства, так как ППД нуждаются в глубоком охлаждении (применяется жидкий азот), и они имеют низкую эффективность регистрации гаммаизлучения, что вызывает необходимость проводить измерения с длительными экспозициями, достигающими нескольких часов. Указанные особенности спектрометрического анализа с использованием ППД не позволяют использовать этот способ при каротаже скважин. В опубликованной литературе имеются источники, в которых описаны способы проведения гамма-спектрометрического каротажа для определения содержания ЕРЭ по разрезу скважин. Однако ни в одном из этих источников не рассматривается способ определения содержания 137 Cs, возникшем при проведении подземного ядерного взрыва. Это, по-видимому, связано с тем, что в области расположения фотопика ¹³⁷Cs (661 кэВ – аналитическая линия цезия) находятся фотопики радия (609 кэВ) и тория (584 кэВ), которые, как это видно из рисунка 1, плохо разрешаются с аналитической линией цезия. Кроме того, на эту часть спектра оказывает значительное влияние вклад многократно рассеянного жесткого излучения калия (1460 кэВ), радия (1120 и 1760 кэВ) и тория (2615 кэВ), которое, накапливаясь в левой части спектра (фактор накопления), увеличивает фон под аналитической линией цезия, при этом величина этого влияния зависит как от содержания ЕРЭ, так и от геометрических условий измерений в скважине и ее заполнения.

Описанная ниже методика разработана для контроля за процессами миграции ¹³⁷Cs, возникшим в результате подземного ядерного взрыва, в массиве горных пород. Суть методики сводится к следующему.

Проводят измерения в интервале 0.2-3.0 МэВ с использованием 1024-канального стабилизированного спектрометра, стабильность энергетической шкалы которого обеспечивается применением дифференциальной системой стабилизации, защищенной патентом [2] и скважинным прибором с детектором NaI, имеющим размеры 50×250 мм и разрешение по линии ¹³⁷Cs (661 кэВ) порядка 8.5%.



Рисунок 1. Спектры, измеренные на моделях цезия, радия и тория

Стабилизация спектра осуществляется по реперному фотопику ⁴⁰К, практически присутствующему во всех горных породах. Точность стабилизации реперного фотопика составляет около 1% отн. при его расположении на 505 канале спектрометра.

– Выполняют дальнейшее улучшение стабилизации энергетической шкалы спектрометра путем нахождения энергетической характеристики спектрометра N=F(E) (где N-номер канала спектрометра, E- энергия излучения) индивидуально для каждого измеренного спектра. Для этого используется найденная экспериментальным путем зависимость положения фотопиков цезия, радия и тория от положения реперного фотопика калия (1460 кэВ). Тем самым все спектры приводятся к единому масштабу с точностью до 1 канала спектрометра.

– Уменьшение влияния изменения геометрических условий измерений на результаты измерений осуществляется путем учета фоновой составляющей спектра. На рисунке 2 приведены два спектра, измеренные на модели с содержанием ¹³⁷Cs 1180 Бк/кг и в скважине №104/1 на глубине 98 м, где спектрометрическим гамма-каротажем было определено содержание цезия равное 1182 Бк/кг. Видно, что скорость счета в фотопике цезия в скважине почти на 10% выше, чем в модели, что связано с возрастанием фонового излучения в воде, заполняющей скважину. В то же время из рисунка 3, где приведены те же спектры, но с учетом фона, видно, что при выполнении этой операции разница в скорости счетов не превышает статистической погрешности измерений, т.е. чувствительность метода становится независимой от условий измерений.

Калибровка аппаратуры проводится на специально изготовленных моделях скважин, насыщенных по спектру, но не насыщенных по интенсивности излучения, что позволило изготовить их небольшого размера с весом не превышающем 20 кг, т.е. модели мобильны и могут быть использованы для контрольно-настроечных операций непосредственно при проведении работ на скважинах. Модели представляют собой полые цилиндры, изготовленные из жести, длиной 350 мм, диаметр внутреннего отверстия 100 мм, внешний диаметр - 200 мм. В качестве наполнителя использовался цемент марки 400, который после добавки в него заданного количества радионуклидов, затворялся водой и заливался в подготовленные формы. Всего было изготовлено 6 моделей. Заданные содержания радионуклидов в моделях приведены в таблице.



Рисунок 2. Спектры, измеренные в модели цезия и в скважине

Рисунок 3. Спектры, измеренные в модели цезия и в скважине, с учетом фона

Таблица.	Заданные	содержания	радионуклидов	в моделях скважин
1 0000000000000000000000000000000000000	00000000	e o o epoie unitar	phononynannooo	0 110 0 0 0 11 11 0 10 0 10 10 10 11 1

Модель	Pa	Измеренное			
	Cs	к	Ra	Th	содержание Cs, Бк/кг
Fon	1.6	53	90	7	3
Cs	1180	53	90	7	1185
K	-	1046	90	7	4
Ra	-	53	1073	-	5
Th	-	53	-	1007	3
Cs-K-Ra-Th	1010	53	1006	2207	1020

Модели выполняют несколько функций:

– служат для нахождения начальной калибровки энергетической шкалы спектрометра, т.е. по результатам их измерений находится зависимость N=F(E), где E – энергия излучения (кэВ), N – номер канала; – используются для нахождения вкладов излучения радия, тория и калия в область излучения цезия; – используются для контрольно-измерительных операций до и после каротажа для определения стабильности работы аппаратуры.

Вклад излучения тория (584 кэВ) и радия (609 кэВ) и калия (1460 кэВ) в область измерения цезия-137 (661 кэВ) учитывается по результатам измерения жестких линий этих элементов, присутствующих в спектре (К-1460 кэВ, Ra-1760 кэВ, Th-2615 кэВ) и нахождения коэффициентов вкладов этих линий в аналитическую область методом наименьших квадратов. Найденные коэффициенты используются для нахождения содержания ¹³⁷Cs из аналитического выражения:

$$C_{\rm Cs} = (J_{\rm Cs} - k_1 \cdot J_{\rm K} - k_2 \cdot J_{\rm Ra} - k_3 \cdot J_{\rm Th} - A_0) / K,$$

где: $C_{\rm Cs}$ – содержание ¹³⁷Cs в Бк/кг; $J_{\rm Cs}$, $J_{\rm K.}$, $J_{\rm Ra}$, $J_{\rm Th}$ – измеренные счета в энергетических «окнах» с вычетом фона, соответствующие излучению цезия, калия, радия и тория; A_0 – свободный член уравнения; k_1 , k_2 , k_3 – коэффициенты вкладов в канал цезия излучения калия, радия и тория, соответственно; K – чувствительность метода в имп/Бк.

Результаты применения описанного способа гамма-спектрометрического анализа в моделях скважин приведены в таблице, из которой видно, что результаты анализа вполне удовлетворительны даже при значительных содержаниях ЕРЭ, которые совместно довольно редко встречаются в природе.

Для получения низкого порога чувствительности (порядка 3-5 Бк/кг при вероятности Р=0.67) каротаж проводится дискретным методом с шагом 0.5 м и экспозицией 100 сек.

С использованием описанного метода был проведен каротаж в гидрогеологических скважинах на бывшем Семипалатинском ядерном полигоне. Результаты гамма-спектрометрического каротажа представлены на рисунке 4.



Рисунок 4. Результаты спектрометрического гамма-каротажа по скв. 104/2

Из рисунка 4 следует, что четко выделяется зона со значимыми содержаниями ¹³⁷Cs, (на «врезке» показан спектр, измеренный на глубине 121 м, соответствующий максимуму аномалии).

Статистическая обработка результатов измерений в интервале 20-50 м, где присутствие цезия не отмечается, показала, что среднеквадратическая погрешность определения ¹³⁷Cs при его содержании близком к нулю равна 5 Бк/кг при вероятности P=0.67, что вполне достаточно для проведения поисковых и обзорных работ. При необходимости улучшения порога чувствительности необходимо увеличивать экспозицию измерений.

Литература

- 1. Гринштейн, Ю.А. Патент G01T1/40, № 52118 / Ю.А. Гринштейн, Т.Д. Мурзадилов, А.И.Панченко.
- 2. Тлеубергенов, С.Т. Полигоны Казахстана. Народная академия Казахстана / С.Т. Тлеубергенов / Алматы: «Экология», 1997. С. 251 273.

СПЕКТР МЕТРЛІК ГАММА-КАРОТАЖ КӨМЕГІМЕН ҰҢҒЫМАЛАРДАҒЫ ¹³⁷Сs көлемін анықтау әдістемесі

Гринштейн Ю.А., Мурзадилов Т.Д., Логвинов О.В.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

¹³⁷Сs көлемiн анықтау үшiн ұғымалар каротажы кезiнде оның гамма сәулеленуi бойынша гамма-спектр метрлiк талдау әдiстемесi сипатталған. Әдiстеме мәнi ұңғымалар қимасы бойынша таужыныстардың гамма сәулеленулерiнiң спектрлiк таратылуларын өлшеу, ұңғымалық жағдайдың көрсеткiштерiн түзету, спектр метрдiң шкалалық сипаттамаларын табу. Сонымен қатар әрбiр өлшенген спектр фондық және ақпараттық бөлiктерге бөлiнедi, шкалалық сипаттама әрбiр спектрге жеке алынады, ал ¹³⁷Сs көлемi арнайы формула бойынша есептелiнедi.

TO ESTIMATE CONCENTRATIONS OF ¹³⁷CS BY MEANS OF GAMMA-SPECTROMETRY IN BOREHOLES

Yu.A. Grinshtein, T.D. Murzadilov, O.V. Logvinov

Institute of Geophysical Research, Kurchatov, Kazakhstan

The method of processing of gamma-ray spectra by means of which the spectrum is divided into background and analytical part has been described. This operation allows to have considerably reducing influence of changing concentration of potassium in the analyzed environment, and as changes of diameter of a borehole on the results to estimate the concentration of ¹³⁷Cs. Results of practical application of the proposed technique have been presented. The method is recommended when carrying out field and aero-gamma and spectrometry surveys.

ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДЫ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ 1220 СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Русинова Л.А., Беляшов А.В., Ларина Т.Г.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

В 1980-1981 гг. выполнены сейсмические исследования методом преломленных волн на участке проведения подземного ядерного взрыва в гранитном массиве скважины 1220 Семипалатинского испытательного полигона. Для получения полноценной информации о характере воздействия подземного взрыва на блок вмещающих горных пород сейсмические наблюдения выполнены до и после взрыва. Сохранившиеся исходные данные этих наблюдений были использованы для томографических расчётов и построения двухмерных скоростных моделей до глубины 150 м. В 2006 г. выполнены повторные сейсмические наблюдения на этом же участке методом преломленно-рефрагированных волн. Комплексный анализ полученных скоростных моделей позволил определить степень нарушенности среды сразу после проведения ПЯВ и, путём сопоставления с современными результатами, оценить динамику геомеханических процессов, происходящих в эпицентральной приповерхностной области ПЯВ.

Введение

Геофизическое сопровождение ядерных взрывов осуществлялось практически с начала проведения подземных испытаний в скважинах и штольнях на Семипалатинском полигоне и использовалось для решения различных задач: рекогносцировочных исследований участков испытаний, изучения физических параметров взрыва и характерных особенностей его воздействия на вмещающую геологическую среду, обеспечения необходимых мер радиационной и сейсмической безопасности [1]. Для полноценного изучения феноменологии подземного взрыва геофизические (в том числе сейсмические) съемки проводились, как правило, до и после ядерного испытания. Результаты данных геофизических исследований в виде исходных данных и конечных моделей для ряда боевых скважин площадки Балапан сохранены в архиве Института геофизических исследований НЯЦ РК.

В настоящее время в рамках решения геоэкологических задач на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) продолжено геофизическое изучение мест проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) с целью выявления в массиве горных пород поствзрывных проницаемых структур, по которым с грунтовыми водами за пределы очаговых зон могут переноситься техногенные радионуклиды.

Комплексное использование материалов исследований прошлых лет и результатов новых наблюдений позволяет оценить не только современное состояние среды, подвергшейся воздействию ПЯВ, но и проследить характер изменения во времени структуры горных пород, что, в свою очередь, даёт возможность прогнозирования геодинамических процессов в местах проведения ПЯВ.

В статье приведено описание результатов режимных сейсмических исследований мест проведения ПЯВ на примере скважины 1220 площадки Балапан. Использованы материалы наблюдений 1980-1981 гг. методом преломленных волн (МПВ), полученные на основании измерений до и после подземного испытания. Имеющийся исходный сейсмический материал в виде годографов по первым вступлениям продольных волн также был использован для томографических расчётов и построений двухмерных скоростных разрезов в районе скважины 1220.

В 2006 году проведены повторные сейсмические наблюдения на этом же участке методом преломленно-рефрагированных волн, по результатам которых построены двухмерные скоростные разрезы, отображающие современные характеристики вмещающей среды.

Проведенный комплексный анализ скоростных параметров среды позволил выявить характерные особенности воздействия подземного испытания на приповерхностную часть массива горных пород до глубины порядка 150 м. Данные о современной структуре эпицентральной области ПЯВ предоставили возможность предварительной оценки динамики происходящих там геомеханических процессов.

Описание участка исследований

Скважина 1220 расположена в центральной части юго-западной группы скважин боевой площадки Балапан, СИП (рисунок 1). ПЯВ в скважине 1220 был произведен 14.09.1980 года на глубине 483 м, мощность взрыва 20-150 кт [1], по некоторым данным – 190 кт [2]. Испытания были проведены в интересах создания и совершенствования ядерного оружия.

В геологическом отношении участок представлен нижне-каменноугольными осадочными и метаморфическими отложениями – глинами, песчаниками, алевролитами и кристаллическими сланцами. Район имеет сложное тектоническое строение, разбит на отдельные блоки большим количеством региональных разломов преимущественно северозападного простирания. В центральной части района исследований (непосредственно в месте расположения скважины 1220) наблюдаются выходы на поверхность интрузивных образований – средне-

верхне-каменноугольных гранитов и диоритов. Подземный ядерный взрыв был произведён в гранитах.



Рисунок 1. Схема размещения боевых скважин на площадке Балапан (скважина 1220 отмечена красным цветом)

Сейсмические наблюдения 1980-1981 гг.

На рисунке 2 представлена схема сейсмических наблюдений в районе скважины 1220, выполненных в 1980 г. (до взрыва) и 1981 г. (после проведения ПЯВ). Целью работ являлось определение размеров и скоростных параметров зоны откольных явлений, образующейся в кровле ненарушенных пород фундамента в результате воздействия ПЯВ. Наблюдения проводились по 4 профилям, пересекающимся на скважине. Длина профилей 3220 м, шаг наблюдений – 5 м, расстояние между пунктами взрыва – 115 м. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось путем подрыва зарядов в скважинах глубиной 3-5 м, мощность зарядов составляла 0.2-15 кг. Упругие сейсмические колебания регистрировались 48-канальной станцией «Поиск-1-48» и сейсмоприемниками СВ-20. Сейсмические исследования выполнялись геофизической партией №27 гидрогеологической

экспедиции 16-го района ПГО «Гидроспецгеология» [3].

В настоящей статье использованы результаты, полученные по двум профилям – ПР II направления Запад-Восток и ПР IV направления Юг-Север. В наблюдениях была использована система полуторного непрерывного профилирования [4] с выносными пунктами взрыва (рисунок 3).

На рисунке 4 представлен пример системы годографов первых вступлений продольных волн по ПР II, построенных по результатам наблюдений до и после взрыва. На годографах воздействие ПЯВ на окружающие горные породы проявилось в виде значительного увеличения времен пробега сейсмической волны от ~100 до ~200 мс на интервале профиля от 1000 до 2500 м и формирования аномалии приращения времени (порядка 70-80 мс) на прямом годографе на интервале 1800-2300 м.



 боевая скважина и ее номер, 2 – гидрогеологическая скважина и ее номер, 3 – сейсмический профиль, его номер и пикеты





Рисунок 3. Система сейсмического профилирования 1980-1981 гг. в районе скважины 1220



Рисунок 4. Годографы первых вступлений продольных волн, наблюденные в районе скважины 1220 до (а) и после (б) ядерного взрыва

С использованием годографов первых вступлений способом "to" был определен рельеф кровли фундамента, способом "разностного годографа" рассчитаны значения граничной скорости на кровле фундамента до и после взрыва [5, 6]. На рисунке 5 представлен сейсмогеологический разрез по ПР II, полученный в результате обработки данных метода преломленных волн.

Зелёной пунктирной линией на рисунке 5 отмечено положение кровли ненарушенного фундамента до проведения ядерного взрыва в скважине 1220, выше которого вплоть до подошвы осадочного чехла, представленного четвертичными отложениями и неогеновыми глинами, лежит кора выветривания палеозойского фундамента. Зелёной непрерывной линией отмечен рельеф кровли ненарушенного фундамента после проведения взрыва. Так называемая "зона откольных явлений" обозначена на рисунке красной штриховой сеткой. Общие горизонтальные размеры выявленной откольной зоны определяются как $R/q^{1/3} - 260$ м/кт^{1/3} (где q – мощность взрыва в килотоннах ТНТ), глубина проявления откольной зоны – 19 м/кт^{1/3}, что соответствует расчётам размеров областей поствзрывной дезинтеграции горных

пород, представленным в [7]. Значения граничной скорости для преломляющей границы, образовавшейся в результате взрыва, приведены на сейсмогеологическом разрезе.

С использованием информации о временах пробега сейсмических волн в районе скважины 1220, полученной по годографам первых вступлений (рисунок 4), были проведены томографические расчеты с целью построения двухмерных скоростных разрезов. Расчёты выполнялись в программе Firstomo/X-Тото (www.xgeo.ru). Стартовая скоростная модель определялась в соответствии с наблюденными временами (годографами) и задавалась в двухмерном варианте в виде слоисто-градиентной модели отдельно для каждой ситуации – до и после взрыва. В таблице 1 стартовые модели представлены в одномерном виде. Необходимо заметить, что перед выполнением томографических расчётов не были отдельно определены такие параметры зоны малых скоростей (ЗМС), как рельеф её подошвы и скорость продольных волн, в связи с чем этот слой не был зафиксирован в стартовой модели, что, в свою очередь, могло привести к некоторому искажению скоростной картины в нижележащих слоях.



1 – Четвертичная система; 2 – Неогеновая система; 3 – Каменноугольная система. Турнейский ярус. Кояндинская свита; 4 – Верхний палеозой, граниты; 5 – супесь, суглинок с примесью песка и глины; 6 – глины; 7 – песчаники; 8 – кремнистые сланцы; 9 – углисто-глинистые сланцы; 10 – тектоническая трещина; 11 – литологическая граница; 12 – скважина и ее номер; 13 – зона откольных явлений; 14 – преломляющая граница I и значения граничных скоростей по ней; 6 – до взрыва, а – после взрыва); 15 – преломляющая граница II и значения граничных скоростей по ней; 6 – до взрыва, а – после взрыва); 15 – преломляющая граница II и значения граничных скоростей по ней;

Рисунок 5. Сейсмогеологический разрез по ПР II, полученный по данным сейсмических наблюдений МПВ 1980-1981 гг. в районе скважины 1220

Таблица 1. Стартовые модели для работ 1980-1981 гг. в одномерном представлении

Стартовая мод	цель до взрыва	Стартовая модель после взрыва		
глубина слоя, м (кровля – подошва)	глубина слоя, м скорость в слое, м/с кровля – подошва) (на кровле – подошве)		скорость в слое, м/с (на кровле – подошве)	
0 ÷ 15	500 ÷ 1500	0 ÷ 20	500 ÷ 1500	
15 ÷ 30	1500 ÷ 2500	20 ÷ 35	1500 ÷ 2500	
30 ÷ 40	2500 ÷ 3500	35 ÷ 45	2500 ÷ 3000	
40 ÷ 150	3500 ÷ 5000	45 ÷ 150	3000 ÷ 5000	

На рисунке ба представлен график абсолютных значений временных невязок между наблюдёнными и расчётными годографами для финальной итерации, которые не превышают 0.008 мс, при этом основная часть невязок лежит в интервале ±0.004 с. Для демонстрации заполнения сейсмическими лучами изучаемой области на рисунке бб представлена лучевая схема для финальной итерации. При общей глубине проникания лучей порядка 150 м на схеме выделяются области «тени» относительно неболь-

ших размеров, не охваченные лучами. На скоростных разрезах эти области представлены посредством интерполяции. Нужно понимать, что такая глубина проникания лучей и их достаточно плотное распределение на просвечиваемом участке для использованной системы профилирования достигается только за счёт большого количества точек приёма на встречных «длинных» годографах, что, разумеется, не совсем корректно для решения поставленной задачи.



Рисунок 6. График абсолютных значений временных невязок в результате томографических расчётов (а); лучевая схема (б) для работ 1980-1981 гг.



Рисунок 7. Скоростные разрезы, построенные в результате томографических расчётов по наблюдениям 1980 и 1981 гг. до (а) и после (б) взрыва

Пример скоростных разрезов, построенных в результате томографических расчётов по сейсмическим наблюдениям 1980-1981 гг. до и после взрыва, представлен на рисунке 7. На модели, полученной по данным до проведения ПЯВ (рисунок 7а), кровля палеозойского фундамента залегает на глубине порядка 50 м, граничная скорость лежит в интервале значений 3800 ÷ 4200 м/с. После проведения взрыва (рисунок 7б) на интервале профиля от 1400 до 2400 м наблюдается разрушение кровли фундамента с понижением скорости на глубине 50 м до 2500 м/с. В районе ПК 1600 (на линии проекции скважины 1220) область резко пониженных значений скорости порядка 2000 м/с прослеживается до глубины -130 ÷ -140 м. Такое сильное разрушение горного массива, прослеживаемое практически до дневной поверхности, помимо значительной массы заряда, объясняется также геологическими особенностями вмещающей среды – граниты, в которых был проведён взрыв, относятся к «хрупкому» петрофизическому классу пород [8] и более подвержены фактору механического взрывного разрушения.

Сейсмические наблюдения 2006 г.

Повторные сейсмические наблюдения в районе скважины 1220 выполнены с целью определения современной структуры массива горных пород и выявления возможных изменений, произошедших с вмещающей средой за более чем 25-летний период после проведения ПЯВ.

Наблюдения выполнялись по двум ортогональным сейсмическим профилям длиной 1380 метров каждый. Азимутальное направление профилей: широтное (Запад-Восток) и меридиональное (Юг-Север). Шаг между пунктами взрыва составил 115 м, между пунктами наблюдения – 10 м. Устье скважины 1220 расположено вблизи места пересечения профилей на пикетной отметке 690 м (рисунок 8а). В качестве источника возбуждения упругих сейсмических колебаний был использован падающий груз (~15 кДж). Регистрация производилась двумя 24-канальными цифровыми станциями ИСН-01-24 с помощью вертикальных сейсмометров. На рисунке 86 представлена полная корреляционная система сейсмического профилирования.

На рисунке 9 приведены наблюденные годографы первых вступлений продольных волн для сейсмических наблюдений 2006 г. Следует отметить, что годографы обоих направлений имеют достаточно контрастный характер, что может свидетельствовать о неоднородности скоростного разреза.

Для томографических расчётов стартовая слоисто-градиентная модель задавалась в двухмерном варианте для двух профилей исходя из наблюдённых времён, но, также как и для работ 1980-1981 гг., без учёта параметров ЗМС. В таблице 2 приведена стартовая модель для двух ортогональных профилей в одномерном виде.

Таблица 2. Стартовая модель для работ 2006 г. в одномерном представлении

Глубина слоя, м (кровля – подошва)	Скорость в слое, м/с (на кровле – подошве)
0 ÷ 15	500 ÷ 700
15 ÷ 25	700 ÷ 1600
25 ÷ 35	1600 ÷ 2800
35 ÷ 150	2800 ÷ 5000

На рисунке 10а представлен график абсолютных значений временных невязок между наблюдёнными и расчётными годографами для финальной итерации, которые не превышают 0.005 мс, при этом основная часть невязок лежит в интервале ±0.003 с. Для примера заполнения сейсмическими лучами изучаемой области на рисунке 10б представлена лучевая схема для профиля широтного направления. На схеме также выделяются области тени относительно небольших размеров на глубинах в основном более 90 м, но в данном случае заполнение лучами области просвечивания обеспечено полной системой профилирования.





 расположение устья скважины 1220, 2 – пункты возбуждения упругих колебаний, 3 – пункты приёма сейсмических сигналов а

Рисунок 8. Схема профилей сейсмических наблюдений 2006 г. (а); система сейсмического профилирования



Рисунок 9. Наблюденные годографы первых вступлений продольных волн по наблюдениям 2006 г. вдоль профилей широтного (а) и меридионального (б) направлений



Рисунок 10. График абсолютных значений временных невязок в результате томографических расчётов (a); лучевая схема (б) для работ 2006 г.

Скоростные разрезы, построенные в результате томографических расчетов для данных 2006 г. приведены на рисунках 11 и 12 в разделе сравнительного анализа скоростных моделей, полученных в 1980-1981 и 2006 гг.

Анализ скоростных моделей в районе скважины 1220

Поскольку сейсмические наблюдения в 2006 г. выполнялись по более коротким профилям, для корректности сопоставления скоростных моделей разных лет разрезы для работ 1980-1981 гг. были адаптированы к шкале наблюдений 2006 г. Все размеры на осях моделей приведены в метрах, отношение вертикального и горизонтального масштабов – 1:1.

На рисунке 11 представлены двухмерные скоростные модели для профиля широтного направления. Более высокая детализация и дифференцированность скоростных моделей для работ 2006 г. (рисунок 11в) относительно моделей 1980-1981 гг. (рисунок 11а, б) объясняется использованием в ходе полевых наблюдений полной корреляционной системы непрерывного профилирования.

Как видно из рисунка 11а, скоростной разрез до проведения ПЯВ имеет спокойный характер с горизонтальной преломляющей границей, отделяющей отложения ЗМС от пород фундамента и залегающей на глубине -25 ÷ -30 м. Значения скорости на кровле фундамента лежат в интервале 3.6 ÷ 4.0 км/с. Распределение скоростного поля в фундаменте в основном также равномерное с относительно линейным градиентом и субгоризонтальными изолиниями скорости, изменяющейся от 4.0 км/с на кровле до 5.2 ÷ 5.5 км/с на глубине 150 м.

Скоростная ситуация в районе скважины 1220 спустя несколько месяцев после взрыва представлена на рисунке 116. Под воздействием взрывной ударной волны кровля фундамента в области, прилегающей к эпицентру ПЯВ, была разрушена в результате образования зоны откола с горизонтальными размерами порядка 800 м и глубиной залегания подошвы на уровне –130 ÷ –140 м [9]. Скорость продольных волн в откольной зоне меняется от 2.0 км/с на кровле зоны до 3.0 км/с на её подошве.

Результаты сейсмических исследований 2006 г. (рисунок 11в) демонстрируют особенности изменения скоростного поля по прошествии длительного времени после проведения взрыва – наблюдается перераспределение скоростных параметров участка относительно поствзрывной ситуации. В эпицентральной области ПЯВ на глубине существенной первоначальной взрывной дезинтеграции пород ($-60 \div -80$ м) наблюдается восстановление скоростных свойств, характерных для кровли фундамента со значениями скорости порядка $3.2 \div 3.6$ км/с. На глубине свыше -90 м скорости выходят на свои исходные довзрывные значения в районе $5.0 \div$ 5.5 км/с.



Рисунок 11. Скоростные модели по результатам сейсмических наблюдений в районе скважины 1220 по широтному профилю: а – до взрыва (1980 г.); б – практически сразу после взрыва (1981 г.); в – спустя 25 лет после взрыва (2006 г.)



Рисунок 12. Скоростные модели по результатам сейсмических наблюдений в районе скважины 1220 по меридиональному профилю: а – до взрыва (1980 г.); б – практически сразу после взрыва (1981 г.); в – спустя 25 лет после взрыва (2006 г.)

При этом на краях разреза наблюдается увеличение глубины залегания высокоскоростных пород и область пониженных значений скорости (до 3.0 км/с) прослеживается по всей длине разреза до глубины $-60 \div -80$ м, более чем вдвое превышая исходную глубину залегания подошвы ЗМС. Скоростное поле нижнего слоя имеет неоднородный, раздробленный характер с блоковой структурой и вертикально падающими границами.

На скоростных разрезах, полученных в разное время по меридиональному профилю (рисунок 12), наблюдаются все особенности поведения скоростного поля, отмеченные выше для широтного профиля.

Процесс поэтапного изменения скоростных характеристик приповерхностного слоя вмещающей среды в районе скважины 1220 после воздействия на неё подземного ядерного взрыва можно описать следующим образом:

— формирование в момент взрыва откольной зоны, нарушение кровли фундамента и осадочного чехла в районе эпицентра ПЯВ привело к резкому уменьшению скорости продольных волн в пределах обозначенной проницаемой области с горизонтальными размерами не менее 190 м/кт^{1/3} и глубиной не менее 25 м/кт^{1/3} [1, 7].

 далее с течением времени под воздействием различных факторов (литостатического давления, обводнённости массива, внешнего природного и техногенного сейсмического воздействия) происходило плотностное перераспределение горных пород в сторону консолидации среды с постепенным заполнением поствзрывных пустот и трещин обломочным материалом и уплотнением.

– на момент исследований 2006 г. процесс возвращения среды в исходное состояние не завершился, поскольку в скоростном поле проявляется ряд артефактов – заглубление подошвы низкоскоростного слоя (остаточные явления проницаемой откольной зоны) и блоковая структура разреза.

Кроме «литологического» объяснения восстановления массива горных пород после проведения ПЯВ можно рассмотреть и «гидрогеологическую» версию. Одним из основных механических эффектов мощного подземного взрыва является изменение гидрорежима подземных вод, связанное с резким повышением уровня грунтовых вод в момент проведения испытаний, затем значительным падением уровня после взрыва и постепенным восстановлением первоначального уровня подземных вод во всей области течения после заполнения образованных при взрыве пустот. Процесс восстановления первоначального уровня в зависимости от геологотектонических и физико-механических условий вмещающей среды может занимать от 10 суток до нескольких месяцев [10]. Согласно «гидрогеологической» теории восстановление скоростных параметров среды в районе скважины 1220 возможно за счёт заполнения поствзрывных структур не твёрдым обломочным материалом, а грунтовыми водами после восстановления исходного гидрорежима.

Заключение

Сейсмические исследования, проведённые в районе ПЯВ в скважине 1220 в 1980-1981 гг. (до и сразу после взрыва) и в 2006 г. (спустя 26 лет от момента взрыва), позволили получить информацию о степени нарушенности среды до глубины 150 м под воздействием ядерного испытания и о состоянии её современной структуры. Основные полученные результаты можно свести к следующему:

1) Подземный ядерный взрыв, проведённый на глубине порядка 500 м, существенно нарушил состояние горных пород кровли фундамента и осадочного чехла в процессе формирования откольной зоны. В скоростных свойствах среды это отобразилось резким уменьшением скорости продольных волн в фундаменте в эпицентральной области ПЯВ с 5.0 до 2.5 км/с.

 Результаты последних исследований 2006 г. свидетельствуют о частичном восстановлении первоначальных скоростных свойств изучаемого массива, что может говорить о динамическом процессе возвращения среды в исходное равновесное состояние.

В рамках полученных результатов на примере ядерного испытания в гранитном массиве скважины

1220 можно сделать вывод, что процесс восстановления геологической среды от последствий деструктивного воздействия подземного взрыва занимает достаточно продолжительное время. К настоящему моменту, судя по всему, возвращение параметров массива к начальному состоянию не завершено, что в реальной среде может проявляться присутствием проницаемых приповерхностных структур над очагами ПЯВ, способствующих переносу техногенных радионуклидов из более глубинных областей к дневной поверхности.

В рамках геоэкологического изучения территории СИП для контроля за структурой геологического разреза в местах проведения ПЯВ и выявления происходящих в нём изменений, по меньшей мере, на глубинах кровли фундамента, необходимо проводить режимные сейсмические исследования в районе боевых скважин по одинаковой системе наблюдения. Для получения полноценного объёма скоростных параметров с целью более точного определения физико-механических свойств среды, кроме продольных волн к обработке необходимо привлекать и поперечные, для чего целесообразно использовать трехкомпонентную регистрацию сигналов.

Литература

- Михайлов, В. Н. Ядерные испытания СССР. Том II: технологии ядерных испытаний СССР. Воздействие на окружающую среду. Меры по обеспечению безопасности. Ядерные полигоны и площадки [Текст] / коллектив авторов под руководством В. Н. Михайлова. – РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997.
- Моделирование миграции загрязняющих веществ в подземных водах в районе Семипалатинского полигона: технический отчёт по проекту МНТЦ К-056-96 (окончат.) : / Институт геофизических исследований НЯЦ РК ; рук. Беляшов Д.Н. - фонды ИГИ НЯЦ РК, 1999. - 373 с.
- 3. Изучение размеров и физических параметров зоны откольных явлений на объекте 1220: технический отчёт: / партия 27 : рук. Шпаковский В. И., 1980.
- 4. Гурвич, И. И. Сейсмическая разведка [Текст] / И. И. Гурвич, Г. Н. Боганик. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. : Недра, 1980. 551 с.
- 5. Гурвич, И. И. Сейсморазведка. Справочник геофизика [Текст] / И. И. Гурвич, В. П. Номоконов // М. : Недра, 1981. 464 с.
- 6. Шерифф, Р. Сейсморазведка. Том 1: история, теория и получение данных [Текст] / Р. Шерифф, Л. Гелдарт ; перевод с англ. Е. А. Ефимовой : [под ред. А. В. Калинина]. М. : Мир, 1987. 447 с.
- 7. Адушкин, В. В. Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах [Текст] / В. В. Адушкин, А. А. Спивак // Физика горения и взрыва. 2004. №6. С. 15-26.
- Старостин, В. И. Структурно-петрофизические и геодинамические аспекты выбора массивов кристаллических пород в связи с проблемами захоронения радиоактивных отходов [Текст] / В. И. Старостин, В. И. Величкин, В. А. Петров, А. Б. Волков, Б. Т. Кочкин // Геоэкология. – 1995. - №6. - С. 17-26.
- 9. Адушкин, В. В. Геомеханика крупномасштабных взрывов [Текст] / В. В. Адушкин, А. А. Спивак // М. : Недра, 1993. 319 с.
- Адушкин, В. В. Изменение уровня подземных вод в результате проведения подземных ядерных испытаний [Текст] / В.
 В. Адушкин, А. А. Спивак // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993. №9. С. 38-43.

СЕМЕЙ СЫНАУ ПОЛИГОНЫНДАҒЫ №1220 ҰҢҒЫМАСЫ АУДАНЫНДА ОРТАНЫҢ ЖЫЛДАМДЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРДЕЛЕУ

Русинова Л.А., Беляшов А.В., Ларина Т.Г.

Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Семей сынау полигонындағы № 1220 ұңғыманың гранит массивінде ядролық жарылысы жүргізілген учаскеде сынған толқындар әдісімен 1980-1981 ж.ж. сейсмикалық зерттеулері жүргізілген. Сыйыстырушы таужыныстар блогына ядролық жарылыстың әсерінің сипаттамасы туралы толық құнды ақпаратын алу үшін сейсмикалық бақылаулары жарылыс алдында және одан кейін де жүргізілген. Бұл бақылаулардың сақталып қалған бастапқы деректері томографиялық есептер мен терендігі 150 м. дейін екіөлшемді жылдамдық модельдерін салу үшін пайдаланылған. 2006 ж. сол учаскеде сынған-рефракцияланған толқындар әдісімен қайталанған сейсмикалық бақылаулары орындалған. Алынған жылдамдық модельдерді кешенді талдауы ЖЯЖ жүргізілгеннен кейіен бірде ортаның бұзылу дәрежесін анықтауына және, қазіргі нәтижелермен салыстыру жолымен, ЖЯЖ эпиорталығының жер бетіне жақын облысында өтіп жатқан геомеханикалық процесстердің динамикасын бағалауына мүмкіншілік берген.

STUDIES OF 1220 BOREHOLE GEOLOGICAL MEDIA VELOCITY PARAMETERS (SEMIPALATINSK TES SITE)

L.A. Rusinova, A.V. Belyashov, T.G. Larina

Institute of Geophysical Researches, Kurchatov, Kazakhstan

Seismic investigations using refraction waves method at the place of the underground nuclear explosion implementation in the granite massive of the borehole 1220 (Semipalatinsk Test Site) has been conducted in 1980-1981. With the purpose to obtain a comprehensive information about the nature of the underground nuclear explosion impact on the surrounding rocks the seismic observations have been conducted before and after the testing. Archival raw data from these observations have been used for the tomographic calculations and 2D velocity sections plotting to the depth of 150 m. In 2006 repeated seismic investigations have been carried out at this place using the refracted-diving waves method. Integrated analysis of the obtained velocity models makes it possible to define the level of the geological media disintegration just after the explosion and, by comparison with the modern results, to estimate the dynamics of the geomechanical processes, going in the epicentral sub-surface area of the underground nuclear explosion.



ПАМЯТИ ДИАСА КЕНЖЕБЕКОВИЧА ДАУКЕЕВА

Год назад (2012 г.) ушел из жизни талантливый ученый-физик с энциклопедическими знаниями, обладавший высокими моральными качествами, Даукеев Диас Кенжебекович. Это, несомненно, была большая потеря для Казахстанской физической науки.

Диас Кенжебекович являлся образцом ученого с широким кругозором, его глубокие знания в области физики твердого тела, радиационной физики и радиационного материаловедения, экспериментальной ядерной физики, радиационной экологии оставили яркий неизгладимый след в его многочисленных научных публикациях, в работах его учеников и последователей. Диаса Кенжебековича, как талантливого ученого, знали и ценили не только отечественные, но и многие зарубежные выдающиеся и известные ученые, с кем ему приходилось общаться и сотрудничать. Среди них соавторами его научных работ были такие известные физики, как Агранович В.Я., Конобеев Ю.В., Лебедев С.Я., Михлин Э.Я., Корсунский М.И., Кельман В.М., Саралидзе З., Наскидашвили И.А., Чкуасели В.Ф. и многие другие.

Диас Кенжебекович Даукеев родился в 1941 г. в г. Семипалатинске в семье работников народного образования. Отец работал заведующим Областного отдела народного образования, ректором Семипалатинского педагогического института, заведующим отдела Министерства образования КазССР. Мать была преподавателем казахского языка, методистом, старшим научным сотрудником НИИ педагогических наук им. Алтынсарина.

Диас Кенжебекович окончил с отличием среднюю школу в г. Семипалатинске в 1958 г. и с красным дипломом Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника» в 1963 г. В период с 1966 г. по 1970 г. учился в аспирантуре в Физико-энергетическом институте в г. Обнинске (РФ). В 1971 году защитил кандидатскую диссертацию на тему «Излучение электронной эмиссии, возникающей при прохождении осколков деления через тонкие металлические пленки» в Физикоэнергетическом институте (г. Обнинск, РФ). В 1989 году защитил докторскую диссертацию на тему «Закономерности физических процессов в зоне облучения материалов осколками деления» в специализированном совете Московского института электронного машиностроения (РФ).

Основная научная деятельность Диаса Кенжебековича в период с 1964 по 1992 годы прошла в Институте ядерной физики АН КазССР, где он работал инженером, научным сотрудником, а с 1985 года заведующим лабораторией радиационной диффузии. Он был непосредственным организатором создания при ИЯФ АН КазССР специализированного Совета по защите кандидатских и докторских диссертаций и его первым ученым секретарем, постоянным членом Совета. Научные интересы Диаса Кенжебековича охватывали широкий спектр направлений: от физики полупроводников, радиационной физики твердого тела, высокотемпературных сверхпроводников, фундаментальных и прикладных исследований в области взаимодействия заряженных частиц с твердым телом до исследований проблем радиационной экологии, трансферта технологий. В частности, многоплановые исследования по проблемам физики взаимодействия осколков деления ядер урана с твердым телом, включали:

исследования диффузии продуктов деления (ПД)
 через эмиттерные материалы термоэмиссионных
 преобразователей энергии деления ядер урана в
 электрическую;

 создание высокочувствительного термодесорбционного спектрометра, с помощью которого исследованы процессы термодесорбции гелия из реакторных материалов;

 разработку методик расчетов выхода продуктов деления из оболочек тепловыделяющих элементов при их работе в ядерных реакторах;

 разработку методов исследований кинетики распыления материалов осколками деления в активной зоне реактора BBP-K,

 разработку методик исследований выходных характеристик вторичных частиц – электронов, ионов, атомов, эмитируемых из твердого тела при бомбардировке его поверхности осколками деления.

Полученные экспериментальные результаты имеют фундаментальное значение для построения теории взаимодействия высокоэнергетичных тяжелых многозарядных ионов с твердым телом, в частности, для установления механизма передачи энергии из электронной подсистемы твердого тела в решеточную подсистему.

Практическая ценность полученных под руководством Диаса Кенжебековича научных результатов и разработанных методик подтверждается их широким использованием на экспериментальной базе реакторного комплекса ВВР-К, в Физико-энергетическом институте (г. Обнинск, РФ), Подольском научно-исследовательском технологическом институте, НПО «Энергия» (г. Москва, РФ), Институте теоретической и экспериментальной физики (г. Москва, РФ).

В 1989 году он проводил научные исследования процессов перемешивания при облучении кремния тяжелыми ионами методом Резерфордовского обратного рассеяния в Салфордском университете (Великобритания), являлся научным советником магистратуры.

После получения независимости Казахстаном Диас Кенжебекович был назначен заместителем министра впервые созданного Министерства науки и новых технологий. Основным достижением его деятельности в этот период (1992-1995 годы) было создание системы государственной научно-технической экспертизы проектов и организация научно-технических центров. На посту заместителя министра он отвечал за внешние связи и информатизацию, курировал работу Национального ядерного центра и Центра по радиоэлектронике и связи, возглавлял работу по формированию Республиканских целевых программ «Развитие атомной энергетики в Казахстане», «Развитие радиоэлектроники в Казахстане», «Информатизация народного хозяйства Республики Казахстан», руководил работой НТС Министерства и представлял Казахстан в Межгосударственном научно-техническом совете.

В 1995 году Диас Кенжебекович стал заместителем генерального директора Национального ядерного центра РК и участвовал в радиоэкологических исследованиях на территории бывших ядерных полигонов. В качестве заместителя директора НЯЦ возглавлял работу технического комитета при Госстандарте по стандартизации методов радиологического контроля, подготовил несколько инвестиционных проектов, руководил рядом программ и проектов для НЯЦ и Министерства экологии и биоресурсов и возглавлял ВТК по государственной экологической экспертизе Балхашской атомной электростанции. В результате его деятельности была создана виртуальная радиоэкологическая лаборатория совместно с лабораторией Лос-Аламоса (США) в рамках проекта ЮНЕСКО и проведена оценка переноса радионуклидов подземными водами на Семипалатинском ядерном полигоне по проекту МНТЦ.

Особое место в деятельности Диаса Кенжебековича занимали проблемы передачи знаний и научнопедагогическая деятельность. Примером тому служат такие его прекрасные работы, как «Некоторые закономерности переноса знаний и технологий в производственную сферу», «Technology transfer problems for the Republic of Kazakhstan", «Курс лекций по диффузии радиоактивных элементов в твердом теле», «Курс лекций по радиационной экологии и воздействию излучений на объекты окружающей среды», а также ряд научных статей, посвященных радиоэкологическим проблемам в нефтепромысловых районах Казахстана.

Диас Кенжебекович внес большой вклад в становление национальных научных кадров, подготовил пять кандидатов и одного доктора физикоматематических наук. Преподавал курсы по радиационной экологии на казахском и русском языках в Алматинском государственном университете им. Абая. В 1993 году он стал членом Международного союза радиоэкологов, а в 1994 году ему было присвоено ученое звание профессора по физике.

В 1999 году Диас Кенжебекович был приглашен на работу в Национальную компанию «Казахойл», где курировал вопросы безопасности, охраны труда и окружающей среды, обучения местных кадров и замещения ими иностранных специалистов на Карачаганакском месторождении. В 2002 – 2004 годах работал над аналогичными проектами в компаниях «КазТрансГаз» и «КазМунайГаз». За успешную работу в данной области награжден грамотами и памятным знаком «Почетный нефтяник РК».

В 2004 году Диасу Кенжебековичу была предложена должность декана факультета энергетики и нефтегазовой индустрии Казахстанско-Британского технического университета, а впоследствии - профессора, где он проработал до 2010 года. За это время он ввел новые программы обучения на факультете с учетом зарубежного опыта, разработал учебнометодические комплексы по следующим дисциплинам - «Экология», «Радиационная экология», «Экология и энергетика», «Методы и средства контроля в промышленной экологии», «Экологический кодекс», «Экологический менеджмент». По этим дисциплинам он читал лекции на английском и русском языках, осуществлял руководство студентами по специальности «Прикладная экология», способствовал прохождению ими практики в крупных нефтегазовых компаниях («КазМунайГаз», «КазТрансГаз», Карачаганакский проект, Кашаганский проект и др.).

Диасом Кенжебековичом опубликованы свыше ста работ в области физики твердого тела, радиационной экологии и охраны окружающей среды, материаловедения, научного приборостроения и организации науки. Награжден Почетной грамотой Президиума АН КазССР (1991 г.) и Почетной грамотой Министерства энергетики и минеральных ресурсов РК (2003 г.).

О том, что Диас Кенжебекович был незаурядным человеком и талантливым ученым, лучше всего свидетельствует высказывание Роберта Мэнсона, бывшего профессора Казахстанско-Британского Технического Университета: «Мне очень нравится дискутировать с Диасом Даукеевым. Это очень яркий, оригинальный человек. Декан Диас для меня самый любимый коллега, который очень много знает. Это человек науки – настоящий ученый! Я помню все наши разговоры, которые были всегда по делу. Спасибо Вам, что я встретил Вас в жизни.»

Диас Кенжебекович, как человек с большой буквы, талантливый ученый и прекрасный наставник, сделавший много для развития казахстанской физической науки, пропаганды научных знаний, подготовки научных кадров и высококвалифицированных специалистов, навсегда останется в памяти и сердцах его коллег, учеников и всех тех, кто был сопричастен к совместному научному творчеству.

Жотабаев Ж.Р., Хромушин И.В., Аксенова Т.И., Медеуов Б.И., Мусурманкулов Р.Т., Жотабаева Р.Т., Касымов С.И., Тусеев Т.Т. Christophe Journeau, 47 Paul David W. Bottomley, 47 Алдияров Н.У., 24 Артемов С.В., 9 Архангельский Н.В., 94 Асанов А.Б., 31 Бакланов В.В., 47 Бакланова Ю.Ю., 70 Бактыбаев М.К., 9 Барсуков Н.И., 34 Батырбеков Э.Г., 5 Беляшов А.В., 116 Буртебаев Н., 9 Васильев Ю.С., 47 Витюк Г.А., 70 Вурим А.Д., 65 Гныря В.С., 34 Гордиенко Ю.Н., 34 Горин Н.В., 94 Горлачев И.Д., 5 Григорьев С.И., 88 Гринштейн Ю.А., 111

СПИСОК АВТОРОВ

Дуйсебаев А., 18 Дуйсебаев Б.А., 18 Жарекешев И.Х., 77 Жданов В.С., 47 Жолдыбаев Т.К., 18 Зазулин Д.М., 9 Заурбекова Ж.А., 34 Зуев В.А., 58 Игамов С.Б., 9 Игнашев В.И., 58 Карташов В.М., 24 Кенжин Е.А., 34 Керимкулов Ж.К., 9 Колодешников А.А., 47, 58 Корнеев А.А., 94 Котов В.М., 70 Кукушкин И.М., 47 Кульсартов Т.В., 34 Ларина Т.Г., 116 Липилина Е.Н., 94 Лисицын В.Н., 31 Логвинов О.В., 111

Михайлова Н.Н., 102 Муканова А.О., 34 Мурзадилов Т.Д., 111 Пахниц А.В., 65 Полешко Н.Н., 102 Понкратов Ю.В., 34 Прозорова И.В., 41 Русинова Л.А., 116 Садыков Б.М., 18 Соколов И.А., 58 Супрунов В.И., 70 Сураев А.С., 70 Тажибаева И.Л., 34 Талпакова К.А., 24 Туленбергенов Т.Р., 58 Тулубаев Е.Ю., 34 Чихрай Е.В., 34 Чуриков Ю.И., 94 Шестаков В.П., 34 Ярмухамедов Р., 9

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата A4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается основной текст.

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 названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.jpg, *.wmf с разрешениями 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:

- рецензия высококвалифицированного специалиста (доктора 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. У.П. Козтаева тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: KOZTAEVA@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б http://www.nnc.kz/vestnik

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2013

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000 г. Выдано Министерством культуры, информации и общественного согласия 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





