ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 3(35), СЕНТЯБРЬ 2008

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н. КАДЫРЖАНОВ К.К.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: К.Х.Н. АРТЕМЬЕВ О.И., д.т.Н. БАЙГУРИН Ж.Д., БЕЛЯШОВА Н.Н., к.ф.-м.н. ВОЛКОВА Т.В. к.т.н. ГИЛЬМАНОВ Д.Г., д.ф.-м.н. ЖОТАБАЕВ Ж.Р. – заместитель главного редактора, к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.т.н. МУКУШЕВА М.К., д.б.н. ПАНИН М.С., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., к.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П. д.ф.-м.н. ТАКИБАЕВ Ж.С.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

3(35) ШЫҒАРЫМ, ҚЫРҚҮЙЕК, 2008 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 3(35), SEPTEMBER 2008

Сообщаем Вам, что 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. В настоящее время редакция располагает возможностью быстрой публикации статей.

СОДЕРЖАНИЕ

ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. І. ЛАЗЕРЫ С ПРЯМОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ Батырбеков Э.Г.	5
ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. II. ЛАЗЕРЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙБатырбеков Э.Г.	18
РАЗРАБОТКА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БЛОКОВ, ВМЕЩАЮЩИХ ПОДЗЕМНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ (ПЯВ) ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ Шайторов В.Н., Жолдыбаев А. К., Кислый Б.И.	26
ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ РАСТЕНИЯМИ ЛУГОВОГО БИОГЕОЦЕНОЗА Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Кабдыракова А.М., Магашева Р.Ю., Паницкий А.В., Ястребкова Н.В., Байгазинов Ж.А.	33
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ SS316IG В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И., Кульсартов Т.В., Понкратов Ю.В., Чихрай Е.В.	39
ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОМПЛЕКСОМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ (ПЯВ) НА ПРИМЕРЕ БОЕВОЙ СКВАЖИНЫ 1207 Фролов З. Н., Ларина Т.Г., Дроздов А.В.	45
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОТОКА ШТОЛЬНИ №176 ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН» Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Умаров М.А., Айдарханов А.О.	52
ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ОДИНОЧНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ (ПЯВ) В СКВАЖИНАХ УЧАСТКА БАЛАПАН (СИП) СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ОБМЕННЫХ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ Шелехова О.Х.	59
МЕХАНИЗМЫ ОБМЕНА В СИСТЕМЕ ГАЗ-ПРОТОННЫЙ ПРОВОДНИК Мунасбаева К.К., Хромушин И.В., Жотабаев Ж.Р., Аксенова Т.И., Корниенко П.А.	66
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОНННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЧЕХЛА ТВС И ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА РЕАКТОРА БН-350 В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ СУХОГО ХРАНЕНИЯ	71
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ДЕЛЯЩЕГОСЯ ВЕЩЕСТВА Котов ВМ., Дудко А.С., Иркимбеков Р.А.	76
ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В ТОНКОСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ ВеТі Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Иманбеков Ж.Ж., Слюсарев А.П., Антонюк В.И.	80
ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ	85
МАГНИТУДНЫЕ ПОПРАВКИ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НЯЦ РК Михайлова Н.Н., Мукамбаев А.С.	90

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОТНОШЕНИЯ S/P ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ АЗИИ 101 Аксамбиев С.С., Соколова И.Н.
ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ПЛОЩАДОК СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ ПАРКА ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (ПЯТ)
ИНФОРМАТИВНОСТЬ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ БЮЛЛЕТЕНЕЙ ЦЕНТРА ДАННЫХ ИГИ НЯЦ РК
ВЫХОД В РЕЖИМ СТАЦИОНАРНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО РЕАКТОРА С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ
ОПЫТ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НИТРИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ МАГНЕТРОННОМ ОСАЖДЕНИИ

УДК: 539.196; 535.37

ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. І. ЛАЗЕРЫ С ПРЯМОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

Батырбеков Э.Г.

СП «КК Интерконнект», Алматы, Казахстан

Обсуждаются два возможных пути преобразования ядерной энергии в лазерное излучение – прямая и комбинированная ядерная накачка лазеров. Рассмотрены особенности активных сред лазеров с ядерной накачкой. Дан обзор имеющихся в литературе результатов исследований в области прямого преобразования ядерной энергии в энергию когерентного светового излучения. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований активных сред лазеров на связанно-связанных атомарных переходах с прямой ядерной накачкой казахстанскими учеными.

Введение

К величайшим достижениям научной мысли последнего столетия в равной степени можно отнести освоение ядерной энергии и изобретение квантовых оптических генераторов. Первое послужило большим толчком для научно-технического прогресса, предоставив человечеству практически неисчерпаемый источник экологически чистой и экономически дешевой энергии, открыв широкий простор для применения новейших передовых технологий и методов, связанных с использованием различных источников ядерной энергии (ядерных реакторов, радиоактивных изотопов, ускорителей заряженных частиц). Второе - дало мощный инструмент для научных исследований и послужило основой для возникновения ряда новых направлений науки и техники, открыв эпоху "лазерных технологий".

Идея использования энергии ядерных реакций для накачки активных сред лазеров возникла сразу же после появления первых квантовых оптических генераторов [1]. Такие исключительные особенности источников ядерной энергии, как высокая удельная мощность, компактность, способность эффективно возбуждать и ионизовать большие объемы активных газовых сред при высоких давлениях, дают определенные потенциальные преимущества перед другими традиционными способами возбуждения и во многом определяют интерес к исследованию преобразования ядерной энергии в энергию когерентного светового излучения. Широкие возможности применения лазеров с ядерной накачкой, особенно в тех случаях, когда требуются мощные лазеры для размещения на автономных удаленных объектах, делают исследования в этой области вдвойне интересными.

Существуют два возможных пути преобразования ядерной энергии в лазерное излучение: прямая и комбинированная ядерные накачки. Прямая ядерная накачка (ПЯН) - это такой способ преобразования ядерной энергии, когда энергия ядерных реакций непосредственно идет на ионизацию и возбуждение атомов и молекул буферного газа, а затем трансформируется в цепочке плазмохимических процессов в инверсию заселенностей и когерентное излучение. При комбинированной ядерной накачке (КЯН) энергия ядерных реакций расходуется на предыонизацию активной лазерной среды, а накачка осуществляется электрическим разрядом. Причем электрическая энергия может вырабатываться на том же ядерном реакторе.

В связи с этим традиционно развивались два возможных варианта ядерно-энергетических установок, генерирующих лазерное излучение.

Первый вариант представляет собой импульсный ядерный реактор, включающий лазеры с прямой ядерной накачкой. Достоинства таких установок очевидны: простота конструкций лазерных систем, возможность создания весьма компактных, с малыми весогабаритными характеристиками установок, что весьма важно для использования на удаленных объектах. Недостаток: способность работы таких установок только в режиме одиночных импульсов; кроме того, в автономных системах, как правило, требуется электрическая энергия, для получения которой необходима самостоятельная ядерно-энергетическая установка.

Второй вариант: использование стационарного электрогенерирующего ядерного реактора и лазеров с комбинированной ядерной накачкой. Достоинство такой системы в следующем: возможность создания лазерных установок с непрерывным или импульснопериодическим (с высокой частотой повторения импульсов) режимами работы, что весьма важно, когда требуется высокий уровень средней мощности лазерного излучения; возможность реализации коротких импульсов разряда позволяет существенно расширить диапазон реализуемых лазеров, в частности, эксимерных лазеров, генерация которых недостижима в импульсных реакторах, имеющих широкие фронта (100 мкс - 10 мс) и недостаточные амплитуды нейтронных импульсов. Благодаря совмещению источников электрической энергии и лазерного излучения в одном реакторе появляется возможность создания ядерно-энергетической установки многоцелевого назначения. Недостаток: низкие потоки тепловых нейтронов и необходимость обеспечения больших скоростей прокачек рабочих сред лазеров и эффективного теплосброса.

Целью настоящей работы явилось обобщение имеющихся в литературе результатов исследований в области прямого преобразования ядерной энергии в энергию когерентного светового излучения и презентация результатов исследований казахстанских ученых в решении этой проблемы.

Объемные и поверхностные источники заряженных частиц

Существуют два возможных способа использования энергии ядерных реакций для ионизации и возбуждения активных сред лазеров - использование поверхностных и объемных источников заряженных частиц (рисунок 1).



Рисунок 1. Объемные (а) и поверхностные (б) источники заряженных частиц

Поверхностные источники представляют собой твердые покрытия внутренних поверхностей лазерных трубок, испускающие для возбуждения или ионизации лазерной среды заряженные продукты реакций под воздействием нейтронного потока, либо вследствие радиоактивного распада (где FF_h и FF_l - тяжелые и легкие осколки деления):

$$_{92}U^{235} + _{0}n^{1} \rightarrow FF_{h}(65 \text{ M} \Rightarrow B) + FF_{l}(97 \text{ M} \Rightarrow B),$$
(1)

$$_{7}B^{10} + _{0}n^{1} \rightarrow _{3}Li(0.855 \text{ M}\Im\text{B}) + _{2}\text{He}^{4}(1.495 \text{ M}\Im\text{B}), (2)$$

$$_{3}\text{Li6} + _{0}n^{1} \rightarrow _{1}\text{H}^{3}(2.73 \text{ M}3B) + _{2}\text{He}^{4}(2.05 \text{ M}3B), (3)$$

$$Po^{210} \rightarrow He^4(5 \text{ M} \Rightarrow B) + Pb^{206}.$$
 (4)

Сечения таких реакций для тепловых нейтронов достаточно велики и составляют 582 барн (U^{235}), 3837 барн (B^{10}) и 945 барн (Li^6) [2].

В настоящее время с использованием поверхностных источников получены генерации на CO, He-Hg, Ar-Xe, He-Cd и других лазерных средах (таблица 1). Однако существенным недостатком такого возбуждения является потеря более 50% энергии, выделяющейся в процессах ядерных реакций, за счет геометрического фактора и прохождения частиц через сам источник, что сказывается на общем КПД системы. Неэффективно использование поверхностных источников при больших давлениях и объемах активных сред лазеров, так как в этом случае глубина проникновения осколков деления в лазерную среду ограничена, вызывая появление неравномерности ионизации активной среды лазера. Неравномерность ионизации активной среды в свою очередь приводит к возникновению градиента температуры по диаметру лазерной трубки и, как следствие, "газовой линзы", что неблагоприятно сказывается на условиях возникновения генерации. Несмотря на это поверхностные источники используются довольно часто для ядерной накачки лазеров, особенно в случаях, когда содержание объемного источника заряженных частиц в активной среде лазера нежелательно из-за отрицательного влияния на кинетику образования инверсии заселенности.

Объемные источники заряженных частиц вводятся гомогенно в состав газовых рабочих сред лазеров. В качестве такого источника может использоваться UF₆, в результате реакции деления которого создаются высокоэнергетичные осколки деления для возбуждения и ионизации лазерной среды. Однако UF₆ обладает рядом отрицательных свойств, как например, сильная дезактивация возбужденных состояний, большая способность к поглощению электронов с образованием отрицательных ионов, химическая активность атомарного фтора и т. д. Наиболее эффективно для этой же цели может быть использован газообразный изотоп He³, который после захвата нейтрона испускает протон и тритий:

$$_{2}\text{He}^{3}+_{0}n^{1} \rightarrow _{1}\text{He}^{3}(0.19 \text{ M} \rightarrow \text{B})+_{1}\text{He}^{1}(0.57 \text{ M} \rightarrow \text{B})$$
 (5)

Сечение этой реакции достаточно велико ~ 5400 барн, и она довольно успешно использована для получения генерации в ряде лазерных сред (³He-Xe, ³He-Cd, ³He-Zn и т. д.), в которых гелий также выполняет роль буферного газа, обеспечивая однородное объемное возбуждение активной среды.

В работе [3] проводились исследования по одновременному использованию как объемного, так и поверхностного источника заряженных частиц. Согласно [3], одновременное использование He^3 и U_2O_3 при оптимальных соотношениях диаметра лазерной трубки и давления активной среды позволит обеспечить более равномерное распределение энерговклада в газе и снимет проблему "газовой линзы". Более того, чередование в шахматном порядке расположения поверхностного источника заряженных частиц по длине лазерной трубки устраняет проблемы с искажением направленности луча вдоль оси лазера.

ОСОБЕННОСТИ АКТИВНЫХ СРЕД ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

Единственный тип лазера, в котором к настоящему времени успешно реализована ядерная накачка, является газовый лазер [2,4,5]. Ограниченность использования ядерной энергии для накачки жидкостных и твердотельных лазеров определяется проблемой радиационных повреждений. В то же время, газовые лазеры имеют характерные особенности. Во-первых, только газовые лазеры могут быть прозрачными в широком спектральном диапазоне (от вакуумной УФ области спектра до далекого ИК-диапазона), и, как следствие, громадный рабочий диапазон длин волн. Вовторых, рабочими уровнями в газе служат уровни почти изолированных частиц (атомов, ионов, молекул), что определяет узость рабочих переходов и позволяет достичь высокой монохромотичности лазерного излучения. Возможность управлять шириной линии, путем варьирования давлением активной среды, существует только в случае газовых лазеров. В-третьих, газовая среда обладает существенно меньшей плотностью и более высокой оптической однородностью, поэтому потери на дифракцию и рассеяние в ней минимальны, что позволяет легче достичь дифракционного предела. Излучение газового лазера обладает наименьшей по сравнению с жидкостными и твердотельными лазерами расходимостью. Однако относительно небольшая плотность газовых сред требует для удовлетворения условий усиления, предусматривать достаточную протяжность лазера, что не всегда выполнимо при возбуждении энергией ядерного реактора. Использование многопроходового резонатора [4] позволяет устранить отмеченный недостаток, но при этом вносит дополнительную отрицательную реактивность и определенные технические трудности.

Существуют работы по исследованию возможности использования ядерной накачки твердотельных лазеров. В частности в работе [6] возможность использования ядерно-возбуждаемой лампы для накачки твердотельного лазера. В качестве активной среды ядерно-возбуждаемой плазмы рассмотрена возможность использования смеси щелочных металлов с He³. В частности коэффициент преобразования ядерной энергии излучение эксимерной молекулы Na2^{*} теоретически может достигать 40%. Для устранения проблемы радиационного повреждения в твердом теле предлагалось использование световодов для вывода излучения ядерно-возбуждаемой лампы из поля излучения ядерного реактора. Исследования с твердотельными конверторами, накачиваемыми излучением ЛЯН проводились специалистами ВНИИТФ [7].

Изучению возможности использования жидкости в качестве активной среды лазера с ядерной накачкой посвящена серия работ, проводимых в Физико-Энергетическом Институте (г. Обнинск, РФ) [8, 9]. Как один из вариантов активной среды предлагалось использовать неорганические жидкости, активированные редкоземельными и актинидными элементами. Однако исследования в этом направление до сих пор не принесли оптимистических результатов, указывающих на возможность достижения ядерновозбуждаемой генерации в жидких средах.

Таким образом, наиболее перспективным представляется исследование газовых сред в качестве активных сред лазеров с ядерной накачкой.

ЛАЗЕРЫ С ПРЯМОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

Впервые идея об использовании энергии ядерных реакций для прямой ядерной накачки активных сред лазеров была высказана в 1964 году [1], однако первое сообщение об экспериментальном подтверждении состоялось лишь в 1975 году, когда Мак Артур и Толефсруд получили генерацию на колебательных переходах молекулы СО с $\lambda = 5,1-5,6$ мкм, используя урановые покрытия и быстрый импульсный реактор бассейнового типа Сандия-II [10,11]. Вскоре после этого появились сообщения о получении генерации с прямой ядерной накачкой в смесях He-Xe [12], Ne-N₂ [13-15].

В настоящее время существуют свыше четырех десятков лазеров, способных работать при возбуждении энергией импульсных ядерных реакторов, излучающих в широком спектральном диапазоне от 391 нм до 5.6 мкм. Основные сведения о лазерах с ПЯН сведены в таблицу 1.

Расширилась и география исследований. Если в 80х годах прошлого столетия исследования лазеров с ПЯН проводились только в бывшем Советском Союзе и Соединенных Штатах Америки, то в настоящее время исследования в этой области интенсивно ведутся учеными Германии [16,17], Китая [18,19], Японии [20-22], Бразилии [23,24] и в других странах.

В Соединенных Штатах Америки на протяжении уже многих лет успешно развивается программа Direct Nuclear Pumped Lasers (лазеры с прямой ядерной накачкой), при участии ученых Сандинийских и Лос Аламоской Национальных лабораторий, университетов штатов Иллинойс, Миссури, Северной Каролины и др. В бывшем Советском Союзе исследования в области лазеров с прямой ядерной накачкой велись силами ученых Арзамаса-16, Челябинска-70, МИФИ, ФЭИ, ИЯФ и ИАЭ НЯЦ РК и др. Причем первая генерация с прямой ядерной накачкой была получена учеными Арзамаса-16 15 мая 1973 года [25], за два года до первого сообщения, сделанного американскими учеными, однако в силу секретности проводимых исследований первая публикация на эту тему появилась лишь в 1979 году [26, 27]. Это был Не-Хе лазер со следующими параметрами: длина волны излучения - 2.6 мкм; КПД ≈ 0.45%, средняя мощность излучения ≈ 25 Вт, энергия в импульсе ≈ 60 мДж.

Как видно из таблицы 1 все существующие в настоящее время лазеры с прямой ядерной накачкой можно распределить на следующие три основные группы: лазеры на колебательных переходах молекул; ионные лазеры на парах металлов и лазеры на переходах нейтральных атомов. Следует отметить, что это соответствует традиционному делению всех газовых лазеров на молекулярные, ионные, атомарные и эксимерные лазеры. Генерация с прямой ядерной накачкой на переходах эксимерных молекул на сегодняшний день не получена.

Лазеры с ПЯН на колебательных переходах молекул

Характерной особенностью лазеров на колебательно-вращательных переходах молекул в силу небольшого различия в энергии между рабочими уровнями является генерация электромагнитного излучения в области среднего и дальнего инфракрасного диапазона. Типичным представителем этого класса лазеров является СО-лазер, работающий на колебательно-вращательных переходах в основном электронном состоянии в интервале длин волн 5 - 6.5 мкм. Высокий КПД, высокая выходная мощность, способность работы в непрерывном и импульсном режимах при различных методах достижения инверсии (накачка электрическим пучком и электрическим разрядом, газодинамическая и химическая накачки) закономерно побудили интерес к созданию СО-лазера с прямой ядерной накачкой.

Как уже отмечалось выше лазер на колебательных переходах молекулы СО был одним из самых первых лазеров с прямой ядерной накачкой [10, 11]. Однако в отличие от других методов возбуждения в случае прямой ядерной накачки достичь высокой эффективности преобразования вложенной энергии в когерентное электромагнитное излучение не удалось. Максимальные экспериментальные значения выходной энергия 0.1-0.3 мДж и эффективности 0.1-0.3% от вложенной в газ энергии были получены при небольшой длительности генерации 50 мкс. Более того, высокий порог генерации ($\Phi_{\text{пор}} =$ 5×10¹⁶ н/(см²с)), ограничения по давлению и жесткие требования к охлаждению активной среды (лазер работал при температуре 77 К и давлении активной среды 100 мТор) сделали СО-лазер с прямой ядерной накачкой не интересным с точки зрения практических приложений. Детальный анализ процессов возбуждения молекул СО с учетом функции распределения электронов в условиях ядерной накачки был дан в работе [28]. Согласно расчетам, проведенным авторами этой работы, предельный КПД СО-лазера с прямой ядерной накачкой не превышает 0.5% от вложенной в газ энергии, что согласуется с результатами экспериментов.

Активная	Источник	Длина волны Порог генерации		КПД (%)	Организация	Литература
среда лазера	заряженных частиц	(мкм)	н/(см ² с)		-	
CO	U ²³⁵ (n,f)F	5.1-5.6	5×10 ¹⁶	0.1-0.3	SNL	[10,11]
He-Xe	U ²³⁵ (n,f)F	3.5080	3×10 ¹⁵	0.01	LANL/UF	[12]
Ne-N ₂	B ¹⁰ (n,α)Li ⁷	0.8629,	1×10 ¹⁵	3×10⁻⁵	UI	[13-15]
		0.9393				
Ne-CO, Ne-CO ₂	B ¹⁰ (n,α)Li ⁷	1.4550	1×10 ¹⁵	10-4	UI	[31,32]
He-CO, He-CO ₂ ,	B ¹⁰ (n,α)Li ⁷	1.4550	1×10 ¹⁵	10-4	UI	[33,34]
Ar-CO ₂						
³ He-Ar	³ He(n,p)T	1.27, 1.79	1.4×10 ¹⁶	0.1	NASA	[35,36,40]
³ He -Xe	³ He(n,p)T	2.026, 3.508	4×10 ¹⁵	<0.1	NASA	[37-41]
		3.652				
He-Hg	B ¹⁰ (n,α)Li ⁷	0.615	1×10 ¹⁶	10 ⁻⁶	UI/SNL	[41,42]
³ He -Kr	³ He(n,p)T	2.19, 2.52	5×10 ¹⁶	0.1	NASA	[39,40]
³ He -Cl	³ He(n,p)T	1.587	7×10 ¹⁵	<0.1	UI / SNL	[40]
He-Xe	U ²³⁵ (n,f)F	2.627	6×10 ¹³	1.2	ВНИИЭФ	[26,27]
Ar-Xe	U ²³⁵ (n,f)F	1.732, 2.026	2×10 ¹²	1	ВНИИЭФ	[26,27]
		2.482, 2.627				
He-Kr	U ²³⁵ (n,f)F	1.78, 2.52,	78, 2.52, 6.2×10 ¹³		ВНИИЭФ	[27,43]
		3.07				
He-Ar	U ²³⁵ (n,f)F	1.149, 1.190	10 ¹⁶	0.1	ВНИИЭФ	[27]
		2.397				
³ He -Cd	³ He(n,p)T	0.4416, 0.5337	2×10 ¹⁴	0.3	МИФИ	[44,45]
		0.5378				
He-Ar-Xe	U ²³⁵ (n,f)F	1.732, 2.03	5×10 ¹³	2.2	ВНИИТФ	[46,47]
	805	2.60				
He-Cd	U ²³⁵ (n,f)F	0.4416, 0.5337	7×10 ¹⁴	0.52	ВНИИТФ	[46]
		0.5378, 0.8066	6×10 ¹⁴	0.36		
		0.8531, 1.4300	3.2×10	0.02		
	225	1.6500	10×10 ¹⁰			
He-Zn	U ²³⁰ (n,f)F	0.7479	1×10 ¹⁰	0.06	ВНИИТФ	[46]
He ³ -Zn	³ He(n,p)T	0.7479	2×10 ¹⁵	-	МИФИ	[45]
He-Ne-Ar	U ²³⁵ (n,f)F	0.5852	1×10™	<10 ⁻²	SNL	[48]

Таблица 1. Лазеры с прямой ядерной накачкой

Активная среда пазера	Источник заряженных частиц	Длина волны (мкм)	Порог генерации н/(см²с)	КПД (%)	Организация	Литература
He-Ne-Ar	U ²³⁵ (n,f)F	0.5852	4×10 ¹⁷	0.10	внииэф	[49]
He-Ne-Ar	U ²³⁵ (n,f)F	0.5852	4×10 ¹⁵	0.16	ВНИИТФ	[46]
He-Ne-Ar	³ He(n,p)T	0.5852	1.4×10 ¹⁵	0.1	МИФИ	[50]
Ne-Kr(Ar)	U ²³⁵ (n,f)F	0.7032, 0.7245	3×10 ¹⁴	0.02	ВНИИЭФ / МИФИ	[49,50]
(He)-Ne-Kr	U ²³⁵ (n,f)F	0.7245	1.2×10 ¹⁶	0.02	ВНИИТФ	[46]
Ar-Xe, He-Ar-Xe	U ²³⁵ (n,f)F	1.73, 2.03		2.4, 3.0	SNL	[51]
He-Ne-H ₂	B ¹⁰ (n,α)Li ⁷	0.5852	1.5×10 ¹³	0.01	ΦRN / ΙU	[52]
He-Xe-Hg-H ₂	U ²³⁵ (n,f)F	0.5461	10 ¹⁵	0.4	ВНИИТФ / ИЯФ	[53]
Ar-Xe	B ¹⁰ (n,α)Li ⁷	1.73	1×10 ¹⁴	0.5-1	U / ΝΕΦ / ΦRN	[54-56]
He-Ne-O ₂	U ²³⁵ (n,f)F	2.653, 2.76	3×10 ¹⁴	0.1	внииэф	[57]
He,Ne-Ar-CCl ₄	U ²³⁵ (n,f)F	1.586, 2.447	2×10 ¹³	0.2	внииэф	[58]
He-N ₂ -H ₂	U ²³⁵ (n,f)F	0,391	~5×10 ¹⁶	0,01	внииэф	[59]

***Организации:** SNL - Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM, USA; LANL - Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA; UF - University of Florida, Tallahassee, FL, USA; UI - University of Illinois, Urbana, IL, USA; NASA - National Aeronautics and Space Administration Research Center, Langley, VA; ВНИИЭФ – Всесоюзный НИИ Экспериментальной Физики, Арзамас-16, Россия; МИФИ - Московский Инженерно-Физический Институт, Москва, Россия; ВНИИТФ - Всесоюзный НИИ Технической Физики, Челябинск-70, Россия; ИЯФ – Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан; ФЭИ - Физико-Энергетический Институт, Обнинск, Россия; PRNFDC - Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, Ibaraki, Japan

Попытки получить генерацию на колебательновращательных переходах молекулы СО2 с прямой ядерной накачкой по аналогии с СО-лазером не увенчалась успехом [2]. Детальное объяснение этого факта на основе расчета функции распределения электронов в ядерно-возбуждаемой плазме молекулярного лазера дано в работе [29]. Исследование кинетики СО2-лазера с прямой ядерной накачкой показали, что при тех составах смеси, которые традиционно используются в электроразрядных CO₂лазерах, коэффициенты усиления на колебательновращательных системах молекулы СО2 слишком малы, чтобы достичь лазерной генерации, что определяется в первую очередь существенным различием механизмов возбуждения в двух данных системах. Согласно [30] СО₂-лазер с ядерной накачкой может работать при малом давлении и низких концентрациях CO₂ и N₂. При этих условиях CO₂-лазер с прямой ядерной накачкой не эффективен, а его перерасчет на другие масштабы не возможен. Согласно оценкам [2] предельный КПД СО2-лазера значительно ниже предельного КПД СО-лазера.

Несмотря на то, что плотная смесь He-N2 предлагалась в качестве активной среды для лазеров с прямой ядерной накачкой, еще 1980 году, благодаря в первую очередь эффективному заселению В состояний N2⁺ в процессах перезарядки молекулярных ионов гелия на молекулах азота, получить генерацию удалось лишь в 1996 году. В работе [51] Э.П. Магда с сотрудниками доложили о получении генерации на В-Х переходе (0-0) иона молекулы азота с λ = 391 нм. Это самый коротковолновый на сегодняшний день лазер с прямой ядерной накачкой. Эксперименты проводились на импульсном ядерном реакторе ЭБР-Л [52] с потоком тепловых нейтронов порядка 10¹⁷ н/см²с при полуширине импульса около 250 мкс. В качестве активной среды лазера использовалась смесь He-N2-H2. Получить генерацию удалось благодаря селективному расселению нижнего лазерного уровня $N_2^+(X)$.

Ионные лазеры с ПЯН на парах металлов

Существующие на сегодняшний день ионные лазеры с ПЯН – лазеры, в которых в качестве рабочих переходов используются переходы между энергетическими уровнями ионов металла. К этой группе относятся лазеры на атомарных переходах ионов Hg^+ , Cd⁺ и Zn⁺. Характерной особенностью лазеров данной группы является то, что благодаря тому, что потенциалы ионизации атомов металлов находятся значительно ниже потенциала ионизации атома Не, имеются многочисленные резонансы между уровнями возбужденных атомов буферного газа и уровнями ионов металлов. Поэтому заселение верхнего рабочего уровня происходит в столкновительных процессах с передачей энергии возбуждения от метастабильных атомов гелия атомам металла, с последующей ионизацией этого атома и возбуждением иона. Этот процесс называется пеннинговской ионизацией и происходит по следующей схеме:

$$\text{He}^* + \text{M} \rightarrow \text{He} + (\text{M}^+)^* + \text{e} + \text{E}_{\text{кин}}$$
 (6)

Для группы рассматриваемых лазеров не требуется точный резонанс возбужденных атомов Не и возбужденных ионов металла $(M^+)^*$, как например, в случае Не-Ne лазера, так как избыток энергии уносится электроном. Для заселения верхнего рабочего уровня возможен так же процесс ионизации с перезарядкой:

$$\mathrm{He}^{+} + \mathrm{M} \rightarrow \mathrm{He} + (\mathrm{M}^{+})^{*}$$
(7)

Преимуществом ионных лазеров на парах металлов, обеспечивающим им широкое исследование, является широкий диапазон длин волн и относительно низкий порог генерации. Не-Нg лазер с длиной волны λ =615 нм [41,42] был первым лазером с прямой ядерной накачкой видимого диапазона. Длина волны генерации (λ =441.6 нм), достигнутая в He³-Cd лазере [44,45], долгое время оставалась самой короткой в лазерах с прямой ядерной накачкой. Однако при работе с лазерами на парах металлов

возникают немалые технологические трудности, определяемые высокими температурами для испарения металлов, вопросами коррозии и повышенными требованиями к чистоте используемых газов. Максимальные достигнутые КПД для ионных лазеров на парах металлов с прямой ядерной накачкой следующие: He-Hg - 10⁻⁶ % [41,42]; He-Cd - 0.5 % [45]; He-Zn - 0.06% от вложенной в газ энергии [45].

Лазеры с ПЯН на переходах нейтральных атомов

Типичным представителем этого класса лазеров является He-Ne лазер на атомарных переходах неона с $\lambda = 632.8$ нм. Однако низкие выходные характеристики He-Ne лазера ограничили возможности его использования. He-Ne лазер в основном используется в лабораторных условиях и, как правило, для юстировочных целей.

Существует сообщение о создании Не-Ne лазера с прямой ядерной накачкой [61]. В этой работе сообщалось о создании непрерывного лазера на переходе атома неона 3p'[3/2]₂ – 5s'[1/2]₁⁰ с длиной волны 632,8 нм. Измеренное значение коэффициента усиления слабого сигнала в смеси He³: Ne = 5 : 1 при давлении 300 тор и $\Phi \approx 6 \times 10^{11}$ н/(см²с) составляло 9,81 дБ/м. Порог генерации при использовании резонатора с низкой добротностью (50% потерь за проход) достигался при $\Phi \approx 2 \times 10^{11}$ н/(см²с). Попытки других авто-

ров подтвердить данное сообщение не увенчались успехом [17,62]. В частности, в экспериментах, проводимых в активной зоне стационарного ядерного реактора ВВР-К при потоках, более чем на два порядка превышающих потоки нейтронов, используемые в работе [61], генерация не была получена даже при высокой добротности резонатора.

В 1990 году одновременно несколько исследовательских научных групп доложили о получении генерации с прямой ядерной накачкой на атомарных переходах неона [46,48-50]. Генерация была получена на переходах 3p'[1/2]₀ – 3s'[1/2]₁ NeI с длиной волны $\lambda = 585,2$ нм («желтый» неоновый лазер) и 3p[1/2]₁ -3s[3/2]₁ и 3s[3/2]₂ NeI с длинами волн соответственно $\lambda = 724,5$ и 703,2 нм («красные» неоновые лазеры).

Максимальные выходные характеристики 40 и 9 мДж, 140 и 30 Вт при эффективности 0,16 и 0,02% были получены соответственно для «желтого» и «красного» лазеров. Низкие пороговые характеристики $(1,5\times10^{13} \text{ н/(см}^2\text{c}))$ были доложены в работе [52], что соответствует возможностям существующих стационарных ядерных реакторов. Однако экспериментальное подтверждение получения непрерывной генерации с прямой ядерной накачкой в условиях стационарного ядерного реактора до сих пор нет.



Рисунок 2. Схема основных плазмо-химических процессов, протекающих в He-Ne-Ar (Kr) ядерно-возбуждаемой плазме

Подробные исследования кинетики активных сред лазеров на 3р-3s переходах атома NeI с накачкой слабым источником внешней ионизации впервые были проведены сотрудниками Лаборатории физики ядерно-энергетических установок алматинского отделения ИАЭ НЯЦ РК [63-67]. Были проведены спектральные исследования неононовой плазмы в центральном канале стационарного ядерного реактора и в лабораторных условиях с использованием потока α-частиц. Результаты спектральных исследований позволили изучить эффективности заселения верхних лазерных 3р уровней атома неона и процессы внутри и межмультиплетной релаксации рабочих лазерных уровней при ионизации смеси продуктами ядерных реакций. Исследовано влияние Не и Ne на эффективности заселения 3р уровней неона. Сделан вывод о зависимости эффективностей заселения 3р уровней неона в процессе диссоцативной рекомбинации от степени колебательного возбуждения молекулярных ионов Ne_2^+ .

Подпороговая спектральная диагностика ядерновозбуждаемой плазмы позволила провести измерения констант скоростей ключевых процессов и разобраться с механизмами образования инверсной заселенности. Схема основных плазмо-химических процессов, протекающих в He-Ne-Ar (Kr) ядерновозбуждаемой плазме, показана на рисунок 2.

Как видно из рисунка 3, пороговые значения потоков тепловых нейтронов, т.е. потоков, при которых выполняется условие $\alpha_0 = \alpha_{yc}$ -P- $\alpha_{nor} = 0$ ($\alpha_{yc} -$ коэффициент усиления слабого сигнала, Р – коэффициент полезных потерь, α_{nor} – нерезонансное поглощение лазерного излучения), составляют: $\Phi_{nop} \approx 4 \cdot 10^{14}$, $7 \cdot 10^{14}$ и $8 \cdot 10^{14}$ н/(см²с) соответственно для переходов с $\lambda = 585,2$, 703,2 и 724,5 нм. Полученные значения подтвердили ранее сделанные выводы, что получить генерацию при потоках характерных для существующих в настоящее время стационарных ядерных реакторов не представляется возможным.

Расчетные значения лазерного излучения и КПД лазеров на переходах NeI, как функции величины потока тепловых нейтронов, показаны на рисунке 4. Результаты расчетов при потоках, характерных для импульсных ядерных реакторов, хорошо согласуются с результатами экспериментов.

Генерация с прямой ядерной накачкой так же была получена на атомарных переходах других инертных газов: Аг, Кг и Хе (таблица 1). С точки зрения практического применения интерес представляют активные лазерные среды, имеющие значительные КПД при низких мощностях накачки. К таким средам относятся смеси газов (He, Ne)-Ar-Xe с длинами волн $\lambda = 1,73, 2,026$ и 2,65 мкм 5d-6p переходах атома ксенона.

Впервые генерация на ИК переходах атома ксенона с прямой ядерной накачкой была достигнута в 1975 году учеными университета Флориды в коллаборации с Лос Аламоской Национальной лабораторией [12]. Генерация была получена на переходе 5d [7/2]₃ – 6p[5/2]₂ ХеІ с длиной волны $\lambda = 3,508$ мкм в смеси Не-Хе. В качестве источника накачки использовались продукты ядерной реакции U²³⁸(n,f)F.



Рисунок 3. Зависимость величины $a_0 = a_{yc}$ -p- a_{no2} для переходов с λ =585,2 нм (He^3 (3Amm)+Ne(30Top)+Ar (8Top)) (1), 703,2 нм (Ne(1Amm)+Kr(15Top)) (2), 724,5 нм (Ne(1Amm)+Kr(35Top) (3) от потока тепловых нейтронов



Рисунок 4. Зависимость плотности лазерного излучения (4,5,6) и КПД (1,2,3) для $\lambda = 585.2$ (1,4), 703.2 (3,6), и 724.5 (2,5) для смесей: He(3Amm)+Ne(30Top)+Ar(9Top) (1,5), Ne(1Amm) + Kr(20Top) (2,4), Ne(1Amm)+Kr(40Top) (3,6)

Поскольку это была одна из первых демонстраций генераций с прямой ядерной накачкой, были достигнуты достаточно низкие выходные характеристики (КПД ~ 0,01%) и высокий порог (~ $3 \cdot 10^{15}$ н/(см²с)). На сегодняшний день максимальная выходная мощность W ≈ 2600 Вт [47] и эффективность ŋ ≈ 2,2 – 3% [46, 51] были получены на переходе 5d [3/2]₁ – 6p[3/2]₁ ХеІ с длиной волны $\lambda = 732$ мкм. Низкий пороговый поток тепловых нейтронов (3,7×10¹³ н/(см²с) был об-

наружен Войновым А.М. с сотрудниками [47] для перехода $5d[3/2]_1^0 - 6p[3/2]_1$ ХеІ с длиной волны $\lambda = 2,026$ мкм, который указывает на возможность достижения непрерывной генерации в условиях стационарного ядерного реактора. Всего генерация получена на шести атомарных 5d-6p переходах ксенона (рисунок 5).



Рисунок 5. Диаграмма переходов атома Хе

Значительный вклад в понимание кинетики физико-химических процессов протекающих в ксеноновой плазме был сделан казахстанскими учеными. Сотрудниками Лаборатории физики ядерноэнергетических установок были проведены комплексные исследования ядерно-возбуждаемой плазмы смесей ксенона с инертными газами [5,68]. Используя результаты спектральных исследований проведено математическое моделирование основных плазмохимических процессов в ядерно-возбуждаемой плазме лазерных смесей He-Ar-Xe и Ar-Xe.

Совместно с сотрудниками Иллинойского Университета (США) нами впервые была получена генерация на переходе 5d [3/2]₁ – 6р[3/2]₁ XeI с длиной волны $\lambda = 1,732$ мкм с накачкой продуктами ядерной реакции В¹⁰(n, α)Li⁷ [54-56]. Эксперименты проводились на peaktope TRIGA Иллинойского университета (США). TRIGA - реактор водо-водяной типа, способный работать как в стационарном, так и в импульсном (с высокой частотой повторения импульсов) режимах. Эксперименты проводились при работе реактора в импульсном режиме со следующими параметрами: пиковая мощность - 1600 МВт, пиковое значение потока тепловых нейтронов -2.5·10¹⁵ н/(см²сек), длительность нейтронного импульса на полувысоте - 12.1 мс. Схема эксперимента показана на рисунке 6.

Осциллограмма сигнала генерации и импульса нейтронов показаны на рисунке 7. В экспериментах использовался резонатор с диэлектрическими зеркалами с коэффициентами отражения 99.9 и 90.0% на длине волны 1.73 мкм.



Рисунок 6. Схема эксперимента на реакторе TRIGA (США)





Генерация возникала при потоке тепловых нейтронов 7·10¹⁴ н/(см²с), что соответствует значению удельной мощности накачки 2.6 Вт/см³. При использовании резонатора с "нулевыми" потерями значение порогового потока тепловых нейтронов составляет 1·10¹⁴ н/(см²с) или 0.44 Вт/см³, что хорошо согласуется с результатами экспериментов других исследователей, использовавших в качестве источника накачки осколки деления U²³⁵ [46], и указывает на слабую зависимость механизма образования инверсной заселенности от источника первичной ионизации. Относительно высокая эффективность лазеров на атомарных переходах неона и ксенона с прямой ядерной накачкой определила интерес к поиску новых столкновительных лазеров на разрешенных связанно-связанных (сечение стимулированного перехода $\sigma \approx 10^{-13} \div 10^{-14}$ см²) электронных переходах.

Значимых успехов в этом направлении достигли казахстанские ученые [68-73]. Нами была показана перспективность триплетные переходы атома ртути для получения генерации видимого диапазона. В частности, была обнаружена высокая эффективность заселения верхнего рабочего уровня 7^3S_1 атома ртути в процессах диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов, которые образуются в цепочке следующих реакций:

$$Xe + ff \rightarrow Xe^+ + ff + e$$
 (8)

$$Xe^{+} + 2Xe \rightarrow Xe_{2}^{+} + Xe$$
 (9)

$$Xe_2^+ + Hg \rightarrow Hg^+ + 2Xe$$
 (10)

$$\mathrm{Hg}^{+} + 2\mathrm{Xe} \rightarrow \mathrm{XeHg}^{+} + \mathrm{Xe}$$
 (11)

$$XeHg^{+} + Hg \rightarrow Hg_{2}^{+} + Xe$$
 (12)

$$Hg_2^+ + e \to Hg(7^3S_1;7^3P) + Hg$$
 (13)

Измеренный коэффициент преобразования ядерной энергии в излучение на линиях триплета ртути близок к квантовому, что свидетельствует о высокой селективности (δ =0.8±0.2) этого процесса (возможно, каскадными переходами с уровня 7³P). Для получения инверсной заселенности было предложено использовать H₂ или D₂ селективно разрушающих нижние рабочие 6P-состояний. Были измерены константы скоростей ключевых процессов, участвующих в образовании инверсной заселенности. Расчеты основных компонент плазмы (рисунок 8), пороговых и выходных характеристик лазерного излучения указали на возможность получения генерации с прямой ядерной накачкой на триплетных переходах атома ртути.



Рисунок 8. Схема основных кинетических процессов, протекающих в ядерно-возбуждаемой плазме He-Xe-Hg-H2

На рисунке 9 показаны расчетные значения коэффициента усиления за минусом коэффициента полезных потерь на резонаторе и нерезонансного поглощения лазерного излучения. Как видно, для оптимальной с точки зрения максимального коэффициента усиления смеси $\text{He}^3(2\text{ATm})$ -Xe(1ATm)– Hg(7Top)-H2(40Top) для λ =546,1 нм. расчетное значение порогового потока тепловых нейтронов составляет $\Phi_{\text{пор}} = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ н/(см}^2 \text{c}).$

Эти выводы были блестяще экспериментально подтверждены учеными из ВНИИТФ Челябинск-70 [53]. Ими была получена генерация в смеси Не-Хе-Hg-H₂ при возбуждении продуктами ядерной реакции $U^{235}(n,f)F$ на переходе $7^{3}S_{1} - 6^{3}P_{2}$ с $\lambda = 546,1$ нм. В частности, для оптимальной смеси Не(119Тор)-Хе(119Тор)-Нg(6,8Тор)-H₂(58,9Тор) при возбуждении продуктами ядерной реакции $U^{235}(n,f)F$ пороговое значение составляло $\Phi_{nop}=5\cdot10^{14}$ н/(см²с). Неразличие между теоретическом большое И экспериментальном значениях оптимального содержания Н2 вполне можно объяснить необходимостью дополнительного охлаждения вторичных электронов в условиях эксперимента [53]. Существенное влияние на энергетические параметры лазера влияет так же чистота используемых в экспериментах газов [74]. В описанной выше кинетической модели лазера наличие примесей в активной газовой смеси не учитывалось.



Рисунок 9. Зависимость величине $\alpha_0 = \alpha - P - \alpha_{noc}$ от потока тепловых нейтронов Φ_m для переходов с $\lambda = 546.1$ нм (1), 435.8 нм (2) для смеси: He³(2 Amm)+Xe(1 Amm)+Hg(7 Top)+H₂(40 Top) He³(2 Amm)+Xe(1 Amm)+Hg(7 Top)+H₂(33 Top)

Кстати, это первый и единственный на сегодня лазер с прямой ядерной накачкой, когда последовательность событий развивалась по классическому сценарию. Т.е. предварительные экспериментальные исследования, изучение механизма образования инверсной заселенности, создание кинетической модели, расчеты параметров плазмы, вывод о возможности получения генерации, и только потом экспериментальное подтверждение - генерация. В случае других лазеров с прямой ядерной накачкой в качестве лазерных переходов использовались уже апробированные переходы другими источниками жесткой ионизации, например электронным пучком.

Заключение

Существующие на сегодняшний день успехи в области прямого преобразования энергии ядерных реакций в энергию лазерного излучения указывают возможность создания мощных на ядерновозбуждаемых лазерных систем энергией с 0,3-1 МДж в импульсе и частотой повторения импульсов 0,25-0,3 Гц [7]. Дальнейшее улучшение характеристик ядерно-оптического преобразователя в первую очередь зависит от достижения соответствующей эффективности преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения, т.е. подразумевает дальнейший поиск и исследование высокоэффективных активных сред для ядерновозбуждаемых источников неравновесного оптического излучения - лазеров с прямой ядерной накачкой. Причем очевидный путь увеличения эффективности такого преобразования - уменьшение длины волны и потенциала ионизации буферного газа.

Немаловажное значение при этом имеют исследования кинетики основных плазмо-химических процессов, протекающих в ядерно-возбуждаемой лазерной плазме. И наиболее перспективными с точки зрения эффективности преобразования ядерной энергии являются рекомбинационные атомарные лазеры на разрешенных связанно-связанных электронных переходах, что определяется в первую очередь низкой температурой, участвующих в рекомбинации молекулярных ионов, вторичных электронов в ядерно-возбуждаемой плазме и большими сечениями стимулированных переходов.

Тем не менее, уже отмеченные выше недостатки систем с прямым преобразованием ядерной энергии в энергию лазерного излучения указывают на необходимость проведения параллельного исследования и лазеров с комбинированной ядерной накачкой, и весьма важным является наличие активных сред, способных работать в условиях как прямой, так и комбинированной ядерных накачек.

Литература

- Herwig, L.O. Concepts for Direct Conversion of Stored Nuclear Energy to Laser Beam Power / L.O. Herwig //Trans. Am. Nucl. Soc. -1964. -V. 7, -N 4. - P. 131-132.
- Пупко, В.Я. Некоторые вопросы теории газовых лазеров с непосредственной ядерной накачкой/ В.Я. Пупко // Препринт ФЭИ – N1211 – Обнинск – 1981 – ч.1 – 100с.
- 3. Petra, M. Study of Thermal Blooming in NPLs for Combined Wall and Volume Pumping / M. Petra // AIP Laser Interaction and Related Plasma Phenomena Conference Proceedings. –1993. –V. 318. –P.512–513.
- Mis'kevich, A.I. Visible and Near –Infrared Direct Nuclear –Pumped Lasers: Laser Physics/ A.I. Mis'kevich // –1991. –V.5. N 1. –P. 445.
- 5. Batyrbekov, E.G. Direct and Combined Nuclear Pumped Lasers: Preprint IAE NNC RK/ E.G. Batyrbekov // Almaty, 1994, 69c.
- Lin, L. Design of an ICF plant using a nuclear –driven solid state laser / L. Lin, M. Prelas, E.G. Batyrbekov, et.al.// AIP Laser Interaction and Related Plasma Phenomena Conference Proceedings. –1993. –V. 318. –P.446.
- Магда, Э.П. Итоги работ в РФЯЦ –ВНИИТФ по исследованиям лазеров с накачкой от импульсных реакторов / Э.П. Магда // IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» – Обнинск – 2007 – С.14–16.
- Серегина, Е.А. Исследование лазером временнозависимости наведенного поглощения в жидкости, возбужденной осколками деления / Е.А. Серегина, А.Ф. Добровольский, П.П. Дьяченко // Квантовая электроника – 2003 – Т. 33 – С. 926–930.
- 9. Радиационно химический выход возбужденного неодима (III) в лазерных жидкостях POCl₃ MeCl_n ²³⁵UO₂²⁺ –
- Nd³⁺(Me: Ti, Zr, Sn, Sb) / Д.В. Кабаков [и др.] Химия высоких энергий 2007 Т. 41 №2 С. 102. 10. McArthyr, D.A. Observation of Laser Action in CO Gas Excited Only By Fission Fragments / D.A. McArthyr, P.B. Tollefsrud // Appl. Phys. Lett. –1975. –V. 26. – 15 February. –N 4. –P. 187–190.
- McArthyr, D.A. Preliminary Designs for Large (1 MJ) Reactor –Driven Laser Systems: / T.R. Schmidt, P.B. Tollefsrud, J.V. Walker // IEEE Int. Conference on Plasma Science. –May 1975. –Univ. of MI Ann Arbor NYC, NY.
- 12. Helmick, H.H. Direct Nuclear Pumping of Helium Xenon Laser / J.I. Fuller, R.T. Schneider // Appl. Phys. Lett. –1975. –V. 26. –15 March. –N 6. P. 327 –329.
- 13. De Young, R.A., Direct Nuclear Pumped Neon –Nitrogen Laser / R.A. De Young // Ph.D. Thesis, Nucl. Eng. Program. –May 1976. University of Illinois, Urbana, IL.
- De Young, R.A. Direct Nuclear Pumping Ne –N₂ Laser / W.E. Wells, G.H. Miley, J.T. Verdeyn // Appl. Phys. Lett. –1976. –V. 28. –1 May. –N 9. –P. 519 –526.
- 15. Cooper, G. Mechanism for the Neon –Nitrogen Nuclear –Excited Laser: Proceedings / G. Cooper, J.T. Verdeyen, W. Wells, G.H. Miley // 3rd Conf. Uranium Plasmas and Application June –1976. Princeton University, Princeton, N.J.
- 16. Ulrich, A. Excimer Laser Pumped by an Intense, High –Energy Heavy –Ion Beam / A. Ulrich, A. Adonin, J. Jacoby, et al.// Phys. Rev. – Lett. – 2006 – V. 97 – # 153901.
- Weiser, J. Low Energy Beam Pumped Lasers as a Model System for Nuclear Pumped Lasers / J. Weiser, R. Krucken, A. Ulrich // IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» – Обнинск – 2007 – С.55 – 56.
- 18. Нап De, C. Investigations of Nuclear Reactor Pumped He³ Ne Laser System / C. Нап De, W. Kai shu, H. Hua Ming [et al.] // Труды конференции "Физика ядерно возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой" 1993 Т. 2 С. 219.
- Xiaobo, Lu. Prompt Neutron Decay Constant Critical Measurements on CFBR / Lu. Xiaobo, F. Xiaoqiang, Y. Chengde // IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» – Обнинск – 2007 – C.120 – 121.
- 20. Okumura, A. A Proposal of a new in -core neutron monitor using nuclear -pumped laser / A.A. Okumura, S. Soramoto, H. Hayashida, [et al.] // Nuclear Inst. and Methods in Phys. Research, 1991. V. A306. P. 530.
- Sakasai, K. Numerical Simulation of a Nuclear Pumped ³He –Ne –Ar Gas Laser for its Optimization / K. Sakasai, T. Kakuta, M. Nakazawa // Japan. J. Appl. Phys. 1998 V. 37 P. 4806 –4811.
- 22. Obara, T. Concept of Low Enrich Uranium Coupled Reactor for Nuclear –Pumped Laser / T. Obara, H. Takezawa // IV
- Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» Обнинск 2007 С. 117–118. 23. Shaban, Y.R. A proposed Continuous Wave 585.4 nm ⁴He/Ne/H₂ Gas Laser Mixture Pumped by α –emitter Radioisotope / Y.R.
- Shaban, T.P.R. Campus //: Brazilian Journal of Physics 1997 V.27 №2 P. 129 –134. 24. Shaban, Y.R. Ideal Kinetics Study of the 585.4 nm He/Ne/H₂ Nuclear Pumped Laser / Y.R. Shaban, T.P.R. Campus // Brazilian
- Journal of Physics 1997 V.27 №2 Р. 96 –103. 25. Войнов, А.М. Работы, выполненные во ВНИИЭФ по исследованию возможности создания реактора –лазера / А.М. Войнов [и др.] // IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» – Обнинск – 2007 – С.11 –12.
- 26. Воинов, А.М. Низкопороговые лазеры с ядерной накачкой на переходах атомарного ксенона / А.М. Войнов, Л.Е. Довбыш, В.Н. Кривоносов [и др.] // ДАН СССР. –1979. –Т. 245. –N 1. –С. 80 –83.
- 27. Воинов, А.М. Инфракрасные лазеры с ядерной накачкой на переходах ArI, KrI, XeI / А.М. Войнов, Л.Е. Довбыш, В.Н. Кривоносов [и др.] // Письма в ЖТФ. –1979. –Т. 7. –В. 7. –С. 422 –424.
- 28. Гудзенко, Л.И. О накачиваемом жестким источником СО лазере / Л.И. Гудзенко, В.С. Малишевский, С.И. Яковленко // ЖТФ. –1978. –т. 48. в. 10. –С.2150.
- 29. Андрияхин В.М. К вопросу о ядерной накачке лазеров на основе молекулярных газов / В.М. Андрияхин // ЖЭТФ. –1972. –т.63. –в.5. –с. 1635.
- 30. Хасан Х.А. Кинетика CO₂ –лазера с ядерной накачкой / Х.А. Хасан // Ракетная техника и космонавтика –1980. –Т. 8. –В. 10. –С. 90

- Prelas, M.A. A Nuclear Pumped Laser Using Ne –CO and Ne –CO₂ Mixtures / M.A. Prelas, J.H. Anderson, F.P. Boody [et al.]//: 30th Annual Gaseous Electronics Conference. –Oct. – 1977.
- 32. Prelas, M.A. Nuclear Pumping of a Neutral Carbon laser: Radiation Energy Conversion in Space / M.A. Prelas, J.H. Anderson, F.P. Boody [et al.] // –1978. –V. 61. –P. 411 –417.
- 33. Prelas, M.A. Direct Nuclear Pumped 1.45 μ Atomic Carbon Laser in Mixtures of He –CO₂ / M.A. Prelas, M.A. Akerman, F.P. Boody, G.H. Miley // Appl. Phys. Lett. –1977. –V.31. –N 7. –1 October. P. 428 –430.
- 34. Prelas, M.A. Direct Nuclear Pumped 1.45 Atomic Carbon Laser in Mixtures of He –CO and He –CO₂ / M.A. Prelas, M.A. Akerman, F.P. Boody, G.H. Miley // 4th Workshop on "Laser Interaction and Related Plasma Phenomena". –November 1976. –Troy, –New York. –V. 4D. –P. 249 –261.
- Jalufka, N.W. Nuclear –Pumped He³ –Ar Laser Excited by He³(n,p)T Reaction / N.W. Jalufka, R.F. De Young, F. Hohl, M.D. Williams// Appl. Phys. Lett. –1976. –V. 29. –1 August. –N 3. –P. 188 –190.
- 36. De Young, R.F. Direct Nuclear Pumped Laser Using the Volumetric ³He Reaction / R.F. De Young, N.W. Jalufka, F. Hohl, M.D.
- Williams // Conference on Partially Ionized and Uranium Plasmas. –September 1976. –Princeton University, Princeton. –P. 96 –101.
 37. Mansfield, C.R. Direct Nuclear Pumping of a He³ Xe Laser / C.R. Mansfield, P.F. Bird, J.F. Davis [et al.].//: Appl. Phys. Letts. 1977. –V. 30. –15 June. –P.640 –641.
- Jalufka, N.W. Nuclear Pumped Lasing of He³ –Xe at 2.63 μ / N.W. Jalufka // Appl. Phys. Letts. –1981. –V. 39. –N 7. –1 October. –P.535 –536.
- 39. De Young, R.F. Nuclear Pumped Lasing of He³ –Xe and He³ –Kr / R.F. De Young, N.W. Jalufka, F. Hohl, M.D. Williams // Appl. Phys. Letts. –1977, V. 30, N 1, 1 January, P. 19 –21.
- 40. De Young, R.F. Direct Nuclear Pumped Lasers Using He³(n,p) T Reaction / R.F. De Young, N.W. Jalufka, F. Hohl, M.D. Williams // AIAA Journ. -1978. -V. 16. -N 9. -P. 991 -998.
- Akerman, M.A. A Helium Mercury Direct Nucltar Pumped Laser / M.A. Akerman, G.H. Miley //Appl. Phys. Letts. –1977. –V. 30. –N 80. –P. 409 –412.
- 42. Akerman, M.A. Demonstration of the First Visible Wavelength DNPL. / M.A. Akerman // Ph.D. Thesis, Nucl. Eng. Program. May 1976. –University of Illinois, Urbana, IL.
- Воинов, А.М. Не Кг лазер высокого давления возбуждаемый осколками деления урана / А.М. Воинов, Л.Е. Довбыш, В.Н. Кривоносов // ЖТФ. –1982. –Т. 52. –В. 7. –С. 1346 –1350.
- Миськевич, А.И. Генерация лазерного излучения на парах кадмия при возбуждении продуктами реакции He³(n,p)T / А.И. Миськевич, А.Б. Дмитриев, Ильяшенко В.С. [и др.] // Письма в ЖТФ. –1980. –Т.6. –В.13. –С.818 –821.
- 45. Дмитриев А.Б. Возбуждение продуктами нейтронных ядерных реакций лазерных переходов в параметалических
- газовых смесях / А.Б. Дмитриев, А.И. Миськевич, В.С. Ильяшенко [и др.] // ЖТФ. –1982. –Т. 52. –В. 11. –С. 2235 –2237. 46. Magda, K.F. Nuclear pumped lasers at the Institute of Technical Physics / K.F. Magda, V.A. Grebyonkin // Transactions, Lasers '90, 827, San Diego, CA (1991).
- 47. Воинов, А.М. Квазинепрерывный газовый лазер, возбуждаемый быстрыми нейтронами / А.М. Воинов, А.С. Кошелев [и др.] // Письма в ЖТФ –1990г. т. 16 с. 86 –89.
- 48. Hebner, G.A., Hays G.H. Fission fragment excited lasing at 585.3 nm in He/Ne/Ar gas mixtures / G.A. Hebner, G.H. Hays // Appl. Phys. –1990. –v. 57. –N 21. –p. 2175.
- 49. Синянский, А.А. Исследование по созданию ядерно –лазерных устройств неприрывного действия во ВНИИЭФ / А.А. Синянский // Труды Второй Международной конференции «Физика ядерно –возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой»: г. Обнинск, –Россия, Т.1, –С.16 –36.
- 50. Копай Гора, А.П. Эмиссия возбужденных ионов кадмия при бомбардировке α –частицами / А.П. Копай Гора, А.И. Миськевич, Б.С. Саламаха // Письма в ЖТФ. –1990, т. 16. в. 11. с. 23.
- 51. Alford, W.J. Measured Laser Parameters for Reactor –Pumped He –Ar –Xe and Ar –Xe Lasers / W.J. Alford, G.H. Hays // J. Appl. Phys.. 1990. V. 65. N. 10. P. 3760.
- 52. Shaban, Y. A Practical Visible Wavelength Nuclear –Pumped Laser. Proceeding of Specialist Conference on Physics of Nuclear Induced Plasma and Problems of Nuclear Pumped Lasers / Y. Shaban, G.H. Miley, // Obninsk, – Russia, Vol.2, – 241(1993)
- 53. Bochkov, V.A. Quasi –cw lasing on the 7³S₁–6³P₂ atomic mercury transition / V.A. Bochkov, E.P. Kryzhanovskii, Magda, [et all.] // Sov. Tech. Phys. Lett. –1992. V. 18. N. 4. P. 241.
- 54. Batyrbekov, E.G. B¹⁰(n,a)Li⁷ pumped Ar –Xe Laser / E.G. Batyrbekov, E.D. Poletaev, E. Suzuki, G.H. Miley // Proceeding of 11th International Conference on Laser Interactions and Related Plasma Phenomena. – 1993. – V. 318. – P. 515, Monterey, CA.
- 55. Батырбеков, Э.Г. Аг Хе лазер с длиной волны 1,73 мкм, накачиваемый продуктами ядерной реакции ¹⁰B(n, α)Li⁷/Э.Г. Батырбеков, Дж. Майли, Е.Д. Полетаев, Э. Судзуки // Труды конференции «Физика ядерно –возбуждаемой плазы и проблемы лазеров с ядерной накачкой» 1995 г. Арзамас –16 т.1 –с 329.
- 56. Batyrbekov, E.G. IR Xe Direct Nuclear Pumped Laser / E.G. Batyrbekov, E.D. Poletaev, G.H. Miley // Transactions of Conference on Laser and Electro –Optics CLEO'94 – CTh04 – 8 –13 May – Anaheim – CA – USA – 1994 – P.120.
- 57. Мельников, С.П. Генерация на переходах атома кислорода при накачке смеси Не –Ne –O₂ осколками деления урана / С.П. Мельников, В.В. Порхаев // Письма в ЖТФ 1995 21 №1 С. 86.
- 58. Мельников, С.П. Генерация на ИК переходах атома хлора при накачке газовых смесей осколками деления урана / С.П. Мельников, В.В. Порхаев // Квантовая электроника 1995 Т 22 В.9 с.891
- 59. Барышева, Н.М. Первый ультрафиолетовый лазер с ядерной накачкой / Н.М. Барышева, А.В. Бочков, Н.В. Бочкова [и др.] // Письма в ЖТФ. –1996. –т.22 –в.15 –с. 15.
- 60. Крыжановский, В.А. Физика ядерно –возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой / В.А. Крыжановский, Э.П. Магда // Труды конференции Обнинск, 1992. Т.3 с.136 –146.

- Carter, D.D. Nuclear Pumped CW Lasing of the ³He –Ne System / D.D. Carter, M.J. Rowe, R.T. Schneider // App.Phys.Letts. 1980. –V.36. – N 2. –P. 115 –117.
- Prelas, M.A. Comments on "Nuclear Pumped CW Lasing of the ³He –Ne System" / M.A. Prelas, G.A. Schlapper // J.App.Phys. 1981. –52. –N 1. –P.496 –497.
- 63. Батырбеков, Э.Г. О влиянии на эффективность заселения 3р уровней NeI / Э.Г. Батырбеков// Вестник АН КазССР. –1990. N 6. С. 74 79.
- 64. Батырбеков, Г.А. Эффективность заселения 3р уровней неона при возбуждении жестким ионизатором / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев [и др.] // Оптика и спектроскопия, – 1991, –68 –6, 727.
- 65. Батырбеков, Г.А. Влияние гелия на эффективность заселения 3р уровней неона / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев [и др.] // Квантовая электроника. 1990–20, 9, 1084.
- 66. Batyrbekov, G.A. "Kinetics of laser active media for Ne 3p –3s transition pumped by a weak sources of external ionization" / E.G. Batyrbekov, V.A. Danilychev // Hyperfine Interaction. –1994, –88, 499.
- 67. Батырбеков, Э.Г. Кинетическая модель лазеров на 3р –3s переходах атома неона со слабым источников внешней ионизации / Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев // Препринт ИЯФ АН Каз ССР Алматы –1992 г.
- 68. Батырбеков, Г.А. Молекулярная полоса в спектре излучения смеси Ar –Xe / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков [и др.] // Оптика и спектроскопия. 1987. Т.62. В.1. с.212–214.
- 69. Батырбеков, Г.А. Измерение константы скорости перезарядки ионов Xe₂⁺ на атомах ртути / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, З.Б. Бекмурзаева [и др.] // Оптика и спектроскопия. −1987. −Т. 62. −В. 1. −С. 229 −230.
- 70. Батырбеков, Г.А. Измерение коэффициента преобразования ядерной энергии в световую в смесях Xe –Hg / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, А.Б. Тлеужанов, М.У. Хасенов // ЖПС. –1987. –Т. 47. –В. 4. –С. 650 –654.
- Батыросков, Э.Т. Батыросков, А.Б. Глсужанов, М.Э. Хасснов // ЖПС. –1987. Г. 47. Б. 4. –С. 050 –054.
 Батырбеков, Г.А. Люминесценция смесей ртути и инертных газов с молекулярными добавками при возбуждении ионизирующим излучением / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Долгих [и др.] // ЖПС. –1988. –Т. 49. –В. 5. – С. 770–774.
- Батырбеков, Г.А. Кинетика возбужденных состояний HgI при накачке ионизирующим излучением / Г.А. Батырбеков,
 Э.Г. Батырбеков, В.А. Долгих [и др.] // Препринт ИЯФ КазССР N3 87 Алма Ата 1987 41 с.
- 73. Батырбеков, Г.А. О возможности создания квазинепрерывного лазера на 7³S –6³P переходах ртути при накачке ионизирующим излучением / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Долгих [и др.] // Квантовая электроника. –1997. – Т. 14. – N 6. –С. 1216–1219.
- 74. Корзенев, А.Н. Исследование порога генерации газового лазера с ядерной накачкой в зависимости от длительности нахождения лазерно – активной среды в корпусе лазерного модуля / А.Н. Корзенев, А.В. Гаранин, С.Л. Турутин // ЖТФ – 2008, –Т.78, –В. 7, –С.76–80.

ЯДРОЛЫ-ОПТИКАЛЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР. І. ТІКЕЛЕЙ ЯДРОЛЫҚ ТОЛТЫРУЛЫ ЛАЗЕРЛЕР

Батырбеков Е.Г.

«КК Интерконнект» БК, Алматы, Қазақстан

Ядролық энергияны түрлендірудің мүмкін екі жолы талқыланады – лазерлердің тікелей және комбинациялы ядролық толтыруы. Ядролық толтырулы лазерлердің активті орталарының ерекшеліктері қарастырылған. Ядролық энергияны когерентті жарық сәулесі энергиясына тікелей түрлендіру саласындағы әдебиетте келтірілген зерттеулер нәтижелеріне шолу берілген. Тікелей ядролық толтыруда пайда болған байланысбайланысты атомарлы ауысулардағы лазерлер активті орталарын экспериментті және теориялық зерттеулердегі қазақстандық ғалымдардың нәтижелері келтірілген.

NUCLEAR-OPTICAL CONVERTERS DIRECT NUCLEAR PUMPED LASERS

E.G. Batyrbekov

«KK Interconnect» JSC, Almaty, Kazakhstan

Two possible ways of nuclear energy conversion into laser radiation – direct and combined nuclear energy have been discussed. Peculiarities of active media of nuclear pumped lasers have been considered. The review of available in references research results of direct conversion of nuclear energy into coherent light radiation one has been carried out. Results of experimental and theoretical investigation of active direct nuclear pumped laser media on bound-bounded atomic transitions, received by Kazakhstan scientists, have been given.

УДК: 539.196; 535.37

ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. II. ЛАЗЕРЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ

Батырбеков Э.Г.

СП «КК Интерконнект», Алматы, Казахстан

Представлен обзор исследований лазеров с комбинированной ядерной накачкой. Рассмотрен вопрос применения электроионизационного метода накачки лазеров в условиях стационарного ядерного реактора. Анализируется вопрос использования газообразных β-излучателей для объемной ионизации активных сред лазеров высокого давления. Обсуждается концепция исследования активных сред лазер, способных работать, как с прямой, так и с комбинированной ядерными накачками.

Введение

В настоящее время концепция создания лазеров с прямой ядерной накачкой (ПЯН) представляет собой импульсные ядерные реакторы со встроенными в активную зону лазерными установками. При этом удельная, вкладываемая в активную лазерную среду, мощность ограничивается характерными для импульсных ядерных реакторов потоками тепловых нейтронов. Для достижения высоких выходных характеристик необходимо использовать большие объемы активных лазерных сред. Увеличение объемов активных сред лазеров в свою очередь отрицательно сказывается на критических параметрах реактора.

В лазерах с комбинированной ядерной накачкой (КЯН), где энергия ядерных реакций расходуется только на ионизацию активной лазерной среды, благодаря использованию для накачки электрического разряда возможно достижение вкладываемой в активную среду мощности на несколько порядков выше, чем в случае прямой ядерной накачки при тех же потоках тепловых нейтронов. Увеличение вкладываемой в активную лазерную среду мощности позволяет получить генерацию с более короткой длиной волны и на переходах с «маложивущими» верхними лазерными уровнями, как например, в случае с эксимерными молекулами.

При использовании нейтронного потока стационарного ядерного реактора для стабилизации разряда отсутствует проблема механической прочности разделительной фольги, присущая разрядным лазерам, стабилизируемым электронным пучком. Источники ионизирующих частиц располагаются в рабочем объеме лазера, а проникающая способность нейтронов через стенки лазерной камеры велика. Соответственно нет ограничений на частоту повторения импульсов со стороны прочности конструкций. Использование объемных источников ионизации, таких, как ${\rm He}^3$ или $^{235}{\rm UF}_6$ в составе рабочего газа позволит однородно ионизовать большие объемы рабочих смесей (десятки-сотни литров) при больших давлениях. Непрерывная ионизация рабочей смеси в ядерном реакторе снимает необходимость согласования импульса ионизатора с импульсом разряда и облегчает накопление отрицательных

ионов, полезных для стабилизации разряда (увеличение продолжительности объемного разряда и, соответственно, величины вкладываемой в объемный разряд энергии). Отрицательные ионы и электроны непрерывно присутствуют в реакторной плазме в максимально возможной (для данной скорости ионизации) концентрации.

В данной статье мы остановимся на исследованиях комбинированного преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения. Как и в случае с прямой ядерной накачкой, лазеры с комбинированной ядерной накачкой можно условно подразделить в соответствие со сложившимся традициделением всех газовых лазеров онным на молекулярные, атомарные и эксимерные лазеры. Отсутствие информации о получении генерации на переходах ионов паров металлов с комбинированной ядерной накачкой связано в первую очередь с техническими трудностями по поддержанию необходимой температуры активной среды и, соответственно, оптимальной концентрации паров металла, как в целом по объему, так и распределением по длине и диаметру лазерной трубки.

ЛАЗЕРЫ С КЯН НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ МОЛЕКУЛ СО₂ и СО

Использование импульсного ядерного реактора для ионизации активных сред лазеров было впервые предложено в 1969 году [1]. Удвоение выходной мощности CO₂ лазера было достигнуто при использовании для ионизации активной лазерной среды пучка протонов, имитирующего продукты ядерной реакции He³(n,p)T [2,3]. Использование продуктов ядерной реакции B¹⁰(n, α)T для ионизации активной среды CO₂ лазера было продемонстрировано профессором Иллинойского университета Дж. Майли с сотрудниками [4].

Развитие электроионизационного метода лазерной накачки [5-7] контролированного электронным пучком вызвало определенный интерес к его реализации в поле излучения стационарного ядерного реактора. Сам принцип электроионизационного метода возбуждения можно представить следующим образом. Сжатый газ помещается между двумя электродами, на которые подается напряжение электрического питания. Под действием ионизирующего излучения создается проводимость в газе, благодаря которой возникает ток. Концентрация свободных электронов при этом зависит только от интенсивности ионизирующего излучения и не зависит от величины прикладываемого электрического поля.

Т.е. в отличие от газоразрядного лазера, где электроны не только участвуют в проводимости газа, но и создают путем прямой ионизации саму проводимость, в электроионизационных лазерах эти функции разделены. Свободные электроны создаются внешним ионизатором, а величина тока при увеличении напряженности электрического поля возрастает только вследствие увеличения дрейфовой скорости электронов, что позволяет избавиться от ряда существенных недостатков, имеющих место в газоразрядных лазерах. Во-первых, электроионизационный метод накачки снимает ограничения на давление рабочего газа и размер системы. Именно это обстоятельство является важнейшей особенностью электроионизационного метода введения энергии в активную среду лазера, принципиально отличающий его от других методов комбинированной накачки. Во-вторых, при электроионизационном методе накачки появляется возможность достижения предельного КПД лазера. В самостоятельном разряде рабочее значение приведенной напряженности поля Е/Р определяется условием самоподдерживающего разряда, и оно существенно выше, чем оптимальное для возбуждения колебательных уровней молекул. При электроионизационном методе возбуждении, поскольку проводимость создается ионизирующим излучением, можно величину Е/Р определять оптимальной, при которой энергия, выделяемая в газе, преобразуется в энергию колебаний молекул с КПД близким к 100%. В-третьих, электроионизационный метод возбуждения обеспечивает высокий уровень удельной мощности вкладываемой в разряд.

Несмотря на оптимистичные результаты, полученные в исследованиях электроионизационных лазеров с различными источниками внешней ионизации. Вопрос о возможности реализации этого метода накачки в условиях стационарного ядерного реактора оставался открытым.

С этой целью сотрудниками Института ядерной физики АН Каз. ССР и Физического института Академии Наук СССР им Лебедева были проведены комплексные исследования ядерно-возбуждаемой плазмы в активной зоне стационарного ядерного реактора [8-10]. В частности, зондовая диагностика плазмы газовой смеси CO₂:N₂:He³ =1:4:5 при давлении до 10 атм. показала, что концентрация электронов в этой смеси составляет величину до $2 \cdot 10^{12}$ см⁻³ при потоках тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ н/см²с [10]. Достигнутая степень ионизации обеспечила вклад мощности на уровне ~ 0,5 кВт/см³ и указывала на возможность достижения электроионизационного метода накачки. Впервые генерация с электроионизационным методом накачки была получена в 1976 году [11]. Генерация была получена на колебательных переходах молекулы CO_2 с ионизацией лазерной смеси $C0_2$:N₂:He = 1:4:5 продуктами ядерных реакций He³(n,p)T в активной зоне стационарного ядерного реактора BBP-K.

Этой же научной группой были проведены исследования индуцированной плазмы CO-N₂-He³ в активной зоне стационарного ядерного реактора [12,13] и получена импульсно-периодическая и стационарная генерации на колебательных переходах молекулы CO в 1978 году [14].

Выходные характеристики электроионизационных лазеров с ионизацией активных сред продуктами ядерных реакций $\text{He}^3(n,p)$ Т на колебательных переходах молекул CO₂ [11,14,15] и CO [14-16] показаны в таблице 1.

Таблица 1. Выходные характеристики СО₂ и СО лазеров с КЯН

Активная лазерная среда	Выходная энергия	кпд	Удельная выходная энергия
CO ₂	5,2 Дж	6,4%	11 Дж/л амага
CO	10 Дж	12%	18 Дж/л амага

Эксимерные лазеры с КЯН

Эксимерными называются молекулы, существующие только в возбужденных состояниях. Основное состояние таких молекул либо разлетное, либо имеет очень маленькую яму на кривой потенциальной энергии. Т.о. нижнее состояние эксимерных молекул практически не заселено, и инверсная заселенность определяется только заселенностью верхнего лазерного уровня [17]. Интерес к таким молекулам связан с возможностью получения мощного излучения в ВУФ, УФ и видимого областях спектра и высоким до 50% (люминесценция эксимерных молекул Xe₂^{*}) квантовым выходом.

Эксимерные лазеры излучают в диапазоне от излучения молекулы Ar_2^* с длиной волны $\lambda = (127\pm4)$ нм, до ZnI с $\lambda = (600\pm4)$ нм. К существенным свойствам эксимерных лазеров относятся: высокий КПД (1÷10%), большой удельный энергосъем (до 40 Дж/л в импульсе), возможность, благодаря широкой полосе излучения, плавной перестройки частоты генерации лазера в пределах 10÷100 нм. Перечисленные достоинства эксимерных лазеров открывают возможности их применения в связи и локации, разделении изотопов и медицине, ЛТС и нелинейной оптике.

С другой стороны, короткая длина волны и весьма малое время жизни эксимерных молекул (~10 нс) – требуют создания высокой плотности эксимерных молекул для получения генерации лазера, то есть необходимости введения значительной энергии за весьма короткое время. Это связано с тем, что коэффициент усиления лазера пропорционален квадрату длины волны и обратно пропорционален ширине линии спонтанного перехода.

Относительно пологий фронт нарастания и большая длительность импульсов нейтронов накачки делают невозможным практическое применение импульсных реакторов для накачки эксимерных лазеров с излучением в УФ части спектра. Правда, следует отметить попытки некоторых исследователей получить генерацию эксимерного лазера (XeF^{*}) с прямой ядерной накачкой [18,19]

В работе [20] было предложено использовать эффект накопления отрицательных ионов в плазме рабочих сред эксимерных лазеров для снижения мощности внешнего ионизатора. Снижение мощности ионизатора до уровня характерного для непрерывных источников ионизирующего излучения (стационарных ядерных реакторов, непрерывных электронных пучков, радионуклидов и т.д.) необходимо для создания лазеров с высокой частотой повторения импульсов.

Впервые возможность получения генерации в условиях стационарного ядерного реактора была показана сотрудниками Лаборатории физики ядерно-энергетических установок Института ядерной физики (г. Алматы) [21].

В 1985 году нами совместно с учеными ФИАН СССР была впервые получена генерация электроразрядного эксимерного лазера с КЯН с непрерывным источником ионизации - излучением стационарного ядерного реактора [22]. Использование излучения стационарного ядерного реактора в качестве непрерывного источника ионизации позволило на два порядка снизить мощность внешнего ионизатора, по сравнению [20,23], где ионизация производилась электронным пучком с малой длительностью.

Генерация была получена на переходе молекулы XeF^{*} в смеси ³He-Xe-NF₃. Следует отметить, что в этих экспериментах не удалось достичь высоких удельных характеристик из-за ухудшения параметров конструкции лазерной установки с увеличением потоков нейтронов.

Первые реакторные эксперименты проводились со смесью ³He:Xe:NF₃ = 300:1,5:1 при давлении меси 0.9 атм. При этих условиях максимальная удельная мощность вкладываемой в газ энергия разряда ~ 50 Дж/л. На рисунке 1 показана зависимость порогового значения зарядного напряжения на батареи накопительных конденсаторов от потока тепловых нейтронов.

Полученные результаты подтверждают вывод о том, что эксимерный лазер с комбинированной ядерной накачкой может работать при низких (~ 10¹² н/(см²с) потоках тепловых нейтронов. Таким образом продемонстрирована возможность создания эксимерного лазера с рабочим объемом десятки литров и частотой повторения импульсов до 10 КГц.



Рисунок 1. Зависимость порогового значения напряжения от потока тепловых нейтронов

ИК ЛАЗЕР С КЯН НА АТОМАРНЫХ ПЕРЕХОДАХ КСЕНОНА

Интерес к лазерам с КЯН на переходах атома ксенона определен в первую очередь тем, что именно на атомарных переходах ксенона получены рекордные на сегодня выходные характеристики для лазеров с ПЯН.

Впервые лазер с комбинированной ядерной накачкой на атомарных переходах ксенона был создан в ИЯФ НЯЦ РК [24]. Эксперименты проводились на реакторе ВВР-К. Схема экспериментальной лазерной установки показана на рисунке 2.



 активная зона ядерного реактора, 2 – термопара, 3- лазерная камера, 4- защитный кожух, 5 – калориметр, 6- волновод, 7 – труба для вывода лазерного излучения, 8- разрядник, 9 - батарея накопительных конденсаторов

Рисунок 2. Схема расположения основных узлов ЛУ

Эксперименты проводились на трех лазерных устройствах (ЛУ). Каждая из трех испытываемых ЛУ имела некоторые особенности в конструкции, определяемые задачи эксперимента. В ЛУ №2 и №3 не использовались обостряющие конденсаторы, что позволило работать при больших (до 10¹⁴ нейтрон/см²с) потоках нейтронов и высоких температурах. В ЛУ №1 и №3 ионизация газовой смеси производилась продуктами ядерной реакции ³He(n,p)T+0.76 МэВ. На ЛУ №2 проводились эксперименты с безгелиевыми газовыми средами, поэтому для ионизации активной среды использовались продукты деления ²³⁵U(n,f)FF. Окись урана-235 сплошным слоем наносилась на дополнительные электроды с плотностью ~ 10 мг/см². Наличие двойного кожуха в ЛУ №3, внешняя сторона которого охлаждалась водой реактора, а внутренняя подвергалась радиационному разогреву, позволяло варьированием давления ⁴Не в этом кожухе изменить температуру лазерной среды. Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой, которая зачеканивалась в дно внутреннего кожуха ЛУ и выводилась за крышку реактора по трубе Ø 10 мм, по которой также проводилась подача и откачка гелия.

На рисунке 3 показана зависимость выходной энергии лазера Е (ЛУ №1) от величины напряжения U на накопительных конденсаторах при различных потоках тепловых нейтронов $\Phi_{\rm T}$. Минимальное для работы лазера значение потока тепловых нейтронов - $\Phi_{\rm T} = 10^{11}$ н·см⁻²с⁻¹. Наблюдаемое на рис. уменьшение выходных параметров лазера (~ 15%) при увеличении $\Phi_{\rm T}$ с 10^{12} до 10^{13} н·см⁻²с⁻¹ связано с ухудшением параметров ЛУ (в частности, обостряющих конденсаторов), вследствие радиационного разогрева в активной зоне ядерного реактора.

На рисунке 4 приведены результаты испытания лазера на смеси Ar:Xe=100:1 при общем давлении 2 Атм с ионизацией продуктами ядерной реакции $U^{235}(n,p)T$ (ЛУ №2). Максимальные значения удельного энергосъема были достигнуты при зарядном напряжении 20 кВ и потоках тепловых нейтронов 10^{14} н/(см²с). Использование активной смеси на содержащей Не и увеличение длительности накачки позволили увеличить выходные параметры лазера на 1,5 порядка.

В этой же работе были проведены исследования работы лазера при высоких температурах активной среды. Было установлено, что увеличение температуры активной среды до 650°С в пределах погрешности измерений не влияло на выходные параметры лазера.

В лазере с КЯН на атомарных переходах ХеІ в отличие от ранее исследуемых CO, CO₂ и эксимерных лазеров с КЯН используются в качестве активной среды смеси только инертных газов, т.е. отсутствует проблема с деградацией активной среды. Генерация проходит на высоколежащих электронных переходах, что позволяет работать при высоких (более 650°С) температурах активной среды.



Рисунок 3. Зависимость выходной энергии лазерного излучения (1-3) и КПД (4) лазера от величины напряжения на накопительных конденсаторах для различных потоков тепловых нейтронов Φ_m (нсм⁻²c⁻¹): $1 - 10^{11}$; $2 u 4 - 10^{12}$; $3 - 10^{13}$



Рисунок 4. Энергия лазерного излучения как функция величины зарядного напряжения при $\Phi_m = 3 \cdot 10^{13} (1) u \, 10^{14} (2) \, n/(cm^2 c)$

Лазеры с радиоизотопной ионизацией

Впервые попытка создать лазер с несамостоятельным разрядом была предпринята в 1978 году [25], однако использование источников Am^{245} невысокой активности, расположенных с одной стороны от электродов, не позволило обеспечить генерацию при давлении газа свыше 0,5 Атм. О создании импульсного CO₂ лазера с ионизацией активной среды а-излучением плутония было доложено в [26,27].

Генерация на атомарных переходах Хе и Ne с ионизацией активной среды α -частицами впервые была получена сотрудниками ИЯФ НЯЦ РК [28, 29]. В лазере была использована схема поперечного возбуждения с разрядом малоиндуктивной емкости через ионизованный промежуток. В качестве источников ионизации использовались 20 источников Ро²¹⁰, общей активностью $3 \cdot 10^{10}$ Бк. Для смеси He(1,5 Атм)-Аг(0,5 Атм) скорость ионизации составляла $2 \cdot 10^{12}$ см⁻³с⁻¹, концентрация электронов

 $n_e \sim 2.10^9$ см⁻³. Установка позволяла использовать в качестве ионизации так же и УФ излучение.

Генерация была получена на 5d-6р переходе XeI в смеси He-Ar-Xe (более 40% энергии приходилось на $\lambda = 1,73$ мкм. Результаты оптимизации смеси показаны на рисунке 5. Механическая прочность камеры не позволяла получить максимальные выходные параметры лазера при давлениях свыше 2 Атм (рисунок 6).



Рисунок 5. Зависимость энергии излучения лазера от парциального давления аргона в смеси He-Ar-Xe (5 Top) (полное давление смеси 1,8 Amm(a) и парциального давления ксенона в смеси He(1,3 Amm)-Ar(0,5 Amm) –Xe (б)

Генерация с λ =595,2 нм 3р'[1/2]₀-3s'[1/2]₁ переходе NeI была получена только в смесях, содержащих неон и водород [29]. Влияние добавок H₂, Ar, D₂ на выходную энергию лазерного излучения показаны на рисунках 7 и 8. Необходимость присутствия водорода в неоновых смесях с аргоном (который, как и H₂, селективно участвует в опустошении нижнего лазерного уровня) объясняется помимо охлаждения электронов, участвующих в диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов, влиянием H₂ на степень колебательного возбуждения молекулярных ионов Ne₂⁺, что сказывается на потоке заселения состояние 3p'[1/2]₀ [31,32].



Рисунок 6. Зависимость энергии излучения лазера от давления смеси He:Ar:Xe=175:75:1



Рисунок 7. Зависимость энергии лазерного излучения с $\lambda = 585,2$ нм от добавок Ar (1,2), D₂ (3,4) и H₂ (5) к смесям 190 мм.рт.ст. He + [75 мм.рт.ст. Ne + 15 мм.рт.ст (H₂+Ar) (1), 15 мм.рт.ст. (H₂ + D₂) (3), 15 мм.рт.ст. H₂ (2,4,5)]

В этих экспериментах с радиоизотопной ионизацией не удалось получить генерацию на переходах эксимерных молекул [28], хотя с УФ ионизацией была получена генерация на переходах XeF и XeCl. Это связано с недостаточной степенью ионизации рабочей среды.



Рисунок 8. Зависимость энергии лазерного излучения с $\lambda = 585,2$ нм от добавок H_2 - 1, D_2 - 3 и Ar - 2 в смесь He:Ne:H₂ =190:75:10 мм.рт.ст.

Эксперименты, проведенные с эксимерными лазерами с ионизацией излучением стационарного ядерного реактора, показали, что минимальное необходимое значение потока тепловых нейтронов составляет 10^{12} н/(см 2 с), что соответствует плотности отрицательных ионов $n_n \approx 10^{10}$ см 3 [22]. Для создания такой степени ионизации необходимо иметь Po 210 с удельной активность $\sim 10^{10}$ Бк/см 2 .

В таблице 2 приведены результаты расчетов скорости ионизации S, концентрации электронов и отрицательных ионов n_e и n_n при использовании газообразных β -излучателей Kr^{85} и Ar^{42} для объемной ионизации активных сред электроразрядных лазе-

ров. Преимуществами предложенного непрерывного объемного источника ионизации лазерных смесей являются:

1) достигается высокая однородность ионизации газа, выше даже, чем в случае использования ядерных реакций типа $\text{He}^{3}(n,p)$ Т или $U^{235}(n,f)$ F;

2) отпадают ограничения на размер системы и давление газа, поскольку с их увеличением увеличивается однородность ионизации;

3) максимальный КПД (~60%) для электроразрядных лазеров получен для CO-Ar [30].

Таблица 2. Расчеты использования газообразных β -излучателей Kr°_3} и Ar^{*_2} для объемной ионизации активных срес	д лазеров
---	-----------

Смесь	Лазер	λ, мкм	Р, Атм	S, см ⁻³ с ⁻¹	n _e , см⁻³	n _n , см ⁻³
Ne:Kr ⁸⁵ :F ₂ = 85:15:0,02	KrF [*]	0,248	10	8,4x10 ¹⁴	2,5x10 ⁶	2,5x10 ¹⁰
He:Ar ⁴² :Xe = 100:50:1	Xe I	~ 2	10	4,7x10 ¹⁴	3x10 ¹⁰	-
He:Ne:Ar ⁴² :H ₂ =220:30:7:10	Nel	0,585	0,5	10 ¹⁰	10 ¹⁰	-
CO:Ar ⁴² = 1:9	CO	~ 5	1	1,2x10 ¹⁰	3x10 ¹⁰	-
CO:Kr ⁸⁵ = 1:9	CO	~ 5	1	5x10 ¹⁴	6x10 ¹⁰	-

Заключение

Интерес к проблеме преобразования ядерной энергии в энергию когерентного светового излучения определяется в первую очередь перспективой создания автономных ядерно-энергетических установок, генерирующих лазерное излучение и способных найти различное практическое значение. Лазерный термоядерный синтез, передача лучевой энергии и информации на большие расстояния, ракетные лазерные двигатели, лазерное разделение изотопов и фотохимия, восстановление озонного слоя в стратосфере и уничтожение космического мусора - вот неполный список перспективных областей использования лазеров с ядерной накачкой.

Традиционно исследования лазеров с прямой и комбинированной ядерными накачками проводились независимо и различными научными группами. В связи с этим интерес представляет разработанная казахстанскими учеными концепция исследования активных сред лазер, способных работать, как с прямой, так и с комбинированной ядерными накачками. Такой подход позволяет использовать преимущества и устранить недостатки обоих методов ядерной накачкой. Кроме того, необходимость одновременного использования как прямой, так и комбинированной ядерных накачек, определяется их различными практическими приложениями. Как, например, в условиях ядерно-энергетической установки космического назначения на базе электрогенерирующего ядерного реактора, где электроразрядный режим генерации используется для коммуникации или космической локации, а прямая ядерная накачка - для обеспечения дополнительной системы безопасности ядерного реактора, когда рабочий поток тепловых нейтронов ядерного реактора несколько меньше порогового значения лазера с прямой ядерной накачкой.

Заслуживает так же внимание концепция использования излучение ядерно-возбуждаемых ламп для накачки активных сред лазеров [33], а так же эксперименты с твердотельными конверторами, накачиваемыми излучением ЛЯН [34].

Литература

- 1. Андрияхин, В.Н. О возрастании мощности генерации лазера на CO₂ под воздействием пучка быстрых протонов / В.Н. Андрияхин, Е.П. Велихов, Е.А. Голубев [и др] // Письма в ЖЭТФ. –1969. –Т. 8. –С. 346 –349
- Андрияхин, В.Н. К вопросу о ядерной накачке лазеров на основе молекулярных газов / В.Н. Андрияхин, В.В. Васильцов, С.С. Красильников, В.Д. Письменный // ЖЭТФ. –1972. –Т. 63. –В. 5. –С. 1635 –1644.
- Андрияхин, В.Н. Квазистационарный СО₂ –лазера атмосферного давления с несамостоятельным разрядом, контролируемым потоком нейтронов / В.Н. Андрияхин, Е.П. Велихов, А.С. Ковалев [и др] // Письма в ЖЭТФ. –1973. –Т. 18. –В. 1. –С. 15–19.
- Gauley, T. Enhancement of Co₂ Laser Power and Efficiency by Neutron Irradiation / T. Gauley, J. Verdeyn, G.H. Miley // Appl. – Phys. –1971. –12, 12, 568.
- 5. Басов, Н.Г. Сборник «Квантовая электроника» : выпуск 3 / Н.Г. Басов [и др] // М. «Сов. Радио» 1971 с.121.
- 6. Данилычев, В.А. Труды ФИАН СССР / В.А. Данилычев, О.М. Керимов, И.Б. Ковш // 1976. Т.85. с. 49.
- Данилычев, В.А. Итоги науки и техники / В.А. Данилычев, О.М. Керимов, И.Б. Ковш // Радиотехника т.12 ВИНИТИ – 1977.
- Батырбеков, Г.А. Кинетика процессов и концентрация электронов в плотной плазме газовых смесей CO₂ −N₂ −He³ и CO₂ −N₂ −He³ −Xe, созданной в ядерном реакторе / Г.А. Батырбеков, С.К. Кунаков, М.П. Марденов // Известия АН КазССР – сер. физ. –мат. –1977. –N 6. –С. 56 –60.
- Батырбеков, Г.А. Несамостоятельный разряд в плазме CO₂ −N₂ −He³, образованной в поле излучения стационарного ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, М.П. Марденов, В.А. Данилычев [и др] // Краткие сообщения по физике – ЭиТФ. – 1977. –N 3. –C. 26 – 30.
- 10. Батырбеков, Г.А. Исследование параметров плазмы смеси CO₂ −N₂ −He³, образованной в активной зоне стационарного ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, М.П. Марденов, С.К. Кунаков [и др] // ЖТФ. −1978. −T.48. –B. 1. –C. 39 –41.
- 11. Батырбеков, Г.А. Электроионизационный CO₂ –лазер, работающий в активной зоне стационарного ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, В.А. Данилычев, И.Б. Ковш [и др] // Квантовая электорника. –1977. –Т. 4. –N 5. –С. 1166 –1168.

- 12. Батырбеков, Г.А. Исследования параметров плазмы несамостоятельного разряда в газовой смеси CO −N₂ −³He, помещенной в активной зоне ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, В.А. Данилычев, А.А. Ионин [и др] // ЖТФ. −1979. Т. 49. –В. 1. –С. 55 –61.
- 13. Батырбеков, Г.А. Химические процессы в плазме газовой смеси CO −N₂ −³He, помещенной в активную зону ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, А.А. Кострица, М.У. Хасенов // Химия высоких энергий. −1983. −Т. 17. −N 3. −С. 266 −269.
- 14. Батырбеков, Г.А. Возбуждение лазерных смесей СО –N₂ –³Не и СО₂ –N₂ –³Не несамостоятельным разрядом в активной зоне ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, В.А. Данилычев, А.А. Ионин [и др] // Известия АН СССР. –1978. –Т.42. –N 12. –С. 2484 –2487.
- Батырбеков Г.А. Исследование электроионизационных CO₂ и CO лазеров, работающих в активной зоне стационарного ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, А.О. Бейсебаев, Ш.Х. Гизатулин [и др] // Квантовая электроника. – 1982. – Т. 9. – N7. – С. 1493 – 1496.
- 16. Батырбеков, Г.А. Охлаждаемый электроионизационный СО –лазер, работающий в активной зоне ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, В.А. Данилычев, И.Б. Ковш, М.У. Хасенов // Письма в ЖТФ. –1979. –Т. 5. –В. 14. –С. 837 –840.
- 17. Роудз, Ч. Эксимерные лазеры / Ч.Роудз // Издательство «Мир» Москва 1981.
- Miley G.H. Nuclear Pumping of XeF(B) a Candidate Laser Fusion Driver / G.H. Miley, S.J.S. Nagalingam, F.P. Body, M.A. Prelas // Trans.Am.Nucl.Soc. –1978. –V.30. –Nov.12 –16. –P.26.
- 19. Hohl, F. Volume Pumped Nuclear Lasers: Proc. First Int. Symp. Nuclear Induced Plasma and Nuclea Pumped Lasers / F. Hohl [et al.] // Orsay, France, May, 1978.
- Александров, А.Ю. О возможности создания эксимерных лазеров с ионизацией внешним источником малой мощности / А.Ю. Александров, Н.Г. Басов, В.А. Данилычев [и др] // Квантовая электроника. – 1981. – т.8. – №9. – с.1992.
- 21. Батырбеков, Г.А. О возможности создания эксимерных лазеров с ионизацией излучением ядерного реактора / Г.А. Батырбеков, А.А. Кострица, Ю.А. Кузьмин [и др] // Письма в ЖТФ. –1982. –Т. 8. –N 13. –С. 789 –791.
- 22. Batyrbekov, E.G. Direct and Combined Nuclear Pumped Lasers / E.G.Batyrbekov // Preprint IAE NNC RK Almaty 1994, 69c.
- 23. Басов, Н.Г. Электроразрядный эксимерный лазер на молекуле XeF^{*} со стабилизацией разряда электронным пучком малой плотности тока / Н.Г. Басов, В.А. Данилычев, О.М. Керимов, А.И. Миланич // Письма в ЖТФ. –1981, т.7, в.20, 1217.
- Батырбеков, Г.А. Электроразрядный ксеноновый лазер со слабой ионизацией внешним источником / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев [и др] // Квантовая электроника. –1989. –Т. 16. –N 11. –С. 2165 –2169.
- 25. Bigio, I.J. Preionization of Pulsed Gas Laser by Radioactive Source / I.J. Bigio // IEEE J. Quant. Electron. -1978. -QE -14. -N 2. -P. 75 -76.
- Лавренюк, В.Е. СО₂ лазер с радиоизотопной предионизацией / В.Е. Лавренюк, И.В. Подмошенский, П.Н. Роговцев // Письма в ЖТФ. –1983. –В. 5. –С. 284 –288.
- Глущенкко, Ю.В. Предионизация газовой смеси CO₂ –лазера α –частицами / Ю.В. Глущенкко, В.Е. Лавренюк // Квантовая электроника. –1986. –Т. 13. – N 10. –С. 2031 –2037.
- 28. Батырбеков, Г.А. Электроразрядный лазер с радиоизотопной предионизацией / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, А.Б. Тлеужанов, М.У. Хасенов // ЖТФ. –1987. –Т. 57. –С. 4. –С. 783 –785.
- 29. Батырбеков, Г.А. Исследование генерации на 3р –3s переходах неона при накачке самостоятельным разрядом с радиоизотопной предыонизацией / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев [и др] // Квантовая электроника. – 1989. – Т.16. – №10. – с. 2060 –2062.
- 30. Mann, M.M. CO Electric Discharge Lasers / M.M. Mann // AIAA Journal. -1976. -V. 14. -N 5. -P. 549 -567.
- 31. Батырбеков, Г.А. Эффективность заселения 3р уровней неона при возбуждении жестким ионизатором / Г.А.
- Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев[и др] // Оптика и спектроскопия, 1991, –68 –6, 727.
- Батырбеков, Г.А. Влияние гелия на эффективность заселения 3р уровней неона / Г.А. Батырбеков, Э.Г. Батырбеков, В.А. Данилычев [и др] // Квантовая электроника. 1990 20, 9, 1084.
- 33. Lin, L. Design of an ICF plant using a nuclear –driven solid state laser / L. Lin, M.A. Prelas, Z. He, J.T. Bahns, W.C. Stwalley, G.H. Miley, E.G. Batyrbekov, Y.R. Shaban, M. Petra // Laser and Particles Beams 1995, V.13, №1, 95 –109.
- 34. Магда, Э.П. Итоги работ в РФЯЦ –ВНИИТФ по исследованиям лазеров с накачкой от импульсных реакторов / Э.П Магда // IV Международная конференция «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» – Обнинск – 2007 – С.14 –16.

ЯДРОЛЫ-ОПТИКАЛЫҚ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР. II. КОМБИНАЦИЯЛЫ ЯДРОЛЫҚ ТОЛТЫРУЛЫ ЛАЗЕРЛЕР

Батырбеков Е.Г.

«КК Интерконнект» БК, Алматы, Қазақстан

Комбинациялы ядролық толтырулы лазерлерді зерттеулерге шолу ұсынылған. Стационар ядролық реактор жағдайында лазерлерді толтырудың электроиондау әдісін қолдану мәселесі қарастырылған. Жоғары қысымды лазерлер активті ортасын көлемдік иондау үшін газ тәрізді β-сәуле шашқыштарды пайдалану мәселесі талданады. Ядролық толтырудың тікелей де, комбинациялы да түрлерімен жұмыс істеуге қабілетті лазерлердің активті ортасын зерттеу концепциясы талқыланады.

NUCLEAR-OPTICAL CONVERTERS. II.COMBINED NUCLEAR PUMPED LASERS

E.G. Batyrbekov

«KK Interconnect» JSC, Almaty, Kazakhstan

The review of investigation of combined nuclear pumped lasers has been given. Application of electroionization laser pumping method in the field of steady state nuclear reactor has been considered. Application of gaseous β -irradiators for volume ionization of high pressure active laser media has been analized. Conception of investigation of laser active media, which can operate both with direct and combined nuclear pumping, has been discussed.

УДК 624,121

РАЗРАБОТКА ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БЛОКОВ, ВМЕЩАЮЩИХ ПОДЗЕМНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ВЗРЫВЫ (ПЯВ) ДЛЯ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Шайторов В.Н., Жолдыбаев А.К., Кислый Б.И.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

На основании анализа факторов геоэкологических рисков [1] в связи с проведением ПЯВ и результатов опытно-методических исследований обоснованы принципы построения геолого-геофизических моделей блоков, вмещающих ПЯВ, отражающие в пространстве и времени показатели наиболее значимых факторов, дестабилизирующих экологическую обстановку на площадке, увязанные с физико-геологическими особенностями ее строения, разработаны геолого-геофизические модели для двух площадок ПЯВ.

Введение

Как известно, в период функционирования СИП на территории участка Балапан было проведено множество подземных ядерных взрывов (ПЯВ) в блоках горных пород, различающихся по вещественному составу и глубинному строению. Многочисленные исследования показали, что основными геоэкологическим рисками, связанными с проявлением и активизацией поствзрывных процессов в следствие ПЯВ, являются (таблица 1).

Возможность реализации таких рисков в первую очередь будет определяться предрасположенностью недр приустьевых площадок к инициализации поствзрывных процессов, ухудшающих геоэкологическую обстановку, и проявленностью термодинамического и радиационного воздействия ПЯВ в конкретных глубинных физико-геологических условиях.

При этом развитие поствзрывных деструктивных процессов, связанных с разрушением полостей и развитием провальных явлений, наиболее вероятно в обводненных блоках, сложенных породами с пониженной прочностью, в том числе за счет трещиноватости и рассланцованости. Для газовыделения, как следствие теплового воздействия ПЯВ, наиболее благоприятны углеродсодержащие породы, такие как углистые сланцы. Для радионуклидного загрязнения подземных вод необходимо наличие путей миграции, в качестве которых могут быть трещинные структуры, сопряженные с полостями, а также благоприятных гидродинамических условий, обеспечивающих вынос радиоактивных продуктов за пределы полостей. Указанные особенности строения геологической среды и воздействия ПЯВ представляют собой совокупность основных природных и техногенных факторов, дестабилизирующих геоэкологическую обстановку.

Очевидно, что выявление и изучение таких экологически значимых особенностей глубинного строения и проствзрывых процессов должны быть неотъемлемой составляющей исследований по оценке и прогнозированию геоэкологической обстановки в местах проведения ПЯВ. Решение этих задач, учитывая предпочтительность дистанционных методов зондирования недр [2, 3], наиболее эффективно обеспечивается на основе постоянно действующих геолого-геофизических моделей, разрабатываемых и уточняемых по мере изучения объектов. Обоснование содержания и разработка таких моделей для площадок ПЯВ явилось одним из направлений комплексных геофизических исследований ИГИ на участке Балапан, результаты которых приводятся в настоящей работе.

Таблица 1. Основные экологические риски в связи с ПЯВ и природно-техногенные факторы, дестабилизирующие геоэкологическую обстановку

Экологические риски	Факторы дестабилизирующие геоэкологическую обстановку
Разрушение ядерных полостей, обра-	1. Обводненные участки разреза, сложенные трещиноватыми и рассланцованными
зование провальных воронок	породами с пониженной прочностью.
	2. Проявления деструктивных эффектов (положение в пространстве, размеры зон
	дробления ПЯВ и сопряженных с ними ослабленных структур).
	3. Наличие микроразрядок механических напряжений в районах эпицентров ПЯВ.
Выделение горючих и токсичных га-	1. Наличие углефицированных пород на глубинах гипоцентров ПЯВ.
зов на приустьевых площадках ПЯВ	2. Проявления газовыделения (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , CO).
Радионуклидное загрязнение горных	1. Наличие водопроницаемых трещинных структур, сопряженных с полостями ПЯВ.
пород и подземных вод	2. Гидравлическая связь полостей ПЯВ с подземными водами.
	3. Активная гидродинамика подземных вод.
	4. Радионуклидное загрязнение подземных вод, горных пород и дневной поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Принципы построения геолого-геофизических моделей блоков, вмещающих ПЯВ и обоснование объектов моделирования

При разработке геолого-геофизических моделей блоков вмещающих ПЯВ полагалось, что с одной стороны, модели должны включать возможно большее количество факторов, дестабилизирующих геоэкологическую обстановку, проявленных аномальными изменениями физических характеристик вмещающих пород и формируемых ими геофизических полей, с другой – способы реализации таких аномальных эффектов для решения геоэкологических задач.

Как показали тематические исследования [4], в разрабатываемых моделях возможно, в зависимости от степени геолого-геофизической изученности объектов, отображение следующих основных составляющих поствзрывной глубинной обстановки и экологически значимых процессов (таблица 2).

По мере накопления экспериментальных данных и повышения степени геоэкологической изученности площадок ПЯВ, отдельные составляющие таких моделей несомненно будут корректироваться и дополняться как по составу и количеству привлекаемых показателей, так и по методам и технологиям их получения. На сегодняшний день состояние геоэкологической изученности участка Балапан и обеспеченности натурными наблюдениями позволило разработать исходные геолого-геофизические модели для двух площадок ПЯВ, расположенных в центральной части участка.

Результаты геолого-геофизического моделирования площадок ПЯВ

Для этой части выполнена площадная электроразведочная съемка СГ-ВП, зондирования ЗСБ по системе субпараллельных профилей [5].

По данным площадной электроразведочной съемки СГ-ВП, как показано на рисунке 1, в параметре кажущегося электрического сопротивления выявлены две электропроводящие зоны 1 и 2. Первая установлена в переходной области между высокоомной осадочно-метаморфогенной толщей палеозойского возраста и в целом электропроводящим комплексом юрских отложений. Она характеризуется минимальными значениями электрического сопротивления, что наиболее вероятно обусловлено слагающими ее интенсивно трещиноватыми обводненными структурами, в пределах которых расположены скважины с установленной и предполагаемой обводненностью разреза на глубинах ПЯВ, в том числе и провальная скважина 1207.

Таблица 2. Проявленность дестабилизирующих факторов в физических характеристиках и полях и методы их изучения

Дестабилизирующие факторы	Показатели дестабилизирующих факторов	Методы выявления и изуче- ния
Обводненные участки разреза, сло- женные трещиноватыми и рассланцо- ванными породами с пониженной прочностью	Понижение электрического сопротивления и скорости упругих волн в скальном фундаменте.	Электроразведка методами сопротивления, сейсморазведка КМПВ-МРВ
Проявления деструктивных эффектов (положение в пространстве, размеры зон дробления ПЯВ, и сопряженных с ними ослабленных структур)	Наличие локальных зон с аномально повышен- ными значениями энергии рассеянных волн в областях гипоцентров ПЯВ. Наличие зон с пони- женной скоростью упругих волн, локальных ано- мальных потоков, аномальных содержаний ртути в почво-грунтах в областях эпицентров ПЯВ.	Сейсморазведка МДРВ, КМПВ- МРВ. Приповерхностная термо- метрия, ртутометрия.
Наличие микроразрядок механических напряжений в районах эпицентров ПЯВ	Повышенный уровень естественной сейсмоаку- стической эмиссии, изменение интенсивности и перераспределение локальных тепловых и газо- вых потоков, обусловленные структурными пере- стройками геологической среды при перераспре- делении механических напряжений.	Наблюдения естественных сейсмических полей и теплового и газового режима на приустье- вых площадках.
Наличие углефицированных пород на глубинах гипоцентров ПЯВ	Повышенная поляризуемость в зонах пониженно- го электрического сопротивления горных пород.	Электроразведка методами сопротивления и вызванной поляризации
Проявления газовыделения	Аномальные содержания CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , CO	Атмогеохимические (газовые) съемки с анализом почвенного воздуха
Наличие водопроницаемых трещин- ных структур, сопряженных с полостя- ми ПЯВ	Наличие линейных зон с повышенными значе- ниями энергии рассеянных волн, сопряженных с основной зоной дробления и полостью ПЯВ	Сейсморазведка МДРВ
Гидравлическая связь полостей ПЯВ с подземными водами	Понижение электрического сопротивления в зо- нах с аномально повышенными значениями энер- гии рассеянных волн и пониженной скоростью упругих волн в скальных породах.	Электроразведка методами сопротивления, сейсморазведка МДРВ, КМПВ-МРВ
Активная гидродинамика подземных вод	Изменения температуры и тепловых потоков в водоносных горизонтах	Высокоточная скважинная тер- мометрия
Радионуклидное загрязнение подзем- ных вод, горных пород и дневной по- верхности	Наличие и концентрации техногенных радионук- лидов в подземных водах, горных породах и на дневной поверхности	спектрометрические съемки, лабораторный анализ проб кер- на скважин, воды и почвы



1. Боевые скважины: а - с гипоцентрами ПЯВ в углефицированных горных породах; б - с газовыделением; в – с провальными воронками; г – без углефицированных горных пород и аномальных явлений. 2. Зоны повышенной водонасыщенности и их номера. 3. Контур пород повышенной поляризуемости по данным СГ ВП. 4. Тектонические нарушения. 5. Изолинии кажущегося сопротивления. 6. Линия профиля зондирований методом ЗСБ.

Рисунок 1. Участок Балапан. Карта изолиний электрического сопротивления по данным ММЗ и СГ-ВП с элементами интерпретации

Вторая электропроводящая зона установлена в пределах тектонических структур, сопряженных с Сосновским разломом. Характерной особенностью этой зоны является повышенная поляризуемость слагающих ее горных пород. Данные бурения по боевым и структурным скважинам свидетельствуют, что практически все они вскрыли в различной степени углефицированные породы. Следовательно эффекты повышенной поляризуемости могут быть привлечены в качестве дополнительных признаков, характеризующих возможность дестабилизации геоэкологической обстановки в недрах за счет повышенной углефицированности среды проведения ПЯВ. В эту зону также входит ряд газвыделяющих скважин ПЯВ.

Более детальная информация по геоэкологическим особенностям глубинного строения разреза, в том числе и по выделенным аномальным зонам получена в результате интерпретации зондирований ЗСБ по линии профиля 6. В этом сечении, как показано на рисунке 2, по данным количественной интерпретации ЗСБ наибольшей обводненностью характеризуется правый фланг профиля в пространстве между Сериктасским и Чинрауским разломами, включающего и скважину 1207. Меньшей степенью бводненности характеризуется осадочно-метаморфогенная толща в районе скважины 1318, представленная преимущественно углеродсодержащими сланцами.

В соответствии с составом геоэкологических рисков в связи с ПЯВ, недра приустьевой площадок скважин 1318 (140кТ) и 1313 (137 кТ), взрывы в которых проведены в углефицированных пордах, отнесены к группе предрасположенных к генерации и выделению горючих газов. Для приустьевой площадки скважины 1207 (140 кТ), учитывая природнотехногенную обводненную трещиноватость горных пород, основными рисками являются предрасположенность недр к активизации экологически опасных геодинамических процессов, связных с разрушением полостей и способствующих созданию благоприятных условий для миграции радионуклидов. Таким образом, результаты интерпретации электроразведочных данных свидетельствуют о целесообразности боле детального изучения недр, приустьевых площадок обеих скважин.

Принимая во внимание эти выводы, а также сведения по геотехнологическим условиям процессов ПЯВ, указывающие на нештатные режимы взрывов во всех трех скважинах и обеспеченность приустьевых площадок детализирующими съемками, для двух из них разработаны начальные геолого-геофизические модели.



 Изолинии ρτ. 2. Тектонические нарушения по данным ЗСБ. 3. Зоны аномально высокой электропроводности, отвечающие зонам высокой водонасыщенности. 4. Боевые скважины и их номера. 5. Боевые скважины, залегание которых осложнено: а) – углефикацией; б) – газовыделением; в) – провалами.



Триасовая система, верхний отдел – юрская система, средний отдел.
 Каменноугольная система, средний – верхний отдел, турнейский - визейский ярусы, коконьская свита.
 Средне-позднекаменноугольные диориты.
 Конгломераты.
 Песчаники.
 Алевролиты.
 Алевролиты углистые.
 Сланцы углистые.
 Андезитодациты.
 Лавобрекчии.
 Туфы, туфопесчаники, туффиты.
 Разломы.
 Предполагаемые надвиги.
 Зоны максимальной (а) и повышенной (б) водонасыщенности по данным электроразведки.
 Скважины, их номера, в числителе – мощность заряда в кТ, в знаменателе – принятая глубина взрыва в м;
 Расчетные полости взрывов (а) и столбы обрушения (б).

Рисунок 2. Участок Балапан. Геоэлектрические разрезы по данным электроразведки ЗСБ (А) с элементами интерпретации (Б)

Назначением таких моделей являлось обеспечение оценки геоэкологической ситуации для отдельных площадок с целью определения целесообразности и первостепенных мест мониторинга. Моделирование выполнено на глубину порядка 900 метров по результатам детализирующих сейсмических исследований МДРВ, электроразведки ЗСБ с привлечением данных атмогеохимических, тепловых, ртутометрических и радиометрических съемок.

Скважина 1318. Нештатная радиационная ситуация (НРС) с напорным динамическим попаданием в атмосферу продуктов взрыва в газо- и парообразной фазе.

Основная зона дробления, как показано на рисунке 3, имеет вытянутую форму с горизонтальной мощностью порядка 100 метров, залегает в интервале глубин 350-650 метров субвертикально. С этой зоной сопряжена ослабленная, предположительно межпластовая ослабленная структура, восстающая под углом порядка 30° к дневной поверхности в северном направлении. Газовыделения CH₄, CO₂, O₂, и CO в районе устья не обнаружено. Радиационный фон не превышает 14 мкр/час.

1. Экологически значимые особенности поствзрывных физико-геологических условий:

 наличие ослабленных структур, сопряженных с основной зоной дробления и трещиноватости, являющихся потенциальными каналами газоистечения, а также миграции радионуклидов в тещинно-поровые и трещинные воды при разрушении полости;

 раздробленность кровли скального фундамента в районе эпицентра взрыва, проявленная чередованием множества блоков с различной скоростью распространения упругих волн и, как следствии, флюидопроницаемость пристволового пространства боевой скважины, характеризующаяся повышенным тепловым потоком.

2. Факторами, стабилизирующими геоэкологическую обстановку в недрах выступают:

- в целом, слабая водопроницаемость блока осадочно-метаморфогенных пород, в котором проведен ПЯВ, что ограничивает возможность распространения радионуклидов, в случае разрушения полости только по межпластовой ослабленной структуре;
- отсутствие газовыделения, хотя по архивным данным оно имело место.

3. Негативные изменения геоэкологической обстановки на приустьевой площадке скважины 1318 наиболее вероятны в связи с выделением метана в областях, прилегающих к эпицентру взрыва и, предположительно, на удалении от него порядка 400-500 метров в северном направлении (ПК 1200). Первоочередными параметрами для мониторинга в этих областях являются газовая обстановка и температура (на предмет активизации процессов окисления), а также оценка геодинамической активности.



1 - обводненные зоны дробления (а) и повышенной трещиноватости (б) по данным МДРВ; 2 - потенциальные каналы миграции радионуклидов в трещинные и трещинно-поровые воды по разрывным структурам со следами термодинамического воздействия ПЯВ (повышенные значения ЭРВ и теплового потока, пониженные содержания ртути в литохимических пробах), сопряженным с полостью, зоной дробления и интенсивной трещиноватости; 3 - I, II, III - области несущественной, повышенной и максимальной природной и техногенной нарушенности блока в изолиниях относительного интегрального параметра поствзрывного влияния ПЯВ на геологическую среду; 4 – графики геофизических полей: - теплового потока, б - содержания ртути в почво-грунтах, а в - гамма-активности, г - граничной скорости; 5 - фрагмент предполагаемой надвиговой структуры; 6 - межпластовая ослабленная зона; 7 – предполагаемое направление миграции радионуклидов; 8 - положение скважины 1318 по линии профиля.

Рисунок 3. Участок Балапан. Геолого-геофизическая модель блока приустьевой площадки ПЯВ в скважине 1318

Скважина 1207. Взрыв поведен 31.05.1974 г. в углефицированных сланцах, данных по глубине взрыва нет, мощность 140 Кт, неполный камуфлет. Нештатная радиационная ситуация (НРС) с напорным динамическим попаданием в атмосферу продуктов взрыва в газо- и парообразной фазе.

Согласно рисунку 4 основная зона дробления имеет вытянутую форму с горизонтальной мощностью порядка 220 метров, залегает в интервале глубин 350-650 метров субвертикально. С этой зоной сопряжена ослабленная, предположительно межпластовая структура, восстающая под углом порядка 70° к дневной поверхности в южном направлении. Газовыделения CH₄, CO₂, O₂, и CO в районе устья не обнаружено. Радиационный фон в районе устья скважины порядка 26 мкр/час.



1. Обводненный блок слабопроницаемых осадочно-метаморфогенных пород, вмещающий полость ПЯВ, характеризующийся пониженными значениями электрического сопротивления (о). 2. Обводненные зоны дробления (а) и повышенной трещиноватости (б) по данным МДРВ. 3. Фрагмент водоносной интенсивно трещиноватой (электропроводящей с повышенными значениями ЭРВ) тектонической структуры в зоне действия Сериктасского разлома. 4. Потенциальные каналы миграции радионуклидов в трещинные и трещинно-поровые воды по разрывным структурам со следами термодинамического воздействия ПЯВ (повышенные значения ЭРВ и теплового потока, пониженные содержания ртути в литохимических пробах), сопряженным с полостью, зоной дробления и интенсивной трешиноватости. 5. Зона радионуклидного загрязнения дневной поверхности (а) в районе провальной воронки (б) с повышенной сейсмоакустической активностью в связи с проседанием глинистой толщи над столбом обрушения. 6. Водоупорные глины, экранирующие перенос радионуклидного загрязнения с поверхности в подземные воды. 7. I, II, III - области несущественной, повышенной и максимальной природной и техногенной нарушенности блока в изолиниях относительного интегрального параметра поствзрывного влияния ПЯВ на геологическую среду. 8. Графики геофизических полей: а - теплового потока, б - содержания ртути в почво-грунтах, в – гамма-активности. 9. Разломы по геологическим данным. 10. Предполагаемое направление миграции радионуклидов. 11. Положение скважины 1207 по линии профиля.

Рисунок 4. Участок Балапан. Геолого-геофизическая модель блока приустьевой площадки ПЯВ в скважине 1207 1. Экологически значимые собенности поствзрывных физико-геологических условий:

- обводненность блока осадочно-метамофогенной толщи в районе гипоцентра ПЯВ, способствующая разрушению полости и последующему выносу из нее радионуклидов;
- наличие флюидопроницаемых тектонических структур, сопряженных с основной зоной дробления и трещиноватости, являющихся потенциальными каналами миграции радионуклидов при разрушении полости;
- проявление сейсмоакустической активности в районе эпицентра взрыва в связи с процессами проседания глинистой толщи над столбом обрушения [6, 7], способствующими выдавливанию радиоактивных вод из полости;
- повышенный тепловой поток, свидетельствующий о повышенной флюидопроницаемости пристволового пространства.

2. Факторами, стабилизирующими геоэкологическую обстановку в недрах выступают наличие блока интрузивных и эффузивно-осадочных пород на южном фланге площадки, препятствующего распространению радионуклидов, в случае разрушения полости, в зону влияния обводненного регионального Сериктасского разлома, а также горизонт водоупорных глин, защищающих подземные воды от радионуклидного загрязнения с поверхности.

3. Негативные изменения геоэкологической обстановки на приустьевой площадке скважины 1207 наиболее вероятны в области, прилегающей к эпицентру взрыва и на удалении от него порядка 300 метров в южном направлении (ПК 1000). Первоочередными параметрами для мониторинга в этих областях являются геодинамическая активность и радионуклидное загрязнение недр. В целом, следует отметить, что информационный потенциал, заложенный в принципах построения и частично реализованный в геолого-геофизических моделях, и накопленный методический опыт вполне могут и должны быть использованы для оценки и прогнозирования геоэкологической ситуации площадок ПЯВ, учитывающих особенности глубинного строения и поствзрывных геологических процессов в блоках ПЯВ на основе геолого-геофизических данных.

Выводы

В результате проведенных исследований обоснованы принципы построения геолого-геофизических моделей, впервые для участка Балапан разработаны геолого-геофизические модели приустьевых площадок, отражающие в физических характеристиках и полях геоэкологические риски, вероятность и степень и реализации рисков активизации экологически опасных поствзрывных процессов. Модели, дополняемые необходимыми показателями, по мере накопления геолого-геофизической информации, и трансформируемые в геоэкологические модели, будут являться основой для геоэкологических оценок площадок ПЯВ и обоснования целесообразности дальнейшего мониторинга, контролируемых параметров и пунктов наблюдения.

При этом необходимо создание системы постоянно действующих геоэкологических моделей, что в процессе мониторинга обеспечит получение непрерывной информации, необходимой для повышения достоверности прогнозирования тенденций развития геоэкологической обстановки. Формирование постоянно действующих моделей рассматривается в качестве основной задачи системно-информационного построения последующих геоэкологических исследований.

Литература

- 1. Гацков, В. Г. К методике геоэкологических исследований нефтегазоносных районов / В. Г. Гацков Вести Воронежского ун-та. Геология, 2004, №1.
- Трифонова, Т. А. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях / Т. А Трифонова, Н. В. Мищенко, А. Н. Краснощеков – М. Академический Проект, 2005. – 352 с.
- 3. Горяинов, Н. Н. Сейсмические методы в инженерной геологии. / Н. Н. Горяинов, Ф. М. Ляховицкий М., Недра, 1979. 143с.
- Изучение особенностей строения зон дезинтеграции, сопряженных с полостью 5-РТК с использованием методов скважинной сейсморазведки : отчет по контракту №31 / ИГИ НЯЦ РК ; М. И. Мелентьев, В. Н.Шайторов, Б. И. Кислый [и др.] – Фонды ИГИ, 2001 г.
- 5. Электроразведка. Справочник геофизика. / Под ред. В.К. Хмелевского и В.М. Бондаренко. М. «Недра» 1989
- Постановка системы контроля сейсмичности в районе полости 5РТК : отчет по контракту №69 / ИГИ НЯЦ РК ; В. Н. Шайторов, В. Б. Попов, Л. М. Шипицына [и др.] – Фонды ИГИ, 2002 г
- 7. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. / А.И. Савич [и др.] М.: Недра, 1969.

ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРЫН (ЖЯЖ) СИҒЫЗАТЫН, ОЛАРДЫҢ ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАЙ-КҮЙІН БАҒАЛАУҒА ЖӘНЕ БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН БЛОКТАРДЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕРІН ӘЗІРЛЕУ

Шайторов В.Н., Жолдыбаев А. К. Кислый Б.И.

ҚР ҰЯО Герфизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Таужыныстардың экологиялық тұрақсыздануын сипаттайтын ең маңызды факторлары кеңістік пен уақытта өзеруін көрсететін жерасты ядролық жарылыстың гипоорталығын сыйыстыратын таужыныстар блогының геология-геофизикалық моделін құру прициптері негізделген. Жерасты ядролық жарылыстар өткізілген екі жері бойынша әзірленген геология-геофизикалық модельдері сипатталған.

DEVELOPMENT OF GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL MODELS OF BLOCKS ACCOMMODATING UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS (UNE) TO ASSESS AND PREDICT THEIR GEOECOLOGICAL CONDITION

V.N. Shaitorov, A.K. Zholdybayev., B.I. Kisliy

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Creation principles of geology-geophysical models of rocks hosting hypocenter of underground nuclear explosion and reflecting changes through time and space of the most significant specifications that describe rocks ecological destabilization have been justified. Developed geology-geophysical models for two underground nuclear explosions are given.

УДК 577.391:504.73:539.16

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАКОПЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ РАСТЕНИЯМИ ЛУГОВОГО БИОГЕОЦЕНОЗА

Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Кабдыракова А.М., Магашева Р.Ю., Паницкий А.В., Ястребкова Н.В., Байгазинов Ж.А.

Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты исследований по оценке естественных вариаций коэффициентов накопления искусственных радионуклидов для некоторых видов растений лугового биогеоценоза при минимальном различии влияющих макрофакторов (климатические условия, тип почвы, видовые особенности растений, характер радиационного загрязнения). Рассмотрено влияние некоторых физико-химических свойств луговых почв на коэффициенты накопления искусственных радионуклидов для определенных видов растений.

Введение

Вопрос о накоплении искусственных радионуклидов растениями достаточно полно был изучен при радиационных авариях на Южном Урале и в Чернобыле. Многолетний мониторинг загрязненных территорий позволил детально оценить параметры накопления радионуклидов, как сельскохозяйственными культурами, так и естественными растениями.

Основными результатами тех исследований стали данные о влиянии на накопление радионуклидов растениями ряда факторов, среди которых можно выделить: физико-химические свойства радионуклидов; агрохимическая характеристика почв; биологические особенности растений [1,2]. На основании экспериментальных опытов были установлены многочисленные закономерности между биологической доступностью радионуклидов и свойствами почв (гумусом, механическим составом, емкости поглощения и др.), параметрами накопления их растениями и биологическими особенностями самих растений и многое другое.

Важность изучения особенностей накопления радионуклидов растениями естественных биогеоценозов, учитывая все многообразие их проявлений, остается бесспорной и сейчас. Особенно актуальны подобные исследования для бывшего Семипалатинского испытательного полигона с его природно-климатическими условиями, на территории которого подобного рода работы были начаты относительно недавно.

На сегодняшний день результаты изучение миграционных процессов в системе «почва-растение» в условиях СИП носят несколько противоречивый характер. Причиной тому может быть то, что перед настоящими исследованиями ставились совершенно иного рода задачи. Так, в некоторых случаях, работы по изучению накопления радионуклидов растениями проводились без учета биологических особенностей исследуемых растений (анализировались смешанные образцы) [3], недостаточно полно рассматривались физико-химические свойства почв [4], а внешнее механическое загрязнение растений не исключалось при расчете коэффициентов накопления [5]. Другой, не менее важной причиной некоторой неопределенности полученных результатов, является недостаток статистической достоверности [6].

Наибольший интерес, с точки зрения изучения накопления искусственных радионуклидов на территории СИП, представляют собой растения лугового биогеоценоза, отличающиеся особенно большой способностью накапливать радионуклиды, что с одной стороны, обусловлено, аккумуляцией дерниной радионуклидов в наиболее доступной для растений форме, а с другой стороны, особенностями формирования корневой системы самих луговых видов [7].

Полученные знания параметров накопления радионуклидов исследуемыми видами растений могут в дальнейшем послужить основанием для разработки как конкретных практических рекомендаций, направленных на решение проблемы радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова исследуемой территории, так и для комплекса мероприятий по снижению содержания радионуклидов в продукции, получаемой на загрязненных территориях.

Методы и материалы

Для изучения параметров накопления искусственных радионуклидов растениями лугового биоценоза на площадке «Дегелен» вдоль русла водотока штольни № 176 (в районе возведения дамбы (2006 г.) [8]) было заложено 30 исследовательских площадок (рисунок 1).



Рисунок 1. Схема расположения исследовательских площадок

Объекты исследования

Почвы исследуемой территории относятся к почвам лугового ряда. Почвы маломощные (мощность почвенной толщи в русле не превышает 40-45см, в береговой зоне – 20-25см), ввиду их незначительного по времени периода формирования, достаточно хорошо гумусированы, особенно по центру русла, хорошо промыты от легкорастворимых солей и карбонатов [9].

Ценотический состав растительного покрова отличается большим разнообразием и обусловлен, прежде всего, экологическими условиями обитания, в том числе, почвенными характеристиками, уровнем увлажнения и степенью сглаженности мелкосопочного рельефа. Некоторая трансформация растительного покрова отмечается лишь на припортальной площадке в зоне явного антропогенного вмешательства.

Основными типами естественной растительности были выделены – степной, луговый и кустарниковый. В местах развитого горного рельефа (справа от русла водотока штольни № 176) представлены петрофитные варианты. Объектами исследования стали представители луговой (пижма (*Tanacetum vulgare*), волоснец (*Leymus angustus*)) и кустарниковой растительности (шиповник (*Rosa spinosissima*)).

Методика отбора проб

Всего было заложено 30 исследовательских площадок. На каждой площадке была отобрана проба определенного вида растений и смешанная проба почвы. Смешанная проба почвы в зависимости от площади отбора растений состояла из одного или нескольких образцов, отобранных на глубину наиболее корнеобитаемого почвенного слоя до скальных пород (20 см). Пробы каждого вида растений отбирались на 10 исследовательских площадках. Всего было отобрано 30 проб растений и 30 проб почвы.

Интегральные радиационные параметры

На каждой исследовательской площадке в соответствие со стандартными методиками [10] были проведены измерения радиационных параметров – плотности потока β-частиц и мощности экспозиционной дозы (МЭД). Так, диапазон значений плотности потока βчастиц изменяется от 40 до 630 част/(мин см²), МЭД на высоте 1 метра от поверхности земли находится в пределах от 0,3 до 5,8 мкЗв/ч.

Физико-химический анализ почв

Механический состав почвы определялся пипетметодом, устанавливающим количественное соотношение в процентах почвенных фракций, охватывающих ту или иную группу частиц разного размера [11]. Определение содержания в почве гумуса проводилось по методу Тюрина в модификации Никитина [11]. Измерение рН проводилось методом потенциометрии [12].

Радионуклидный анализ

Анализы по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений проводились в соответствии с методическими указаниями на поверенной лабораторной аппаратуре [13, 14]. Определение удельной активности радионуклида ¹³⁷Cs проводилось на гамма-спектрометре Canberra GX-2020, ⁹⁰Sr – на бета-спектрометре «Прогресс». Предел обнаружения по ¹³⁷Cs составлял 1 Бк/кг (для проб растений) и 4 Бк/кг (для проб почвы), по ⁹⁰Sr – 200 Бк/кг, погрешность измерений – 10-20 % и 15-25 % соответственно.

Результаты и обсуждение

Для описания параметров накопления радионуклидов из почвы в надземной части растений были рассчитаны коэффициенты накопления (Кн), определяемые как отношение содержания радионуклида в единице массы растительности к содержанию радионуклида в единице массы почвы [7]. Данные удельной активности радионуклидов ¹³⁷Сs и ⁹⁰Sr в пробах почвы и растений и значения Кн представлены в таблице (таблица1).

На основании данных радионуклидного анализа можно сказать, что уровень радиоактивного загрязнения почв выбранных исследовательских площадок варьирует в широком диапазоне. Причем разница в значениях удельной активности для ¹³⁷Cs гораздо выше, чем для ⁹⁰Sr.

		Удельна	Удельная активность радионуклидов, кБк/кг Кн				
Вид растений	Точка отбора	137	Cs	⁹⁰ Sr		137	90
-		растение	почва	растение	почва	US	ər
	1	7,6±0,9	4,3±0,5	12±2	7,7±1,3	1,8±0,4	1,5±0,5
	2	87±9	452±46	18±3	13±2	0,19±0,04	1,3±0,4
	3	12±1	2,4±0,3	20±3	15±2	5,1±1,1	1,3±0,4
	4	0,88±0,11	85±9	16±2	20±3	0,010±0,002	0,79±0,24
FLOVANO	5	0,28±0,05	2,3±0,3	25±3	15±2	0,12±0,03	1,7±0,5
пижма	6	0,12±0,02	1,05±0,12	19±3	19±3	0,11±0,03	0,97±0,27
	7	0,35±0,05	3,3±0,4	18±3	3,2±0,7	0,11±0,03	5,7±2,0
	8	22±2	15±2	24±3	32±4	1,5±0,3	0,74±0,20
	9	57±6	3,5±0,4	21±3	8,7±1,4	16±4	2,4±0,7
	10	82±9	29±3	20±3	18±3	2,8±0,6	1,1±0,3
	1	2,8±0,3	8±1	23±3	23±3	0,35±0,08	1,00±0,26
	2	8,0±0,9	0,74±0,10	12±2	3,7±0,7	11±3	3,2±1,2
	3	0,032±0,006	2,2±0,2	14±2	5,4±1,0	0,015±0,005	2,6±0,9
	4	9,0±1,0	0,68±0,08	14±2	3,1±0,7	13±3	4,5±1,6
	5	0,063±0,011	0,59±0,08	5,2±1,0	1,7±0,5	0,11±0,03	3,1±1,4
шиповник	6	4,8±0,5	5,0±0,5	19±3	17±2	0,96±0,22	1,1±0,3
	7	6,0±1,0	113±11	27±4	23±3	0,053±0,015	1,2±0,3
	8	12±1	29±3	13±2	33±4	0,41±0,09	0,39±0,11
	9	0,028±0,006	2,5±0,3	17±2	8±1	0,011±0,004	2,1±0,6
	10	0,072±0,011	2,3±0,3	4,4±0,8	6±1	0,031±0,008	0,76±0,27
	1	7,1±0,8	11±1	14±2	13±2	0,65±0,14	1,04±0,31
	2	9,3±1,1	28±3	14±2	14±2	0,33±0,07	1,03±0,30
	3	0,97±0,14	5,9±0,6	17±3	17±2	0,16±0,04	1,02±0,32
	4	0,16±0,03	3,04±0,34	7±2	8±1	0,052±0,016	0,88±0,39
DODOULOU	5	0,15±0,03	1,3±0,1	8±2	8,6±1,4	0,11±0,04	0,93±0,38
волоснец	6	0,11±0,02	0,026±0,006	3,9±0,8	0,61±0,25	4,2±1,8	6,4±3,9
	7	0,032±0,012	0,34±0,04	11±2	1,3±0,4	0,093±0,047	8,5±3,9
	8	0,20±0,05	2,5±0,3	16±2	10±2	0,082±0,028	1,6 ±0,4
	9	0,11±0,02	0,94±0,11	11±2	4,6±0,9	0,12±0,04	2,4 ±0,9
	10	54±6	7,2±0,8	21±3	2,2±0,5	7,5±1,6	9,5±3,5

Таблица 1. Удельная активность и Кн радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr

Несмотря на относительно небольшую площадь исследуемой территории, идентичность климатических условий и типа почвы, а также отбор проб растений по видам диапазон значений Кн радионуклидов 137 Cs и 90 Sr варьирует в неожиданно широких пределах. Для радионуклида 90 Sr он составляет один порядок, для 137 Cs достигает трех. Для более наглядного представления полученных результатов на рисунке построена гистограмма частоты встречаемости Кн. (рисунок 2).

Различия в распределении значений Кн видны как для разных радионуклидов, так и для отдельных видов растений. Так, для волоснеца диапазон значений Кн ¹³⁷Cs меньше (два порядка), чем для пижмы и шиповника (три порядка) (таблица 1). Средние же значения Кн ⁹⁰Sr в отличие от ¹³⁷Cs смещены в сторону больших величин, что подтверждает известный факт, что в большей степени в растениях накапливается именно ⁹⁰Sr.

Для обоих радионуклидов наиболее часто встречаемые значения Кн (137 Cs ~ 0,1; 90 Sr ~ 1,0) абсолютно не совпадают с вычисленными средними арифметическими значениями Кн (137 Cs ~ 2,2; 90 Sr ~ 2,4), что говорит о некорректности использования средних арифметических значений Кн при оценке такого рода систем.



Рисунок 2. Распределение значений Lg Кн радионуклидов ¹³⁷Cs (верхний) и ⁹⁰Sr (нижний)

Таким образом, выявлено, что в условиях лугового биогеоценоза накопление радионуклидов исследуемыми видами растений изменяется в широких пределах. Причем для ¹³⁷Cs эти различия еще более резко выражены, чем для ⁹⁰Sr. Причиной подобных изменений могут быть как физико-химические свойства луговых почв, так и режим их увлажнения [7, 15].

Возможность влияния некоторых физико-химических свойств луговых почв (механического состава (содержания частиц физической глины – фракции <0,01мм), гумуса и кислотности (pH)) на накопление радионуклидов исследуемыми видами растений была рассмотрена на примере растения пижмы (рисунок 3).

Из рисунка видно, что зависимость Кн как ¹³⁷Cs так и ⁹⁰Sr от гумуса и pH не наблюдается. Однако, график зависимости Кн ⁹⁰Sr от содержания в луго-

вых почвах частиц физической глины позволяет говорить о возможном наличии значимого влияния данного фактора на величину накопления пижмой радионуклида ⁹⁰Sr. Подобная ситуация в той или иной степени отмечается и для остальных двух видов растений (шиповника и волоснеца) (рисунок 4).

Зависимость накопления исследуемыми растениями (пижмой, шиповником, волоснецом) ¹³⁷Cs от содержания в луговых почвах частиц физической глины не наблюдается.



Рисунок 3. Зависимость Кн от некоторых физико-химических свойств луговых почв (для пижмы)



Рисунок 4. Зависимость Кн ⁹⁰Sr от содержания в луговых почвах частиц физической глины
Выводы

1. Выявлены параметры накопления радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr растениями (пижмой, шиповником, волоснецом) лугового биогеоценоза. Диапазон значений Кн ⁹⁰Sr составляет один порядок, ¹³⁷Cs достигает трех. 2. Средние значения Кн 90 Sr в отличие от 137 Cs смещены в сторону больших величин – в большей степени в растениях накапливается 90 Sr.

3. Зависимость Кн как ¹³⁷Сs так и ⁹⁰Sr от гумуса и pH не наблюдается. Отмечается возможное наличие значимого влияния содержания в луговых почвах частиц физической глины на величину накопления исследуемыми растениями радионуклида ⁹⁰Sr.

Литература

- 1. Сельскохозяйственная радиоэкология / под ред. академика ВАСХНИЛ Р.М. Алексахина и академика ВАСХНИЛ Н.А. Корнеева М.: 1991.- С.56-89.
- Куликов, И.В. Радиоэкология почвенно-растительного покрова / И.В.Куликов, И.В. Молчанова, Е.Н.Караваева // Свердловск: УрО Ан СССР, 1990. - С. 61-76.
- 3. Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного по НТП 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 1999 год: отчет о НИР /ИРБЭ НЯЦ РК; рук. выявление возможного влияния некоторых физико-химических свойств луговых почв на вариабельность коэффициентов накопления искусственных радионуклидов для определенных видов растений Ахметов М.А. – Курчатов, 1999. – 45с.
- Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного по НТП 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 2002 год: отчет о НИР /ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Птицкая Л.Д. – Курчатов, 2002.– 79 с.
- Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного по НТП 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 2003 год: отчет о НИР /ИРБЭ НЯЦ РК, рук. Птицкая Л.Д. – Курчатов, 2003.– 47с.
- 6. Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного по НТП 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 2005 год: информационный (Республиканская бюджетная программа 011) /ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Птицкая Л.Д. – Курчатов, 2005.– 77 с.
- 7. Анненков Б.Н. Основы сельскохозяйственной радиологии/ Б.Н. Анненков, Е.В. Юдинцева. Москва, 1991. С.56-83.
- Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного по НТП 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 2006 год: информационный (Республиканская бюджетная программа 011) /ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. – Курчатов, 2006. – 66 с.
- Отчет о научно-технической деятельности Института радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, выполненного в рамках мероприятия 0346 "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" за 2007 год: годовой /ИРБЭ НЯЦ РК; рук. Лукашенко С.Н. – Курчатов, 2007.– 107 с.
- Инструкция и методические указания по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. - М., 1989.
- Сборник методических указаний по лабораторным исследованиям почв и растительности Республики Казахстан / под рук. Дюсенбекова З.Д.; Государственный научно-производственный центр земельных ресурсов и землеустройства. – Алматы, 1998. – 222 с.
- ГОСТ 17.5.4.01–84. Метод определения pH водной вытяжки вскрышных и вмещающих пород. Охрана природы. Рекультивация земель. – Введ. 01.07.85. – Изд. Стандартов. – М, 1985.
- 13. МИ 5.06.001.98 РК «Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гаммаспектрометре МИ 2143-91» - 18 с.
- 14. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного бета-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс», Менделеево, 20 с.
- 15. Лысенко, Н. Ведение животноводства в условиях радиоактивного загрязнения среды / Н. Лысенко, А. Пастернак, Л. Рогожина. СПб: Лань, 2005. С. 35-36.

ЖАЙЫЛЫМДЫҚ БИОГЕЦЕНОЗДЫҢ ЖАСАНДЫ РАДИОНУКЛИДТЕРІНІҢ ЖИНАҚТАЛУЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Ларионова Н.В., Лукашенко С.Н., Кабдырақова А.М., Магашева Р.Ю., Паницкий А.В., Ястребкова Н.В., Байғазинов Ж.А.

ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан

Бұл мақалада минималды айырмашылығының әсер етуші макрофакторларды (климаттық жағдайлар, топырақ түрі, өсімдіктердің түрлік ерекшеліктері, радиациялық ластану сипаты) барысында жайылымдық биогеценоздың кейбір өсімдік түрлері үшін жасанды радонуклидтердің жинақталу коэффициентінің табиғи

вариацияларын бағалау бойынша зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Белгілі бір өсімдік түрлері үшін жасанды радионуклидтердің жинақталу коэффициентіне жайылымдық топырақтың кейбір физико-химиялық құрамдарының әсер етуі қарастырылды.

STUDY OF THE PARAMETERS OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDE ACCUMULATION BY PLANTS OF MEADOW BIOGEOCENOSIS

N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, A.M. Kabdyrakova, R.Yu. Magasheva, A.V. Panitskiy, N.V. Yastrebkova, Zh.A. Baigazinov

Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The results of researches on assessment of natural variations of artificial radionuclide accumulation coefficients for some species of meadow biogeocenosis plants with minimal differences of influencing macrofactors (climatic conditions, soil type, plant species features, and radiation contamination character) are presented in the article. The influence of some physicochemical properties of meadow soils on artificial radionuclide accumulation coefficients for specific species of plants was considered.

УДК 539.219.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ SS316IG В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

¹⁾Гордиенко Ю.Н., ¹⁾Барсуков Н.И., ¹⁾Кульсартов Т.В., ¹⁾Понкратов Ю.В., ²⁾Чихрай Е.В.

¹⁾Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан ²⁾Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Алматы, Казахстан

В данной статье приведены результаты моделирования диффузии дейтерия в нержавеющей стали аустенитного класса типа SS316IG (ITER Crade) в условиях реакторного излучения. Моделирование проводилось с использованием математических моделей диффузии примесных атомов в матрице металла при наличии дефектов-ловушек.

По результатам моделирования были сделаны следующие выводы: процесс проникновения изотопов водорода сквозь нержавеющую сталь в условиях реакторного излучения может быть хорошо описан только с помощью модели диффузии при наличии обратимой химической реакции 1-го порядка (модель Херста-Гауса). В статье приведены все полученные параметры модели.

В статье показано, что наблюдающийся эффект снижения потока и скорости проникновения дейтерия сквозь нержавеющую сталь SS316IG в условиях реакторного излучения, хорошо описывается в рамках модели диффузии в дефектных средах.

Введение

Одним из важнейших методологических аспектов современного материаловедения, в особенности связанного с созданием новых материалов для работы в критических условиях, является изучение процессов массопереноса веществ при внешних воздействиях. Исследование одной только роли водорода в процессах коррозии, охрупчивания и старения металлов в настоящее время заставляет исследователей осваивать новые подходы и методы, как экспериментов, так и анализа. Одним из наиболее мощных методов такого анализа экспериментальных данных за последние годы интенсивного развития вычислительной техники стало компьютерное моделирование внутренних процессов в металлах и сплавах в присутствии водорода и под различного рода внешними воздействиями (радиационном, температурном, химическом, механическом и т.п.).

В данной работе приведены результаты моделирования диффузии изотопа водорода (дейтерия) в нержавеющей стали аустенитного класса типа SS316IG (ITER Crade) в условиях реакторного излучения. Исследуемая нержавеющая сталь была специально разработана для вакуумной камеры ИТЕР.

В работах [1,2] по исследование влияния реакторного излучения на процессы взаимодействия изотопов водорода с нержавеющей сталью SS316IG был зафиксирован эффект влияния реакторного излучения, на процесс проникновения дейтерия сквозь нержавеющую сталь. Выявленный эффект заключался в снижении проникающих потоков изотопов водорода и замедление процесса проникновения дейтерия на температурах образца ниже 450 °C. Было сделано предположение, что полученный эффект связан с образованием дефектов-ловушек для водорода в металле обусловленных радиационно-стимулированной сегрегации неметаллических примесей на границы зерен, таких как фосфор и сера.

В данной работе это предположение было проанализировано с использованием математических моделей диффузии водорода в матрице металла при наличии дефектов-ловушек.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА

В работе рассматривается случай одномерной диффузии с постоянным коэффициентом диффузии. Рассматриваемые модели не учитывают скорость меж фазовых процессов. Считают, что скорости всех процессов на поверхности велики и самым медленным процессом является диффузия по объему.

В рамках классического механизма диффузии предполагается, что диффузионная среда не оказывает никакого влияния на диффузант, а просто служит системой координат, относительно которой рассматривается процесс диффузии. Основными уравнениями, описывающими классическую диффузию, являются уравнения Фика с граничными условиями первого рода (таблица 1).

Модели, учитывающие ловушки в матрице металла также представлены в таблице 1:

- Модель диффузии при наличии необратимой химической реакции 1-го порядка, которая встречается при диффузии с образованием гидридов, диффузии с постоянным захватом в неравновесных средах [3];
- Модель диффузии при наличии обратимой химической реакции 1-го порядка (модель Херста-Гауса) [4,5], в этом случае предполагается, что атом диффузанта, мигрирующий через вещество в ходе случайного блуждания, захватывается дефектом и затем, после неко-

торого среднего времени пребывания в нем, вновь выделяется в диффузионную зону. В модели Херста-Гауса предполагается, что емкость ловушки неограниченна, то есть занятая ловушка продолжает оставаться активной, или концентрация ловушек значительно превышает концентрацию диффузанта и поэтому не зависит от времени;

 Модель диффузии при наличии обратимой химической реакции 2-го порядка (модель Мак-Набба и Фостера[6]) учитывает ограниченную емкость ловушек и их уменьшение в ходе диффузии.

Классическая диффузия	Диффузия при наличии необратимой химической реакции 1-го порядка	Диффузия при наличии обратимой химической реакции 1-го порядка	Диффузия при наличии обратимой химической реакции 2-го порядка					
$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial C}{\partial x}$	$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - kC$	$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - k_1 + k_2 m \\ \frac{\partial m}{\partial t} = k_1 c - k_2 m \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - k_1 \left(1 - \frac{m}{m^*} \right) C + k_2 m, \\ \frac{\partial m}{\partial t} = k_1 \left(1 - \frac{m}{m^*} \right) C - k_2 m, \end{cases}$					
где <i>D</i> – коэффициент диффузии; <i>C</i> – концентрация газа в веществе; <i>S_H</i> – равновесной растворимости; <i>k1, k2</i> – константы скорости захвата и выделения водорода ловушкой, соответственно; <i>C, m</i> – концентрация атомов диффузанта в диффузионных путях и ловушках, соответственно; m* – концентрация ловушек								
$C\Big _{_{l=0}} = 0, 0 \le X \le l,$ $C\Big _{_{l\geq 0}} = S_H \sqrt{P_0}, X = 0$ $C\Big _{_{l\geq 0}} = 0, X = l$ – граничные условия первого рода								

Таблица 1. модели диффузии водорода в матрице металла при наличии дефектов-ловушек

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВОДОРОДА И ЕГО ИЗОТОПОВ В ПРОЦЕССЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

При решении данных моделей мы использовали метод конечных разностей [7].Сущность метода сводится к конечно-разностной аппроксимации производных, которая осуществляется в три этапа. Сначала в области решения вводят равномерную сетку «узловых точек» по всем переменным дифференцирования, соответствующую характеру задачи и граничным условиям. Затем производные дифференциальных уравнений представляют в конечно-разностной форме (аппроксимируют конечными разностями) и приводят уравнение к виду разностного уравнения, которое используется для описания функциональной связи между соседними узлами сетки. Разностные уравнения записывают для всех узлов сетки и в результате получают систему из N уравнений и N неизвестными, которая решается численными методами.

Аппроксимация производных конечными разностями

Разложение в ряд Тейлора функции двух независимых переменных C(x, t) позволяет представить основное уравнение в виде [8]

$$\frac{C(x_i, t_j + \tau) - C(x_i, t_j)}{\tau} =$$

$$= D(t_j) \frac{C(x_i + h, t_j) - 2, (x_i, t_j) + C(x_i - h, t_j)}{h^2}$$
(1)

Отсюда получается, что

$$C(x_{i},t_{j}+\tau) =$$

$$= \frac{\tau D(t_{j})}{h^{2}} C(x_{i}+h,t_{j}) - 2,,(x_{i},t_{j}) + C(x_{i}-h,t_{j}) + (2)$$

$$+C(x_{i},t_{j})$$

то есть, зная значения C(x, t) в точках *j*-го слоя по *t*, с помощью (11) можно вычислить значения C(x, t) в точках следующего слоя по времени. При этом используется три соседних узла.

Эта явная четырехточечная схема очень проста для расчета: используя значения C(x, t) при начальных и граничных условиях затем рассчитываются все узловые точки. Но довольно просто доказать, что такая легкость обманчива, так как при накоплении ошибок вычисления ведет к выходу из устойчивого счета. Для придания устойчивости необходимо накладывать жесткие ограничения на шаг т. Например при h = 0,1 должно быть $\tau \cong 1/600$ и для описания процесса диффузии за единичный промежуток времени потребуется 600 циклов по времени для всей сетки. Поэтому явные схемы практически не нашли применения, особенно для уравнений диффузии, где часты случаи зависимости параметров уравнений от времени, и требуется иметь соразмерные с *h* шаги по времени.

Поэтому чаще используется неявная сетка дифференцирования "назад" или неявная четырехточечная схема, для которой несложно получить:

$$C_{i,j} = C_{i,j+1} - \tau D_{j} \frac{C_{i+1,j+1} - 2 \cdot C_{i,j+1} + C_{i-1,j+1}}{h^{2}},$$
(3)

где $C(x_i+h,t_j+\tau) = C_{i+1,j+1}, \qquad C(x_i,t_j) = C_{i,j}$

Из (3) видно, что такую систему уравнений решить явным образом не удастся. Но зато видно, что матрица коэффициентов C такой системы имеет трехдиагональный вид, так как в каждое уравнение входят значения C_i в трех соседних точках (рисунок 1). Решение таких уравнений получают методом прогонки [7], который изложим ниже.



Рисунок 1. Неявная 4-х точечная конечно-разностная схема

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Используя метод конечных разностей и неявной трехточечной прогонки, была создана программа, позволяющая моделировать эксперименты по газопроницаемости водорода и его изотопов в металле по трем моделям: с ловушками неограниченной емкости (по Херсту-Гаусу), с ловушками ограниченной емкости (по Мак-Наббу и Фостеру) и по модели диффузии при наличии необратимой химической реакции 1-го порядка. Данная программа позволяет осуществлять моделирование по форме кинетической кривой с учетом реального проникающего потока и позволяет определить абсолютные значения параметров модели. Моделирование проводилось для следующих условий эксперимента:

• толщина образца мембраны 0,67 мм;

- давление дейтерия, подаваемое на входную сторону образца 500 Па;
- температура образца, для которых проводилось моделирование 350, 400°С;

Значения коэффициентов растворимости и диффузии в стали SS316IG определялись из дореакторных экспериментов с данной сталью [1]:

- коэффициент диффузии, M^2/c а) для температуры образца $350^{\circ}C - D0 = 1,3 \cdot 10^{-11};$
- b) для температуры образца $400^{\circ}\text{C} D0 = = 3,1\cdot10^{-11};$
- равновесная концентрация дейтерия на входной стороне образца, моль/(м³ · Па^{1/2})
 - с) для температуры образца $350^{\circ}\text{C} C_0 = 2,49 \cdot 10^{-5};$
 - d) для температуры образца $350^{\circ}\text{C} C_0 = 2,69 \cdot 10^{-11};$

На рисунке 2 представлены кинетические зависимости проникновения дейтерия сквозь образец стали SS316IG при температуре образца 400 и 350 °C полученные в реакторных и внереакторных экспериментах по проницаемости [1] Хорошо видно, что реакторное излучение заметно приводит к уменьшению потока дейтерия.

На рисунке 3 представлены результаты компьютерного моделирования диффузии дейтерия сквозь нержавеющую сталь SS316 IG.

Видно, что реакторная экспериментальная кривые проникновения, (причем для обеих температур образца) хорошо совпадают с кривой, полученной по модели Херста – Гауса.

В таблице приведены все рассчитанные параметры данной модели.



Рисунок 2. Кинетические зависимости проникновения дейтерия сквозь образец стали SS316IG, полученные в внереакторных и реакторных экспериментах

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ SS316IG В УСЛОВИЯХ РЕАКТОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ



Рисунок 3. Кинетические зависимости проникновения дейтерия сквозь образец стали SS316IG, полученные в реакторном эксперименте и в результате компьютерного моделирования

Температура образца	Шаг по времени	Шаг по толщине образца	Константа скорости захвата дейтерия ловушкой	Константа скорости высвобождения дейтерия из ловушки	Отношение константы скорости захвата к скорости высвобождения дейтерия из ловушки	Равновесная концентрация дейтерия в ловушке на входной поверхности образца	олистанты на зависещие	от температуры	Энергии активации захвата дейтерия ловушкой	Энергия активации высвобождения дейтерия из ловушки	Энергия связи в ловушке
<i>Т,</i> °С	t, C	h, м	k 1, <u>1</u> c	k₂, <u>1</u> <i>c</i>	$\frac{k_1}{k_2}$	М о, 	k 10, 1 c	k₂₀, <u>1</u> <i>c</i>	Е_{к1}, <u>кДж</u> моль	Е_{к2}, кДж моль	Δ Е , <u>кДж</u> моль
350 400	75,74 50 14	4,47·10 ⁻⁶ 4 47·10 ⁻⁶	6,4·10 ⁻⁵ 7.5·10 ⁻⁵	3,25·10 ⁻⁴ 4 29·10 ⁻⁴	0,197 0 175	7,85·10 ⁻⁶ 5 11·10 ⁻⁶	5,41·10 ⁻⁴	1,36·10 ⁻²	11,086	19,406	8,32

Таблица 2. Рассчитанные параметры модели Херста-Гауса

Заключение

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. С помощью разработанной программ по описанию процессов диффузии в дефектных средах, проведено моделирование проникновения изотопов водорода сквозь нержавеющую сталь SS316IG в условиях реакторного излучения. Были рассмотрены три модели:

- диффузия при наличии необратимой химической реакции 1-го порядка;
- диффузия при наличии обратимой химической реакции 2-го порядка (модели Мак-Набба и Фостера)
- диффузия при наличии обратимой химической реакции 1-го порядка (модель Херста-Гауса).

2. Было показано, что процесс проникновения изотопов водорода сквозь нержавеющую сталь в условиях реакторного излучения может быть хорошо описан только с помощью модели Херста – Гауса (модель диффузии при наличии обратимой химической реакции 1-го порядка)

3. Были получены все основные параметры модели Херста – Гауса:

- равновесная концентрация дейтерия на входной поверхности образца;
- равновесная концентрация дейтерия в ловушках на входной поверхности образца;
- констант скорости захвата дейтерия;
- констант скорости высвобождения дейтерия из ловушки;
- отношение константы скорости захвата и константы выделения водорода из ловушки;

 определены предэкспоненциальные множители и энергии активации соответствующих процессов (см. таблицу).

Таким образом, было подтверждено предположение о механизме наблюдаемого эффекта влияния реакторного излучения на процесс проникновения дейтерия сквозь нержавеющую сталь SS316 IG. Было показано, что наблюдающийся эффект снижения потока и скорости проникновения дейтерия сквозь нержавеющую сталь SS316 IG, хорошо описывается в рамках модели диффузии в дефектных средах.

Полученные в работе параметры модели могут быть использованы для описания диффузии изотопов водорода в стали SS316IG (ITER Crade) в условиях реакторного излучения, и могут быть применены для корректных оценок миграции трития в будущих ТЯЭУ.

Литература

- Кульсартов, Т.В. Исследование влияния реакторного излучения на процесс проникновения изотопов водорода сквозь нержавеющую сталь SS316IG / Т.В. Кульсартов и др. // «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами» (IHISM – 07): докл. 3 Междунар. конф., Санкт-Петербург, Россия, 02 июля – 7июля 2007. – Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2007. – С. 25–34.
- Гордиенко, Ю. Н. Исследование влияния реакторного излучения на процессы взаимодействия изотопов водорода (дейтерия) с нержавеющую сталь SS316IG / Ю.Н. Гордиенко и др.// Журнал Вестник НЯЦ РК. – 2007. – Вып.3. – С. 62
- Danckwerts, P. V. Adsorption and at the same time diffusion and chemical reactions in particles of different form and in falling drops / P. V., Danckwerts // Trans. Farad. Soc. - 1951. - Vol. 47. - P. 1014 - 1019.
- Herst D.G. Diffusion of fission gas: calculated diffusion from a sphere taking into account trapping and return from the traps / D.G Herst // CRRP -1124, Atomic Energy of Canada, Jtd Chald, River, Out, Nov – 1962.
- 5. Gaus H. den Einfeys von fallen auf die diffusion Z / H. Gaus H // Nuturforbeh. 1965. Vol. 20. P.1298 1308.
- Mc Nabb A., Foster K. A new analysis of the diffusion of hydrogen in iron and ferrite / A Nabb, K Foster. // Trans. of the metallic Soc. – 1963. – Vol. 227. – P. 618 – 627.
- 7. Самарский А.А. Разностные схемы газовой динамики / А.А. Самарский Ю.П. Попов. М.:Наука. 352 с.
- Тажибаева, И.Л. Численное моделирование диффузии газов в твердых телах при облучении / И.Л. Тажибаева, Е.В. Чихрай // методическое пособие для студентов-магистров. – Алматы, 1999.

РЕАКТОРЛЫ СӘУЛЕЛЕНДІРУ ЖАҒДАЙЫНДА SS316IG ТАТТАНБАЙТЫН БОЛАТТА СУТЕГІЛІК ИЗОТОП ДИФФУЗИЯСЫН ҮЛГІЛЕУ

¹⁾Гордиенко Ю.Н., ¹⁾Барсуков Н.И., ¹⁾Кульсартов Т.В., ¹⁾Понкратов Ю.В., ²⁾Чихрай Е.В.

¹⁾ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

²⁾ Теориялы және тәжірибелі физика ғылыми –зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

SS316IG (ITER Crade) типті реакторлық сәулелендіру жағдайында аустинит класті тоттанбайтын болатта сутегілік изотопта диффузияны үлгілеу нәтижелері осы мақалада келтірілген. Ақаулық-қамаулары бар кезінде металл матрицасында атом қоспалы дифузиясын бірнеше математикалық модельдерін пайдалануымен үлгілеу жүргізілді.

Улгілеу нәтижелері бойынша келесі қорытындысы жасалды: 1-реткі тұрақты химиялық реакциясы диффузия моделін көмегімен реакторлы сәулелендіру жағдайында ғана жақсы сипаттауы мүмкін тоттанбайтын болат арқылы сутегілік изотоптың кіріп кету процесі (Херста-Гауса моделі). Мақалада барлық есепке алынған параметрлары келтіріліді.

Ақау саласында диффузия модель рамкасында жақсы сипатталады, SS316 IG тотанбайтын болат арқылы дейтериге кіріп кету жылдамдығы және ағыны төмендеуі бақылау әсерінде көрсетілді.

HYDROGEN ISOTOPES' DIFFUSION SIMULATION IN SS316IG STAINLESS STEEL UNDER REACTOR RADIATION CONDITIONS

¹⁾Yu.N. Gordienko, ¹⁾N.I. Barsukov, ¹⁾T.V. Kulsartov, ¹⁾Yu.V. Poncratov, ²⁾E.V. Chihrai

¹⁾Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾Science-research institute of experimental and theoretic physics, Almaty, Kazakhstan

The paper presents outcomes of hydrogen isotopes' diffusion simulation in SS316IG stainless steel (ITER Crade) under reactor radiation. Simulation was curried out using mathematic models of diffusions of doped atoms in metal matrix with defects-traps.

As a result the following conclusions are made: process of hydrogen isotope penetration through the steel under reactor radiation condition can be fully described using reversible chemical reaction of the 1st order (Herst-Gaus model) only. The present paper includes all the calculated model parameters.

It was shown that observed effect of current and speed reducing of deuterium penetration through SS316 IG stainless steel is fully described within the diffusion model in defective mediums.

УДК 550.34:621.039.9

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОМПЛЕКСОМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В МЕСТАХ ПРОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ (ПЯВ) НА ПРИМЕРЕ БОЕВОЙ СКВАЖИНЫ 1207

Фролов З.Н., Ларина Т.Г., Дроздов А.В.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

На примере скважины 1207 участка Балапан, в которой в 1974 г. был произведен ядерный взрыв, рассмотрены поствзрывные деформации массива горных пород с использованием данных комплекса геофизических исследований.

Введение

Наибольшая часть подземных ядерных испытаний на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) проведена с 1965 г. по 1989 г. на самом крупном участке Балапан, в скважинах большого диаметра (до 960 мм), на глубине в основном 400-600м. Последствия поствзрывных деформаций, зафиксированные в массиве горных пород, оказались сопряженными как с эпицентральной зоной ПЯВ, так и с различными структурными границами (разрывными нарушениями, литологическими контактами и др.) и частично прослежены на дневной поверхности (вспучивание грунта, провальные понижения, трещины различной интенсивности и протяженности).

Изучение центральной зоны ПЯВ на скважинах проводилось в 1970 - 1980-х гг. в радиусе 0,3 - 5 км с применением комплексных геофизических работ, как правило, до и после взрыва. Одновременно использовались результаты геофизических исследований, выполненных в период 1964 - 1974 гг. Геофизические работы носили комплексный характер и включали различные методы электроразведки (ВЭЗ, электропрофилирование), сейсморазведку (МПВ, КМПВ), магниторазведку, радиометрию. В данной работе объектом исследования выбрана скважина 1207, на которой ядерный взрыв был проведен в 1974 году, а провальная воронка образовалась в 90-е годы.

Описание участка Балапан

Геологическое строение площадки Балапан определяется ее положением в юго-западном борту обширного Жарма-Саурского геотектоногена, сформированного в герцинскую эпоху и представленного преимущественно каменноугольными отложениями (рисунок 1).

В южной части площадки прослеживается фрагмент глубинного Калба-Чингизского разлома, по которому Жарма-Саурский геотектоноген граничит с Чингиз-Тарбагатайским геотектоногеном антиклинорного типа с преимущественным развитием образований майданской свиты среднего кембрия. В центральной части площадки прослеживается глубинный Чинрауский разлом, разграничивающий нижнекаменноугольные и среднекаменноугольные отложения. В грабене между северной и южной ветвями этого разлома расположена мезозойская мульда, выполненная юрскими угленосными отложениями. Боевая скважина 1207 расположена в центральной части площадки Балапан. В геологическом строении принимают участие отложения четвертичного возраста, глины аральской свиты и терригенные образования юрского периода.

Рельеф равнинный. Во время взрыва образовалась воронка глубиной 10 м и диаметром около 150 м. В 90-е годы над эпицентром ПЯВ произошли дальнейшие провальные явления, образовалась воронка, размеры ее увеличились до 30м по вертикали и 200м по латерали. Современная панорама воронки представлена на рисунке 2.

Современная изученность скважины 1207

В 2007 г. в рамках бюджетнй программы в районе скважины 1207 были проведены геолого-геофизические исследования, которые включали в себя ниже перечисленный комплекс геофизических методов.

Метод рефрагированных волн (МРВ)

Сейсморазведочные работы методом преломленных волн проведены по крестовым профилям длиной 1400м, пересекающимся на пикете 700, совпадающем с устьем скважины 1207. По техногенным причинам ПР2 отрабатывался только с пикета 300, кроме того, в приустьевой части скважины точки регистрации сейсмических волн на интервале 250м располагались по бортам воронки, диаметром около 200м.



1, 2, 3 - верхняя, средняя, нижняя юра. Конгломераты, песчаники, алевролиты с прослоями и линзами углей; 4 - верхний триас. Конгломераты, песчаники, алевролиты; 5 - верхняя пермь-нижний триас. Песчаники, алевролиты; 6,7 - средний карбон. Средняя и нижняя подсвита буконьской свиты. Конгломераты, песчаники, углистые алевролиты, туфы основного и среднего состава; 8 - нижний карбон. Серпуховский ярус.; 9 - нижний карбон. арденского Конгломераты, Средний верхний подъярусы яруса. Аркалыкская свита. песчаники. известняки: 10 - нижний карбон. Нижний подъярус арденского яруса. Коконьская свита. Конгломераты, песчаники, алевролиты, известняки, туфопесчаники, туфы основного и среднего состава; 11 - средний кембрий. 12 - верхнекаменоугольные граниты; 13 - нижнекаменоугольные габбродиориты; 14 - нижнекаменоугольные гранодиориты; 15 - нижнекаменоугольные диориты; 16 верхнесилурийские _ гранодиориты; 17 - боевые скважины; 18 - гидрогеологические скважины; 19 - линзы и прослои угля; 20 - дайки среднего состава нижнекаменоугольного возраста; 21 - зоны рассланцевания; 22 - региональные разломы; 23 - второстепенные разломы

Рисунок 1. Участок Балапан. Схематическая геологическая карта со снятым чехлом кайнозойских отложений



Рисунок 2. Панорама провальной воронки, образовавшейся в устье скважины 1207, вид с юго-запада, 2005 г.

Возбуждение упругих колебаний осуществлялось невзрывным источником («падающий груз» с освобождаемой энергией порядка 12 кДж). Прием упругих колебаний по каждой линии возбуждения осуществлялся линейной расстановкой 48 вертикальных сейсмоприемников типа DF-8 с шагом 10 метров, регистрация проводилась цифровой сейсмостанцией. Описание сейсмогеологического разреза составлено на основании скоростной характеристики градиента рефрагированных волн представленной на рисунке 3.

Выделенные по разрезам профилей зоны повышенных скоростей в плане укладываются в вытянутые параллельные структуры северо-западного – юго-восточного простирания, последние ограничиваются тектоническими нарушениями с таким же направлением.

Отличительной особенностью обоих разрезов является аномалия пониженных по значениям и сдвинутых по вертикали вниз изолиний градиента скорости в районе устья скважины, что вызвано столбом обрушения горных пород до глубин заложения заряда. По сдвигу изолиний амплитуда смещения составляет около 30м.



Рисунок 3. Скоростная модель разреза через скважину 1207

Метод дифрагированно-рассеянных волн (МДРВ)

Для сейсмического зондирования методом дифрагированно-рассеянных волн (МДРВ) была применена ортогональная, центросимметричная, относительно устья скважины система наблюдений, состоящая из четырех сегментов, каждый из которых составляет пару: линия приема - линия возбуждения. Возбуждение и прием упругих колебаний осуществлялись по системе непродольных профилей с расстоянием между пунктами возбуждения (ПВ) 20 м и пунктами приема (ПП) – 10 м, расположенным вдоль линии длиной 460 м. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось невзрывным источником («падающий груз» с освобождаемой энергией порядка 12 кДж). Прием упругих колебаний по каждой линии возбуждения осуществлялся линейной расстановкой 48 вертикальных сейсмоприемников типа DF-8 с шагом 10 метров, регистрация - цифровой сейсмостанцией с накоплением воздействий, с шагом квантования сигнала 1 мс и длиной записи 1,3 с. В результате фокусирующего преобразования данных МДРВ построены вертикальные разрезы уровня энергии рассеянных волн в ортогональных плоскостях (рисунок 4).

По мере удаления от гипоцентра ПЯВ наблюдается и снижение уровня энергии рассеянных волн. По повышенным значениям ЭРВ (30000-45000 усл.ед.) определены, с вероятностью не хуже 0.67, границы области повышенной трещиноватости. Характерной особенностью конфигурации области повышенной трещиноватости, является ее простирание по латерали в юго-восточном направлении на расстояние до 500 метров, а по вертикали – до 300 метров от гипоцентра ПЯВ. Последнее обстоятельство, учитывая сопряженность этой области с полостью ПЯВ и прилегающей к ней зоной максимальной трещиноватости, свидетельствует о наличии в районе обследуемой площадки ПЯВ потенциальных каналов миграции радионуклидов в окружающее пространство, в том числе и в трещинно-поровые воды.



1 - внешний контур механического воздействия ПЯВ на геологическую среду, 2 - зона максимальной трещиноватости и дробления в районе гипоцентра ПЯВ, 3 - зоны повышенной трещиноватости, определяющие возможные пути миграции радионуклидов из полости, 4 - изолинии энергии рассеянных (дифрагированных) волн в усл. ед.

Рисунок 4. Участок Балапан. Вертикальные разрезы поля ЭРВ по профилям СЗ-ЮВ и ЮЗ-СВ в районе скважины 1207 с элементами интерпретации

Зондирование становления поля в ближней зоне (ЗСБ)

Наблюдения проводились по одному профилю ориентированному по направлению З-В, с пересечением устья скважины. Длина профиля 1,2 км. Размер измерительной установки (петля) 200×200 м. Шаг перемещения петли по профилю 100 метров со сгушением наблюдений от пикета 500 до пикета 700 до 50 м. Работы проведены в соответствии с требованиями инструкции по электроразведке. Использована цифровая электроразведочная станция «Цикл-6» (СНИИГГиМС, Россия) управление станцией осуществлялось PC «notebook», При зондировании совмещенной петлей кажущееся сопротивление вычисляется в программе «Подбор», разработчик СНИИГГиМС. Погрешность измерений оценивалась после проведения измерений на тестовой модели с заданной проводимостью, и полученные результаты сравнивались с теоретически рассчитанными. Расхождение в данном случае не превышало 2 %. Расхождение значений не превышало 2 %, что соответствует требованиям.

По опыту работ на площадке Балапан, в электромагнитном поле хорошо отображается любое разуплотнение горных пород в местах проведения ПЯВ. На основании чего можно утверждать, что изменения кажущейся продольной проводимости, в разрезе по латерали значений вмещающих пород прилегающих к эпицентру взрыва и уменьшение величины значений продольной проводимости в области ПЯВ вызваны нарушением целостности массива горных пород (рисунок 5).



зона наибольшего разрушения горных пород, 2 - конус обрушения, 3 - график магнитного поля Рисунок 5. Геоэлектрические разрезы а) кажущегося сопротивления, б) кажущейся продольной проводимости с элементами интерпретации

И чем сильнее эти разрушения, тем более контрастно проявляются они на геоэлектрических разрезах, не вызывая сомнений в природе их происхождения, пример тому скважина 1207.

В целом на участке Балапан угол залегания осадочных горных пород составляет 55°, поэтому в местах, где геоэлектрические поля искажаются интрузивными внедрениями или присутствием пород содержащих углистые включения, направление изолиний равных значений продольной проводимости полностью отражает характер залегания горных пород. Поствзрывные же нарушения характеризуются невыдержанным направлением простирания, что создает на геоэлектрических разрезах как бы увеличение областей одинаковых значений измеряемого параметра в одном месте, приуроченном к глубине проведения ПЯВ.

Магниторазведка

Сеть наблюдений на площадке 1×1км, составила 100×20 метров. Профили ориентированы с юга на

север, нумерация профилей с запада на восток. Наблюдения проводились протонными магнитометрами ММ-61, имеющими встроенную память, и выход для сброса накопленной информации на ЭВМ. Маршруты осуществлялись одним оператором от нулевых пикетов и по обратному курсу. Наблюденное поле уравнивалось поправками за вариацию. В геомагнитном поле на плане, зона дезинтеграции горных пород отображается в виде расположенных рядом положительной и отрицательной составляющей (рисунок 6). Где положительная составляющая поля находится с южной стороны, а отрицательная составляющая с северной стороны. Это связано с намагничиванием вертикального диполя, которым является обсадная колонна скважины. На примере в случае со скважиной 1207 образующим аномалию объектом является столб проседания, в котором площадь аномалии прямо пропорциональна диаметру столба проседания на дневной поверхности.



изопохиды модуля полного вектора магнитного поля Земли,
 скважина, 3 – проекция на дневную поверхность зоны разрушения в эпицентральной области по материалам электроразведки

Рисунок 6. Карта модуля вектора магнитной индукции Земли в районе скважины 1207



Рисунок 7. График магнитного поля через скважину 1207

Выше приведенная информация хорошо прослеживается на графике магнитного поля пройденного через скважину 1207 (рисунок 7).

На графике хорошо прослеживается аномалия образуемая, как обсадной колонной скважины, так и аномалия, образуемая столбом обрушения и состоящая из положительной части поля с южной стороны скважины и отрицательной составляющей с северной стороны скважины.

СЕЙСМО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПО СКВАЖИНЕ 1207

Основанием для составления сейсмо-геологической модели служат материалы работ проведенных институтом геофизических исследований на этом участке. Для сравнения результатов привлечен геолого-геофизический разрез полученный по материалам обработки гидрогеологической экспедиции 16 района ПГО «Гидроспецгеология» в 1974 году (рисунок 8). Современные материалы позволяют проследить изменения, произошедшие в районе исследуемой скважины. И сделать выводы о динамике происходящих процессов в зоне конуса обрушения.

Современные материалы с помощью программы «Firstomo» позволили уточнить наклон границы присутствующего в разрезе интрузивного комплекса и уточнить положение в пространстве тектонических нарушений. Позволили выявить тектонические образования возникшие в результате ПЯВ в период релаксации горных пород и формирования современного столба обрушения. Материалы 1974 года не вполне корректно отражают геологическое строение участка во вмещающих породах после проведения ПЯВ. Это выражено в построении рельефа юрских отложений, где за глинистые образования были приняты сильно разрушенные в эпицентре взрыва породы юрского комплекса (песчаники, конгломераты).

В результате чего возникло несоответствие в положении третьей преломляющей границы породам изучаемого комплекса (рисунок 9).

Материалы последних лет изучения благодаря применению современных обрабатывающих программ позволили избежать подобных ошибок, что указывает на качество обработанных данных.

Проведенное техническое нивелирование по профилям по которым проводилось геофизическое изучение разреза, показывает что за прошедшее время произошли изменения в рельефе дневной поверхности (из-за невозможности провести нивелирование через нижнюю точку воронки вследствие ее затопления водой) показало понижение дна воронки на 2 метра и увеличение диаметра воронки со 150 метров до 200 метров в диаметре. Границы конуса обрушения проявляются на дневной поверхности границами провальной воронки, что подтверждается материалами проведенных геофизических исследований.



Рисунок 8. Геолого-геофизический разрез по материалам 1974 г, скважина 1207



Рисунок 9. Сейсмо-геологический разрез по материалам 2007 г, скважина 1207

Выводы

Применение различных методик изучения позволяет рассматривать исследуемые объекты в различных геофизических полях, что повышает достоверность изучения объектов. Так по результатам интерпретации геофизических данных можно сделать следующие выводы:

• На дневной поверхности по данным нивелировки произошли изменения рельефа, выраженные в изменении геометрии провальной воронки. По латерали первоначальный размер провальной воронки составлял 150 метров, в настоящее время размер воронки увеличился до 200 метров. Глубина воронки после проведения ПЯВ составляла 10 метров, по современным материалам глубина увеличилась примерно до 13 метров.

• Анализ данных сейсморазведки методом MPB показал, что по III-ей преломляющей границе изменение по кровле коренных пород составило 25-30%; разница залегания III-ей границы (ΔH) между мате-

риалами прошлых лет и современными составило 30-40м; в плане, эти изменения проходят по кровле не нарушенного фундамента в области столба обрушения радиусом 250-300м.

• Изменения в зоне конуса обрушения по данным электроразведки, МДРВ и магниторазведки были зарегистрированы в изучаемых полях, что позволило определить размеры зоны деструкции горных пород. Полученные результаты позволяют предположить расширение диаметра конуса обрушения до размеров зоны деструкции.

По материалам проведенных исследований можно предположить, что по прошествии 34 лет после проведения ПЯВ техногенные изменения в массиве горных пород все еще продолжаются.

Литература

- 1. Сейсморазведка малых глубин. М.: Недра, 1989.
- 2. Инструкция по сейсморазведке. М.: Недра, 1986.
- 3. Инструкция по электроразведке. М: Недра, 1984.
- 4. Инструкция по магниторазведке. М: Недра, 1987.
- 5. Шпаковский, В.И. Изучение размеров и физических параметров зоны откольных явлений на объекте 1207 / В.И. Шпаковский // Отчет партии 27. 1974.
- 6. Обеспечение радиационной безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона. Республиканская программа 011 Задание 05(09) Организация и проведение полевых исследований по уточнению состояния боевых скважин площадки Балапан. Камеральные работы / Отчет о НИР (промежуточ.) // Институт геофизических исследований (ИГИ); рук. Н.Н. Беляшова. Курчатов, 2006. 87 с.

ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР (ЖЯЖ) ӨТКІЗІЛГЕН ОРЫНДАРДАҒЫ ТЕХНОГЕНДІ ӨЗГЕРІСТЕРДІ 1207 ӘСКЕРИ ҰҢҒЫМАСЫ МЫСАЛЫНДА ГЕОФИЗИКАЛЫҚ ӘДІСТЕР КЕШЕНІМЕН ЗЕРДЕЛЕУ

Фролов З.Н., Ларина Т.Г., Дроздов А.В.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

1974 ж. ядролық жарылысы жүргізілген Балапан учаскесінің 1207 ұңғымасы үлгісінде, геофизикалық зерттеулер кешенінің деректері негізінде таужыныстар массивінің жарылыстан кейінгі деформациялары қаралған.

INVESTIGATION OF TECHNOGENIC CHANGES AT UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS (UNE) LOCATIONS BY SET OF GEOPHYSICAL METHODS WITH THE EXAMPLE OF EMPLACEMENT BOREHOLE 1207

Z.N. Frolov, T.G. Larina, A.V. Drozdov

Institute of Geophysical Researches NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Post explosive deformation of the rock based on geophysical investigation set has been considered by an example of borehole 1207 at Balapan Site, which was exploded in 1974.

УДК: 504.3.054:577.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОТОКА ШТОЛЬНИ №176 ПЛОЩАДКИ «ДЕГЕЛЕН»

Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Умаров М.А., Айдарханов А.О.

Институт радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Разработаны основы методологии исследования концентрации трития в атмосферном воздухе. Проведена оценка концентрации трития в почвенном и штольневом воздухе. Проведена комплексная оценка уровня и характера распределения трития в атмосферном воздухе экосистемы водотока штольни 176.

Введение

Проблема распространения трития в окружающей среде в настоящий момент является одной из малоизученных. Тритий - радиоактивный изотоп водорода, входит в состав воды и атмосферного воздуха. В результате чего, за счет ингаляции и по пищевым цепочкам поступает в организм человека и животных [1].

До недавнего времени исследования концентрации трития в объектах окружающей среды, в том числе и атмосферного воздуха, носили разрозненный несистематический характер. Оценка характера радионуклидного загрязнения тритием экосистем расположенных на территории СИП имеет большое научное и практическое значение. Семипалатинский испытательный полигон (СИП) является уникальной природной лабораторией для изучения радиоактивного загрязнения земной поверхности, с целью прогнозирования последствий возможных радиационных аварий

Краткое описание участка исследования

Для проведения корректной оценки концентрации трития в атмосферном воздухе необходима была разработка комплексной методологии, которая учитывала бы основные особенности распространения трития в атмосфере и пути его поступления. Для разработки и последующей отработки основ методологии в качестве модели эксперимента была выбрана экосистема водотока, вытекающего из штольни № 176, расположенного в правом притоке долины ручья Байтлес, южной части горного массива Дегелен. Данный участок был выбран не случайно, с учетом наличия ландшафтных особенностей, отвечающих условиям эксперимента:

- наличие воды (ручей);
- наличие участков с растительностью, на удаленном расстоянии от воды;
- скалистых участков где отсутствуют как вода, так и растительность;

Так же на данном участке, поперек штольневого ручья, во время проведения предыдущих экспериментов, была установлена дамба, которая послужила причиной образования большого скопления воды запруды. Место образования запруды так же представляло интерес в рамках проведения данного исследования.

В рамках экспериментального изучения характера распределения ³Н в атмосферном воздухе были поставлены следующие задачи:

- Разработка методологии исследования концентрации ³Н в атмосферном воздухе, включая оценку динамики изменения концентрации ³Н в атмосферном воздухе, оценку поступления ³Н в атмосферный воздух с поверхности почвы и оценку поступления ³Н в атмосферный воздух, выходящий из котловой полости штольни.
- Исследование уровня загрязнения ³Н атмосферного воздуха экосистемы штольни № 176, включающее в себя оценку концентрации ³Н в атмосферном воздухе в стационарных точках по четырем профилям, охватывающим всю территорию приустьевой площадки штольни № 176.

Для решения поставленных задач были выбраны точки отбора проб атмосферного и почвенного воздуха. Расположение точек представлено на рисунке (рисунок 1).



Рисунок 1. Схема расположения точек мониторинга концентрации трития в районе штольни № 176

Разработка методологии исследования концентрации ³Н в атмосферном воздухе

Учитывая высокую мобильность тритированной воды в окружающей среде, необходимо уделять особое внимание исследованию содержания трития в атмосфере СИП. Для получения корректных результатов в ходе проведения систематических исследований содержания трития в атмосферном воздухе на различных участках СИП, необходимо было выработать основы методологии исследования, которая включала бы в себя основные принципы и методы, используемые при исследовании концентрации трития в атмосферном воздухе, и позволяла бы учитывать все основные факторы, влияющие на характер распределения трития в окружающей среде.

Разработка методологии включала в себя два этапа – это проведение оценки динамики концентрации трития в атмосферном воздухе и оценка уровня концентрации трития поступающего в атмосферу с почвенным и штольневым воздухом.

Методика отбора проб атмосферного воздуха. Для проведения исследования был произведен отбор проб воздуха методом криогенного вымораживания. В основу методики отбора проб положена способность водяных паров, содержащихся в воздухе, конденсироваться на поверхности пластин радиатора, охлаждаемой жидким азотом до температуры ниже точки росы. Так как температура пластин радиатора, гораздо ниже 0°С, то контакт водяных паров с поверхностью пластин завершается кристаллизацией. После окончания процесса вымораживания достаточного количества водяных паров, радиатор с хладоводом извлекают из сосуда Дьюара и помещают для оттаивания в чашку Петри. Пробу объемом не менее 5 мл после оттаивания переносят во флакон, герметизируют и транспортируют для определения содержания трития [2].

Методика измерения. Определение концентрации трития в пробах водяных паров атмосферного воздуха проводили методом жидкосцинтиляционной спектрометрии. Каждую пробу предварительно отфильтровывали, отбирали по 5 мл и помещали в пластиковые виалы, предназначенные для проведения жидкосцинтилляционных измерений, добавляя 15 мл сцинтиллятора, тщательно перемешивали и проводили измерения на спектрометре TRI CARB 2900 TR фирмы Canberra-Packard [3,4].

Оценка динамики концентрации трития в атмосферном воздухе

Для проведения оценки динамики концентрации трития в атмосферном воздухе было выбрано три участка исследования. Первый участок был расположен на дамбе штольневого ручья, как наиболее близко расположен к основному источнику поступления трития в атмосферу – воде. Второй участок был расположен на удаленном расстоянии порядка 65-70 м от водного источника, в пойме ручья, и третий участок был расположен на возвышенности в скалистой местности (рисунок 1 - суточные пробы атмосферного воздуха). На каждом участке дважды был проведен круглосуточный отбор проб водяных паров атмосферного воздуха. Время между проведением первого и второго этапа каждого эксперимента составляло 3-е суток. В течении суток пробы отбирались с интервалом в 2 часа. На отбор одной пробы затрачивалось время от 30 мин до 2 ч, в зависимости от расположения точки исследования и метеорологических факторов.

Результаты эксперимента. Первый эксперимент был проведен на дамбе ручья. По результатам эксперимента построен график, отображенный на рисунке (рисунок 2).



Рисунок 2. Динамика изменения концентрации трития на участке №1

Анализ результатов эксперимента, проведенного на первом участке, у воды, показал, что максимальная концентрация трития составляет порядка 250 Бк/м³, что указывает на то, что вода является весьма значимым источником поступления трития в атмосферу. Надо отметить, что концентрация трития в вымороженной воде составляет порядка 200 кБк/л, а в воде ручья в данной точке - порядка 300кБк/л.

Второй эксперимент был проведен в точке удаленной от ручья на расстояние порядка 65-70 м. Результаты представлены на рисунке (рисунок 3).



Рисунок 3. Динамика изменения концентрации трития на участке №2

Эксперимент показал, что в атмосферном воздухе, в точке удаленной от воды, так же отмечена существенная концентрация трития. Максимальная концентрация трития на данном участке достигает порядка 300 – 320 Бк/м³ Картина динамики распределения концентрации трития в атмосфере схожа с картиной, полученной на первом участке.

Анализ результатов эксперимента, проведенного на третьем участке, показал, что концентрация трития здесь очень мала по сравнению с первыми двумя участками исследования и находится в пределах 2-7 Бк/м³ (рисунок 4)

Вероятно, это связано с удаленностью выбранной точки от основного источника загрязнения – штольневого ручья. Однако, учитывая, что концентрация ³Н в окружающем воздухе при нормальных условиях составляет порядка 1 Бк/м³, концентрация ³Н в атмосферном воздухе на участке № 3 превышает это значение в несколько раз. Это может говорить о том, что к местам, удаленным от основных источников поступления, ³Н мигрирует другими путями, которые предстоит выяснить в дальнейших экспериментах. Результаты исследования в третьей точке показали картину распределения трития отличную от первых двух точек. Зависимости концентрации трития от времени суток или от температуры в данной точке несколько иная, нечеткая. Вероятнее всего, причиной подобного распределения концентрации трития в течение суток, явилось удаленность точки от возможных источников поступления - точка удалена от ручья, находится в скалистой местности, растительность отсутствует. Так же, нужно отметить то факт, что при отборе проб в данной точке присутствовал порывистый ветер с завихрениями, скорость ветра достигала более 2 м/с, что не могло не повлиять на распределение трития в атмосфере.



Рисунок 4. Динамика изменения концентрации трития на участке №3

Рассмотрим, в общем, динамику изменения концентрации трития на всех трех исследовательских участках – по усредненным значениям (рисунок 5).



Рисунок 5. Динамика изменения концентрации трития на трех экспериментальных участках

На первых двух участках исследования выявилась схожая картина динамики концентрации трития в течении суток - четкая суточная изменчивость основной поступление трития в атмосферу происходит в дневное время суток в промежуток времени с 10 утра до 18 часов вечера. Средняя скорость ветра в обоих случаях составляла 1,1 м/с – 1,2 м/с. Концентрация трития в воздухе обеих точек достигает порядка 300 Бк/м³. Но если в первой точке подобная картина была предсказуема, ввиду того, что в результате испарения влаги с поверхности воды происходит перераспределение трития в атмосферу и как раз в дневные часы, когда температура воздуха максимальна. То во второй точке получение подобных значений концентрации трития было неожиданно - точка значительно удалена от воды, а концентрация трития, тем не менее, остается достаточно высокой. В то время как на третьем участке, где отсутствует как вода, так и растительность подобного явления обнаружено не было.

При анализе результатов было сделано следующее предположение – так как втором участке исследования произрастает большое количество растительности, то именно растительность, по всей видимости, и является проводником и источником поступления трития в атмосферу, вследствие поглощения трития из почвенной влаги и последующей транспирации. Вероятно, данное распределение трития в подобном случае связано с жизненным циклом растений и максимум приходится на дневные часы, когда растения активно «дышат».

Для проверки и подтверждения данного предположения был проведен эксперимент по исследованию концентрации трития в растениях (рисунок 6).



Рисунок 6. Динамика изменения концентрации трития в растениях

При исследовании концентрации трития в свободной воде различных видов растений, отобранных вдоль русла штольневого ручья, были получены существенные значения. Концентрация трития в некоторых видах растений (вейник тростниковидный) достигала порядка 80000 Бк/л (в пересчете на кг сухой массы - порядка 2,2·10⁵ Бк/кг). Концентрация трития (значение ПДК) для тритированной воды по НРБ-99 составляет 7700 Бк/кг [5].

Данное исследование позволило нам сделать выводы о наличии двух основных значительных механизмов поступления трития в атмосферный воздух – это вода и растительность. Но так как на третьем участке так же было зарегистрировано наличие трития, был проведен еще ряд экспериментов для выявления дополнительных механизмов поступления трития в атмосферу.

Оценка концентрации трития в штольневом и почвенном воздухе

Для оценки концентрация трития в штольневом воздухе был произведен отбор проб воздуха в месте расположения портала штольни. Для исследования концентрации трития в почвенном воздухе были выбраны несколько точек по руслу ручья. В обоих случаях одновременно, в тех же точках, был произведен отбор проб атмосферного воздуха для возможности оценки вклада поступления трития в атмосферу со штольневым и почвенным воздухом. Результаты эксперимента представлены на рисунке (рисунок 7).



Рисунок 7. Исследование концентрации трития в почвенном и штольневом воздухе

Метод отбора проб почвенного воздуха отличается от отбора проб атмосферного воздуха, тем, что в данном случае пробоотборник накрывается изолирующей емкостью, которая несколько заглубляется в почву и затем производиться откачка атмосферного воздуха из данной емкости.

Анализ полученных данных показал незначительное поступление трития в месте расположения штольни. Концентрация трития в штольневом воздухе находится в пределах 20 Бк/м³. Таким образом, при данных условиях эксперимента, штольневый воздух не является значимым источником поступления трития в атмосферу и при проведении комплексного исследования экосистемы штольни может не учитываться.

Исследование концентрации трития в почвенном воздухе, напротив, показало возможность поступления трития с почвенной влагой в атмосферу. Значения концентрации трития в почвенной влаге находятся в диапазоне от 60 Бк/м³ до 120 Бк/м³. Подобная картина, вероятно, возникает из-за перераспределения трития из подземных вод в атмосферу [6]. При этом количество трития, поступающего в атмосферу, будет зависеть от метеорологических условий (влажности, температуры окружающей среды), а так же от глубины залегания подземных вод. Полученные значения соизмеримы со значениями концентрации трития в атмосферном воздухе, из чего следует, что почвенный воздух является значимым источником поступления трития в атмосферу, что необходимо учитывать при проведении исследований подобного рода.

ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ И ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИТИЯ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ЭКОСИСТЕМЫ ШТОЛЬНИ № 176

На основе полученных знаний о характере распределения трития на исследуемой территории была проведена оценка загрязнения тритием атмосферного воздуха экосистемы штольни 176.

Было выбрано четыре профиля исследования, охватывающие территорию от портала штольни и до конца исследуемого участка. Профиль № 1 расположен вдоль русла ручья штольни № 176, второй профиль расположен параллельно первому профилю справа на расстоянии порядка 50 м. Профиль № 3 начинается в стороне от ручья, по руслу небольшого притока, берущего начало от родника, и по мере своей протяженности постепенно приближается к ручью. Профиль № 4 был выбран на возвышенности, в скалистой местности, слева от ручья, на расстоянии порядка 70 м. Расстояние между точками отбора проб вдоль профилей составляло порядка 35 м. В каждой точке был произведен отбор проб атмосферного воздуха для исследования концентрации трития. Карта-схема распределения трития в атмосферном воздухе экосистемы штольни № 176 представлена на рисунке (рисунок 8).



Рисунок 8. Карта-схема распределения трития в атмосферном воздухе экосистемы ит. № 176

Проведенное исследование показало, что максимальная концентрация трития приходится на участок ручья, в месте расположения дамбы, по профилю 1. Вероятнее всего это связано с большим скоплением воды и как следствие, наиболее интенсивным перераспределением трития с водяными парами с поверхности воды в атмосферу. Значения концентрации трития по данному профилю изменяются в пределах от 150 Бк/м³ до 1000 Бк/м³. По профилю 2, который расположен левее ручья, максимальная концентрация трития составляет уже порядка 70 Бк/м³. Полученные значения более чем на порядок отличаются от данных полученных при исследовании первого профиля.

При исследовании атмосферного воздуха по третьему профилю, расположенному левее русла ручья, на скалистых участках, были выявлены совсем незначительные концентрации трития. Максимальная концентрация трития здесь составляет порядка 2 Бк/м³. Столь малые значения концентрации трития на данном профиле связаны как с наибольшей удаленностью от основного источника загрязнения воды, так и с отсутствием растительности в точках мониторинга.

При исследовании атмосферного воздуха по профилю 4, расположенному на значительном расстоянии от штольни и штольневого ручья, были выявлены участки с концентрацией трития порядка 200 Бк/м³. Необходимо отметить, что на протяжении данного профиля местами присутствует вода, а так же практически на протяжении всего профиля - присутствует обильная растительность, которая дает свой вклад в концентрацию трития в атмосферном воздухе. Так как третий профиль берет свое начало от родника, справедливым будет предположение о близком расположении грунтовых вод к дневной поверхности. Следовательно, в данном случае необходимо учитывать поступление трития в атмосферу с почвенным воздухом.

Анализ распределения трития по мере удаления точек исследования от источника загрязнения представлен на рисунке (рисунок 9).



Рисунок 9. Изменение концентрации трития по мере удаления от источника загрязнения

Данный рисунок наглядно показывает, что концентрация трития с расстоянием уменьшается экспоненциально и на расстоянии порядка 50 метров снижается практически на порядок.

Необходимо еще раз отметить – на большей части территории отсутствует открытый водный источник, в то время как тритий присутствует практически по всему участку исследования.

Заключение

Таким образом, по результатам данной работы, зная приблизительный характер распространения трития и имея данные по его содержанию в воде на каком-либо выбранном участке исследования, мы можем сделать приблизительный оценочный прогноз загрязнения тритием атмосферного воздуха на данном участке. Понятно, что на данном этапе, мы не сможем дать точную оценку. Но предварительную картину ожидаемого загрязнения получить вполне возможно.



🔴 - well

- points of sampling

Рисунок 10. Прогнозирование тритиевого загрязнения атмосферного воздуха

На данном рисунке (рисунок 10) представлен горный массив Дегелен и отмечены точки исследования тритиевого загрязнения атмосферного воздуха. Раньше, предполагая, что основным значимым источником поступления трития в атмосферу является вода,

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Тритий-это опасно / Под. ред. В. А. Батурина // Челябинск, 2001
- Методические рекомендации по определению радиоактивного загрязнения водных объектов. М.: Гидрометиздат, 1986.
 ISO 9698 (Е) Качество воды Определение активности трития, соответствующей данной концентрации жидкостной
- метод сцинтилляционного счета; Введ. 1989.
- 4. Методы измерения трития. Рекомендации НКРЗ, США: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1978
- 5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99), СП 2.6.1. 758-99 Издание официальное. Алматы, 2000.- 80с
- 6. Белянин, В.И. Опыт определения испарения грунтовых вод в аридных условиях Восточного Казахстана; ЭИ ВИМС, Сер. VIII, вып. 1, -1978

участки наших исследований представляли себе лишь небольшие участки (береговые линии) вдоль ручьев и рек. Насколько теперь изменилось наше мнение о методах проведения подобных исследований. А вместе с тем изменилось и представление о прогнозировании тритиевого загрязнения. Тритиевое загрязнение может присутствовать не только в месте нахождения открытого водного источника. Следовательно, для получения корректных данных о загрязнении тритием атмосферного воздуха, участки исследований должны быть значительно шире, и выбирать их следует, учитывая все основные особенностей распределения трития в атмосфере.

На основе результатов всех проведенных экспериментов, были выделены основные методологические принципы исследования концентрации трития в атмосферном воздухе. При проведении исследования концентрации трития в атмосферном воздухе необходимо учитывать, что:

- Основными источниками поступления трития в атмосферный воздух являются – загрязненная тритием вода, растительность и почвенный воздух;
- 2. Глубина залегания подземных вод;
- Время отбора одной пробы не менее двух часов;
- 4. Оптимальное время проведения отбора проб – с 10 часов утра до 18 часов вечера. При проведении исследования концентрации трития в другое время необходимо вводить поправочные коэффициенты, так как разница в концентрации трития в ночные и дневные часы отличается примерно на порядок;
- При проведении отбора проб необходимо учитывать скорость ветра, так как при сильном, порывистом ветре возможно получение некорректных результатов;

Представленная методология основывается на основных общих принципах для проведения исследования концентрации трития в атмосферном воздухе.

«ДЕГЕЛЕҢ» СЫНАҚ АЛАҢЫНЫҢ №176 ШТОЛЬНЯСЫНАН АҚҚАН СУДЫҢ ЭКОЖҮЙЕСІНІҢ АТМОСФЕРАЛЫҚ АУАСЫНДАҒЫ ТРИТИЙДІҢ БӨЛІНІСІНІҢ СИПАТЫН ЗЕРТТЕУ

Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Умаров М.А., Айдарханов А.О.

ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан

Атмосфералық ауадағы тритийдің шоғырлануын зерттеу әдістемесінің негізі әзірленді. Топырақтық және штольнялық ауадағы тритийдің шоғырлануын бағалау жұмыстары жүргізілді. № 176 штольнясынан аққан судың экожүйесіндегі атмосфералық ауадағы тритийдің бөлінісінің сипатын және деңгейін кешенді түрде бағалау жұмыстары жүргізілді.

RESEARCH OF TRITIUM DISTRIBUTION PATTERN IN ATMOSPHERIC AIR OF WATERCOURSE ECOSYSTEM OF TUNNEL №176 OF THE TECHNICAL FIELD "DEGELEN"

O.N. Lyahova, S.N. Lukashenko, M.A. Umarov, A.O. Aidarhanov

Institute of Radiation Safety and Ecology NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Methodology foundations of the research for tritium concentration in atmospheric air were developed. Concentration of tritium in soil and tunnel air was determined. Integrated assessment of the level and character of tritium distribution in atmospheric air of watercourse ecosystem of tunnel 179 was carried out.

УДК 550.34:621.039.9

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ОДИНОЧНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ (ПЯВ) В СКВАЖИНАХ УЧАСТКА БАЛАПАН (СИП) СЕЙСМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ОБМЕННЫХ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Шелехова О.Х.

Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты изучения некоторых характерных особенностей физического воздействия ПЯВ на вмещающую среду, полученные с использованием пассивного сейсмического метода обменных волн землетрясений, для совершенствования этого сейсмического метода и разработки геофизических (сейсмических) технологий для проведения Инспекции на месте.

Введение

Ядерные испытания на СИП в районе площадки Балапан выполнялись в течение длительного периода времени (1965 - 1989 гг.) для решения различных задач. Несмотря на активное использование в последнее время территории СИП в хозяйственной деятельности, места проведения испытаний изучены недостаточно полно [1 - 5]. После подписания в 1996 г. Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) перед Республикой Казахстан встал вопрос о выполнении национальных мер по осуществлению технических обязательств, вытекающих из него. Одним из таких обязательств является развитие технологий Инспекции на месте, в частности, совершенствование сейсмических методов.

Основной целью использования сейсмического метода обменных волн землетрясений (МОВЗ) при изучении мест проведения ПЯВ является получение вспомогательной информации о нарушенных взрывом участках вмещающей среды - местоположении поверхности откола, разрывных нарушений и т.д. В период с 2004 г по 2007 г. выполнялось методическое совершенствование данной технологии для оптимального её использования при изучении современного состояния мест проведения ПЯВ на СИП. В статье приведены результаты изучения некоторых характерных особенностей физического воздействия ПЯВ на вмещающую среду, полученные с использованием пассивного сейсмического метода обменных волн землетрясений.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОванием **MOB3**

МОВЗ относится к числу «пассивных» сейсмических методов, т.к. в ходе наблюдений используются естественные источники возбуждения упругих колебаний – удалённые землетрясения [8, 9]. В данном случае объектами исследования являются границы нарушения сплошности среды, приуроченные к ПЯВ, к которым относятся субвертикальные и субгоризонтальные разрывные нарушения, приповерхностные зоны откола, различные разломы. Совокупность перечисленных границ условно названа первой (верхней) границей обмена. Как показывают результаты предыдущих исследований [6, 10], данная граница, в силу своих петрофизических свойств, является обменообразующей, т.е. при прохождении через неё продольной волны, часть энергии преобразуется в обменную поперечную PS-волну. Информация о временах прихода продольной и обменной волн к пунктам наблюдения используется для определения условий залегания (глубины, наклона и др.) верхней границы обмена [11].

Участки полевых наблюдений

Полевые наблюдения выполнены в районе двух скважин участка Балапан (СИП) - 1388 и 1220 (рисунок 1). Данные скважины различаются по техническим параметрам проведения ПЯВ и геологическим условиям.

Подземный ядерный взрыв в скважине 1388 произведен 27.12.1987, мощность заряда - 117 кт, глубина заложения заряда – 530 м. В геологическом отношении участок исследований сложен осадочными, осадочнопирокластическими и эффузивными нижнее-каменноугольными и средне-кембрийскими породами. Взрыв был произведён в эффузивных породах.



Рисунок 1. Участок Балапан. СИП Расположение скважин 1388 и 1220

Подземный ядерный взрыв в скважине 1220 был выполнен 14.09.1980, мощность заряда- 190 кт, глубина заложения заряда – не более 427 м. Непосредственно в месте расположения изучаемой скважины 1220 наблюдаются выходы на поверхность интрузивных образований – средне- верхне- каменноугольных гранитов и диоритов. Взрыв был произведён в гранитах.

Методика полевых измерений

Полевые работы проводились с использованием автономных сейсмических станций типа "Карс" и DAS PMD-6102. Одно из первых совершенствований технологии МОВЗ заключалось в модификации используемого оборудования. В ходе проведения полевых работ изначально аналоговые станции записи "Карс" работали в модифицированном варианте - ненадёжный блок лентопротяжного механизма был заменён на модули LCard-E330, позволявшие вести регистрацию сейсмических сигналов сразу в цифровом виде. Сейсмические станции работали в 12-канальном варианте, к каждой станции подключалось четыре трехкомпонентных сейсмоприемника СК-1П. Регистрация сейсмических сигналов производилась на скорости записи 0,5 мм/с, что обеспечивало регистрации сигналов в частотном диапазоне 0,5 - 32 Гц. Динамический диапазон в 12-канальном варианте составлял 42 Дб. Визуализация и обработка записей сейсмических событий осуществлялась на персональных рабочих машинах (РС) с использованием программы "Monitor". Регистрация на станциях DAS PMD-6102 велась в 15-ти канальном режиме - к каждой из станций было подключено 5 трёхкомпонентных датчиков СК-1П (с одной вертикальной и двумя взаимно перпендикулярными горизонтальными компонентами). Частота оцифровки составила 200 отсчетов в секунду, усиление на станциях - 4, номинальное увеличение сейсмометров -0.651863.



Вторым шагом в совершенствовании методики MOB3 было изменение системы наблюдений. В ранних исследованиях, выполненных в местах проведения ПЯВ на участке Балапан с помощью MOB3 [6,7], была использована площадная система наблюдений с равномерным шагом. Данная система требовала привлечения большого количества оборудования и предварительной топографической привязки. В данном случае использовааи радиально-лучевая система наблюдений без предварительной топопривязки - координаты пунктов наблюдения определялись непосредственно на месте после расстановки системы с помощью приборов GPS. На рисунке 2 приведены системы наблюдения для скважин 1388 и 1220.

Следующим шагом в совершенствовании технологии МОВЗ при изучении мест проведения ПЯВ было привлечение к обработке современного программного обеспечения. Использование цифровых станций DAS PMD-6102, ведущих регистрацию сейсмических сигналов в стандартных форматах данных (CSS 3.0, SEED), позволило использовать более мощные и функциональные программные пакеты, такие как "Datascope"., включающий dbpick программу для визуализации сейсмических записей, dbloc2 - программу для локализации событий и др.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ПОЛЕВОГО МАТЕРИАЛА

Процесс обработки полевого материала, полученного в районе скважин 1388 и 1220, состоял из предварительной обработки, расчёта параметров залегания границы обмена, построения объёмной модели г.

Предварительная обработка включала в себя: визуальный просмотр с помощью пакета "DataScope" непрерывной сейсмической записи с целью поиска на ней различного рода событий (карьерных взрывов и разноудалённых землетрясений); «вырезание» из непрерывной записи найденных событий и сохранение их в виде отдельных файлов для всех станций и пунктов наблюдения.



🗮 – устье скважины. Пункты наблюдения (номер станции и сейсмоприёмника): 🚺 – «Карс»; 💶 – DAS PMD-6102

Рисунок 2. Системы полевых наблюдений методом обменных волн землетрясений в районе скважин

Расчёт параметров залегания границы обмена включал следующие этапы: определение на фрагменте сейсмической записи для каждого из событий времён вступления продольной (Р) и обменной (PS) фаз сейсмических волн; расчёт времени запаздывания обменной фазы PS относительно первого вступления продольной волны (рисунок 3); построение поверхностных годографов (трендов) отдельно для каждого события, используя разницу между временем прихода продольной волны на разные пункты наблюдения (рисунок 4); расчёт таких параметров залегания поверхности первого обмена, как глубина то точки обмена и сейсмический снос с



Рисунок 3. Пример выделения вступления продольной и обменной фаз на сейсмограмме и определения времени запаздывания

использованием специально разработанной программы "MOVZ" (рисунок 5); определение местоположения (координат и глубины) точек обмена для всех событий и пунктов наблюдения.

Построение объёмной модели границы первого обмена выполнялось с использованием пакета "Surfer" на основании информации о местоположении точек обмена (рисунок 6).

Анализ полученных результатов выполнен отдельно для каждого из районов исследований. На рисунке 7 представлена объёмная модель поверхности первого обмена, рассчитанная для района скважины 1388.





поверхностный годограф	<u>поверхностный годограф</u> <u>скоростн</u>							
Расстояние между изохронами (м)	500	Продольные вол	пны, Үр (м/с)	1600				
Шаг изохрон (с)	0,1	Поперечные вол	іны, ¥s (м/с)	900				
Сейсмограмма Время запаздывания прихода обменной волны относительно продольной, dT (c) Расчёт ВЫХОЛНЫЕ ЛАННЫЕ								
Угол выхода сейсмического луча и	71,3370751150575							
Глубина до границы обмена, Н (м)	77,9589292185184							
Величина сейсмического сноса, L	26,3314285714286							
	Следующий	і расчёт		выход				

Рисунок 5. Интерфейс и пример работы программы для расчета параметров залегания границы первого обмена MOVZ



Рисунок 6. Пример построения поверхности первого обмена для скважин

На объёмную модель поверхности первого обмена (рисунок 7) вынесены проекции устья скважины 1388, пунктов наблюдения и точки обмена. Согласно проведённому анализу, зона активных и общих поствзрывных разрушений, имеющая размеры приблизительно 400×400 м², отличается от вмещающей среды относительно небольшими глубинами залегания. Значения глубины для данной зоны лежат в интервале от -30 до (-300)м, тогда как глубина залегания поверхности первого обмена для окружающих горных пород лежит в интервале от -500 до (-900) м. Учитывая глубину ПЯВ в скважине 1388 (530 м), данную ситуацию можно объяснить образованием поверхности откола над гипоцентром взрыва. Данный результат подтвердил разработанную ранее теорию об образовании куполообразной поверхности откола над гипоцентром одиночного подземного взрыва, являющейся границей уверенного обмена сейсмической волны [6, 10]. В целом, представленная модель поверхности первого обмена описывает характерные особенности строения нарушенного подземным взрывом участка горных пород – наблюдается блоковая структура среды с наличием верти-

кальных границ раздела и других нарушений сплошности.

На рисунке 8 представлена объёмная модель поверхности первого обмена, рассчитанная для района скважины 1220.

По результатам анализа полученной модели поверхности первого обмена можно судить о характере проявления последствий от проведённого в скважине 1220 подземного ядерного взрыва. Над гипоцентром взрыва образовалась куполообразная поверхность откола, общей площадью приблизительно 600×600 м². Данная поверхность откола располагается в интервале глубин от (-10) до (-200) м (рисунок 8). Учитывая глубину проведения ПЯВ в скважине 1220 (427 м), данную ситуацию также можно объяснить образованием куполообразной поверхности откола над гипоцентром взрыва [6, 10]. И в данном случае, несмотря на различия в геологическом строении, представленная модель поверхности первого обмена описывает характерные особенности строения нарушенного подземным взрывом участка горных пород - наблюдается блоковая структура среды с наличием вертикальных границ раздела.



Рисунок 7. К результатам построения объёмной модели поверхности первого обмена, полученной с использованием метода обменных волн землетрясений в районе скважины 1388 Рисунок 8. К результатам построения объёмной модели поверхности первого обмена, полученной с использованием метода обменных волн землетрясений в районе скважины 1220 Таким образом, на основании результатов наблюдений, выполненных в районе скважин 1388 и 1220 (уч. Балапан, СИП), можно сделать вывод о том, что, используя метод обменных волн землетрясений, можно получить вспомогательную информацию о местоположении и размерах поверхности первого обмена, по которой, в свою очередь, можно судить о расположении очага ПЯВ и размерах зоны поствзрывных разрушений.

Сопоставление результатов МОВЗ и других сейсмических методов

С целью подтверждения эффективности использования технологии МОВЗ при изучении характерных особенностей воздействия одиночных ПЯВ на вмещающую среду было выполнено сопоставление результатов, полученных с использованием МОВЗ в районе скважины 1220, с результатами других сейсмических наблюдений, выполненных на этом же участке [12]. В частности, в районе данной скважины были также проведены исследования с применением активных сейсмических технологий - метода дифрагированно-рассеянных волн (МДРВ) и метода рефрагированных волн (МРВ). На рисунке 9 представлены результаты наблюдений МОВЗ в виде модели первого обмена (9а), вертикальные разрезы поля энергии рассеянных волн по данным МДРВ (9б) и разрезы в линиях равных скоростей по данным МРВ (9в). На поверхность первого обмена вынесены проекции профилей наблюдения активных сейсмических методов МДРВ и МРВ.



Рисунок 9. Сопоставление результатов сейсмических наблюдений: а - пассивный метод обменных волн землетрясений, б - активный метод дифрагированно-рассеянных волн, в - активный метод рефрагированных волн

Участки повышенных значений энергии рассеянных волн и области пониженных значений скорости продольных волн (обозначенные на вертикальных разрезах красными пунктирными окружностями), приуроченные к приповерхностным областям разрушения горных пород, совпадают по размерам и местоположению с участками отсутствия поверхности первого обмена (на объёмной модели данные участки также отмечены красными пунктирными окружностями и выглядят как своеобразные «провалы»). Участки уверенного присутствия границы первого обмена (вышеописанная куполообразная поверхность откола) соответствуют зонам пониженных значений энергии рассеянных волн на разрезах МДРВ и кровле залегания высокоскоростных пород согласно разрезам МРВ. Глубина залегания данной поверхности откола, согласно результатам комплексного анализа сейсмических данных, лежит в интервале от (-30) до (-50) м. Соответствие результатов МОВЗ и других сейсмических методик, применённых для изучения степени разрушенности района скважины 1220, говорит об эффективности данной технологии как вспомогательного инструмента в рамках выявления последствий от ПЯВ.

Заключение

В ходе проведения полевых наблюдений в период 2004 - 2007 гг. в районе скважин 1388 и 1220 (уч. Балапан, СИП), направленных на изучение современного состояния блока земной коры, подвергшегося воздействию одиночного подземного ядерного взрыва, был использован пассивный сейсмический метод обменных волн землетрясений (МОВЗ). Основной задачей использования данного метода было получение вспомогательной информации о характерных особенностях физического воздействия ядерного взрыва на вмещающую среду.

Работы по изучению влияния ПЯВ на окружающие горные породы участка Балапан с использованием МОВЗ в ИГИ НЯЦ РК выполнялись ранее - в 1993 и 1997 гг. Но, начиная с 2004 г. выполнялись мероприятия, направленные на совершенствование методики применения МОВЗ для решения поставленных задач. Данное совершенствование выполнялось в трёх основных направлениях: в методическом, аппаратурном и программном. Полученные результаты полевых измерений с применением МОВЗ представлены в виде объёмных моделей поверхности первого обмена, которые описывают характерные особенности воздействия одиночных ПЯВ на окружающие горные породы исследуемых участков. С целью подтверждения эффективности применения МОВЗ для изучения последствий от ПЯВ было выполнено сопоставление результатов МОВЗ с результатами других независимых сейсмических наблюдений, проведённых на тех же участках.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что пассивный сейсмический метод обменных волн землетрясений является надёжным вспомогательным инструментом для изучения и выявления участков воздействия подземных ядерных взрывов на окружающую среду. Работы по адаптации и совершенствованию данного метода для решения задач изучения последствий от ПЯВ повысили уровень качества получаемых результатов. В местах выполнения подземных ядерных взрывов, как на территории СИП, так и на других испытательных полигонах, рекомендуется применение технологии МОВЗ как вспомогательного инструмента для выявления и изучения участков, нарушенных ПЯВ. Также данный метод показал свою эффективность для решения задач Инспекции на месте.

Литература

- 1. Артемьев, О.И. Радионуклидное загрязнение территории бывшего Семипалатинского испытательного ядерного полигона / О.И. Артемьев, М.А. Ахметов, Л.Д. Птицкая // Вестник НЯЦ РК, 2001. вып. 3. С. 12 19.
- 2. Птицкая, Л.Д. Современное состояние радиационной обстановки на территории испытательной площадки «Балапан» бывшего Семипалатинского полигона / Л.Д. Птицкая // Вестник НЯЦ РК, 2002 вып. 3. С. 11 18.
- Тугельбаев, С.С. Степень загрязнённости почв различных ландшафтов семипалатинского региона α-активными радионуклидами и их роль в гигиенической оценке ландшафтов региона / С.С. Тугельбаев // Вестник НЯЦ РК, 2004 – вып. 4. – С. 5 - 8.
- Якупов, В.С. Состоянии изученности радиационной обстановки на административных территориях Восточноказахстанской области / В.С. Якупов, В.Я. Самойлов, А.А. Потапов // Вестник НЯЦ РК, 2004 – вып. 4. – С. 21 - 25.
- 5. Лукашенко, С.Н., Выявление возможных путей миграции радионуклидов в блоках пород, вмещающих полости подземных ядерных взрывов по геофизическим и геохимическим данным (на примере площадки Балапан и участка Лира) / С.Н. Лукашенко [и др.] // Третья междунар. Конференция «Ядерная и радиационная физика», Алматы, 2001.
- Проведение комплексного геофизического мониторинга территории Казахстана с целью снижения ущерба от стихийных бедствий и антропогенной деятельности: отчет о НИР / А.Г. Ванчугов, Н.Н. Беляшова. и др. // Курчатов, НЯЦ РК, 1994.
- Окончательный технический отчет по проекту К 056 96 МНТЦ «Моделирование миграции загрязняющих веществ в подземных водах в районе Семипалатинского полигона». – Курчатов, 1999.
- 8. Померанцева, И.В. Обработка материалов сейсмических исследований методами обменных волн / И.В. Померанцева, А.И. Мозженко // Новосибирск: «Наука», 1977.
- 9. Пузырев, Н.Н. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн / Н.Н. Пузырев [и др.]. М.: «Недра», 1985. 277 с.
- 10. Беляшов, А.В. Использование геофизических и геохимических методов при проведении Полевого Эксперимента 2002 в рамках Инспекции на Месте / А.В. Беляшов [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2004 вып. 2. С. 96 113.
- 11. Беляшов, А.В. Моделирование мест проведения подземных ядерных взрывов по данным комплекса сейсмических методов / А.В. Беляшов // Вестник НЯЦ РК, 2005. вып. 4. С. 76 83.
- 12. Разработка геолого-геофизических методов ИНМ в рамках ДВЗЯИ на примере СИП: отчет о НИР (промежуточный за 2007 г.) / А.В. Беляшов, В.А. Мариненко, М.В. Ефремов, А.В. Дроздов, О.Х. Шелехова // Курчатов, НЯЦ РК, 2008.

БАЛАПАН (ССП) УЧАСКЕСІНІҢ ҰҢҒЫМАЛАРЫНДАҒЫ ДАРА ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАР (ЖЯЖ) САЛДАРЫН ЖЕР СІЛКІНІСТЕРІНІҢ АУЫСПАЛЫ ТОЛҚЫНДАР СЕЙСМИКАЛЫҚ ӘДІСІМЕН ЗЕРДЕЛЕУ

Шелехова О.Х.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер нституты, Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыста, Орнындағы инспекциясын жүргізу механизмдерін жетілдіру шегінде жерсілкінулердің ауыспалы толқындарының сейсмикалық әдісін жетілдіру және геофизикалық (сейсмикалық) технологияларын әзірлеу үшін, жерсілкінулердің ауыспалы толқындарының пассивтік сейсмикалық әдісін қолдануымен сыйыстыратын ортаға ЖЯЖ-дың физикалық әсерінің кейбір өзгеше ерекшеліктерін зерделеуінде алынған нәтижелері келтірілген.

STUDY INTO CONSEQUENCES OF SINGLE UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS (UNE) CONDUCTED IN BOREHOLES AT BALAPAN (STS) SITE BY SEISMIC METHOD OF EARTHQUAKE CONVERTED WAVES

O.Kh. Shelekhova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper provides investigation results of UNE physical specifications impact on host rock, which have been obtained by passive earthquake converted wave method that was used to develop earthquake converted wave seismic method and to develop geophysical (seismic) technologies within On-Site Inspection activities.

МЕХАНИЗМЫ ОБМЕНА В СИСТЕМЕ ГАЗ-ПРОТОННЫЙ ПРОВОДНИК

¹⁾Мунасбаева К.К., ¹⁾Хромушин И.В., ²⁾Жотабаев Ж.Р., ¹⁾Аксенова Т.И., ¹⁾Корниенко П.А.

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

Проведены сравнительные исследования BaCeO₃ и SrCeO₃ и выявлены основные закономерности и особенности процессов интеркаляции протонов и кислорода в решетку оксида. Изучено влияние реакторного облучения на процессы обмена. Обнаружен фазовый переход при высокотемпературном реакторном облучении, обусловленный кристаллизацией фазы CeO₂. Предложены модели, позволяющие определять энергии активации десорбции кислорода и воды, а также эффективность регистрации газов; выполнены расчеты и определены стехиометрические коэффициенты водорода и углерода в цератах бария.

Введение

Высокотемпературные протонные проводники на основе оксидов переходных металлов имеют большие перспективы для практического использования в качестве мембран топливных элементов в экологически чистых энергоустановках с высоким КПД, а также в качестве высокочувствительных датчиков водорода для атомной промышленности.

Для металлооксидов, обладающих свойством протонной проводимости, принципиальным является интеркаляция протонов в виде гидроксилов в решетку оксида. Процесс растворения воды в образцах цератов бария и стронция при обработке во влажной атмосфере может быть описан следующим образом:

$$H_2O+V_0^{\bullet\bullet}+O_0^x \Leftrightarrow 2OH_0^{\bullet\bullet}$$

В окислительной атмосфере возможно также внедрение кислорода в решетку цератов и заполнение кислородных вакансий согласно уравнению:

$$1 \langle 2O_2 + V_0^{\bullet \bullet} + 2e' \Leftrightarrow O_0^x$$

В настоящее время синтезирован широкий круг оксидных протонных проводников, которые характеризуются различным химическим составом и широким диапазоном рабочих температур. Несмотря на то, что найдены твердооксидные протонные проводники с достаточно низкой рабочей температурой, основная масса твердых электролитов характеризувысокими рабочими температурами ется (600-800°С). Использование высоких температур и необходимость контакта с газообразным топливом и окислителем вызывает необходимость исследования стабильности структуры и свойств оксидных материалов в условиях, приближенных к условиям их эксплуатации. При этом особый интерес представляет исследование процессов интеркаляции протонов в решетку, формы их локализации в оксидах и механизмы миграции. Исследования поведения протонов также тесно связаны с изучением состояния кислорода, который в оксидных протонных проводниках играет одновременно роль ловушки и возможного пути миграции протона. Перспективы использования данных материалов в атомной энергетике диктует необходимость изучения радиационной стабильности протонных проводников в жестких условиях реакторного облучения.

Методика эксперимента

В работе использован метод термодесорбционной спектроскопии для исследования процессов термодесорбции газов (водород, вода, кислород, диоксид углерода) из монокристалических и керамических бариевых цератов $BaCe_{0,9}Nd_{0,1}O_{3-\alpha}$, допированных Nd^{3+} и цератов стронция, допированных иттрием $SrCe_{0,95}Y_{0,05}O_{3-\alpha}$. Методика проведения экспериментов подробно описана ранее [1].

Результаты и их обсуждение

В ранних работах нами подробно было исследовано влияние окислительно - восстановительных условий отжига, а также степени допирования на интеркаляцию газов в решетку оксидов и выявлены основные закономерности и особенности данных процессов [1,2]. Было установлено, что церат бария является смешанным протон- кислород-ионным проводником, тогда как церат стронция характеризуется чистой протонной проводимостью. Выявлена немонотонная зависимость концентрации волы от степени допирования на церате бария и наличие инкубационного периода на концентрационной зависимости кислорода (рисунок 1). Была отмечена также возможность внедрения протонов в номинально чистые цераты (недопированные) за счет смешанного валентного состояния церия Се^{3+/4+} (рисунок 2).

Особый интерес представляет исследование радиационной стабильности протонных проводников. Поэтому нами были выполнены работы по влиянию реакторного облучения на цераты бария и стронция. Как показали наши исследования, низкотемпературное реакторное облучение вызывает монотонное изменение концентрации внедренного газа в решетку. В то же время высокотемпературное реакторное облучение сопровождается появлением фазового перехода с выделением кислорода и воды при температуре 545°C (рисунки 3 и 4).



Рисунок 1. Концентрационная зависимость внедренного кислорода и воды от степени допирования



Рисунок 2. Выход воды из недопированного церата бария



Рисунок 3. Спектры выделения молекул кислорода из керамического допированного церата бария

Форма пика однозначно свидетельствует о наличие фазового перехода в данных материалах после облучения. Интересным является также и тот факт, что обнаруженный низкотемпературный всплеск выделения кислорода характерен даже для стронциевых цератов и недопированных бариевых цератов, выхода кислорода из которых ранее никогда не наблюдалось. Отжиг образцов в лабораторных условиях при температуре 620°С после облучения приводил к исчезновению всплеска выделения молекул кислорода в спектрах термодесорбции. Следует отметить, что интенсивность обнаруженного всплеска выделения кислорода существенно выше для монокристаллическихи образцов по сравнению с поликристаллическими. В спектрах выделения молекул воды из данных материалов обнаружен перегиб в области температур кислородного всплеска, что также свидетельствует в пользу фазового перехода. Детали данного фазового перехода были подробно изучены и был сделан вывод, что фазовый переход обусловлен кристаллизацией СеО₂ в отдельную фазу при 545°C [3].



Рисунок 4. Спектры выделения молекул воды из керамического допированного церата бария

Однако в ходе анализа полученных результатов возникает вопрос, чем вызвано появление данного фазового перехода? Как уже отмечалось, облучение образцов при повышенной температуре проводили в герметичных запаянных ампулах, причем запаивание ампул производили при атмосферном давлении. Повышение температуры в данной системе при постоянном объеме должно сопровождаться увеличением давления в ампуле согласно уравнению Менделеева-Клайперона PV=RT.

Для выявления роли повышенного давления в появлении фазового перехода нами были проведены специальные отжиги образцов в герметичных ампулах разного объема. При этом было установлено, что без высокотемпературного облучения на реакторе ни при каких условиях отжига фазовый переход на данных образцах не появляется. Поэтому был сделан однозначный вывод, что причиной фазового перехода является высокотемпературное облучение.

В то же время получен ряд новых закономерностей процесса интеркаляции газов в решетку оксидов в зависимости от давления газа над образцом. На рисунке 5 приведены нормированные на единицу спектры термодесорбции молекул воды, диоксида углерода и кислорода из допированного церата бария, отожженного на воздухе при температуре 620°С. При насыщении церата бария протонами путем отжига его в запаянной ампуле, равновесное состояние, являющееся результатом такого отжига, существенно отличается от отжига на открытом воздухе. В спектрах термодесорбции таких образцов наблюдается выход молекул воды, кислорода и диоксида углерода при одной температуре 770°С одновременно. Уменьшение объема ампулы в десять раз и отжиг образцов в ней приводит к новому равновесному состоянию и новым энергетическим состояниям воды, кислорода и диоксида углерода в решетке. В спектрах термодесорбции наблюдается сдвиг температур максимумов выхода соответствующих газов при нагреве, причем новые состояния характеризуются более высокими температурами десорбции (рисунок 5).



Рисунок 5. Нормированные спектры термодесорбции молекул воды, диоксида углерода и кислорода из допированного церата бария отожженного на воздухе при 620°С



Рисунок 6. Нормированные спектры термодесорбции молекул воды, диоксида углерода и кислорода из образцов допированного церата бария отожженных в запаянной ампуле при 620°С

Как следует из рисунка 5, спектры выделения молекул диоксида углерода и воды имеют достаточно сложный вид. Оказалось, что спектры термодесорбции газов из исходных образцов бариевых цератов отожженных в запаянной ампуле объемом 24 см³ при 620°С существенно отличаются от спектров термодесорбции газов из образцов, отожженных на воздухе при той же температуре (рисунок 6). Интересной особенностью спектров десорбции в данном случае является то, что температуры максимумов скоростей выделения примерно одинаковы для всех газов, а формы спектров выделения претерпевают существенные изменения.

Отжиг образцов бариевых цератов на воздухе с последующим их отжигом при 620°С в запаянных ампулах приводит также к трансформации спектров выделения газов (рисунок 7). В этом случае, температуры максимумов скоростей выделения молекул кислорода и диоксида углерода примерно одинаковы, а пик выделения молекул воды смещается в сторону низких температур.

Последующие эксперименты по исследованию спектров выделения газов из данных материалов, отожженных в запаянных ампулах, показали, что процессы термодесорбции в этом случае в существенной степени зависят от исходного состояния образцов и отношения их массы к объему ампул, в которых проводился отжиг, что влияет на количественные соотношения исследуемых газов в данных материалах. Такие изменения спектров термодесорбции очевидно связаны с изменениями стехиометрии данных материалов вследствие изменения условий термодинамического равновесия при использованных режимах отжига.



Рисунок 7. Нормированные спектры термодесорбции молекул воды, диоксида углерода и кислорода из образцов допированного церата бария отожженного в запаянной ампуле при 620°С

Известно, что углерод и водород в этих материалах связан с кислородом, которым заполняются кислордные вакансии, концентрация которых определяется степенью допирования. Это позволило нам записать следующее уравнениие баланса атомов кислорода в бариевых цератах:

$$c - k_{H_2O} S_{H_2O} - 2 k_{CO_2} S_{CO_2} = 2 S_{O_2}$$
(1)

Здесь c – константа, пропорциональная степени допирования образца, S_{H_2O} , S_{CO_2} , S_{O_2} - площади под кривыми выделения молекул воды, диоксида углерода и кислорода, приведеные к единице массы об-

разца, $k_{H_{2O}}$ и k_{CO_2} коэффициенты, равные обратной эффективности регистрации H₂O и CO₂ по отношению к эффективности регистрации молекул кислорода. Коэффициенты 2 введены для сохранения баланса атомов кислорода.

Для определения описанных выше параметров были рассмотрены три образца с различными соотношениями, выделившихся из них молекул воды, диоксида углерода и кислорода. Это позволило нам, решив следующую систему уравнений:

$$c - k_{H_2O} S^i_{H_2O} - 2 k_{CO_2} S^i_{CO_2} = 2 S^i_{O_2}$$
, $i = 1..3$

определить значения параметров $k_{H_{2O}} = 0.1413$, $k_{CO_2} = 0.1212$ и с. На практике определение эффективностей регистрации различных газов представляет огромную трудность, т.к. они определяются не только характеристиками масс-спектрометра, но и активностью газов, скоростями их откачки и т.д. Так как константа с пропорциональна степени допирования образцов, это впервые позволило определить стехиометрию по углероду и водороду этих материалов (рисунок 8).



 Отжиг на воздухе при 620°С, 2 – Отжиг на воздухе + отжиг в запаянной ампуле при 620°С, 3 – Отжиг исходных образцов в запаянной ампуле при 620°С

Рисунок 8. Стехиометрия образцов допированных бариевых цератов в зависимости от способов их приготовления

Литература

- Мунасбаева, К. К. Изучение процессов сорбции-десорбции газов из цератов бария и стронция / К.К. Мунасбаева [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2006. – вып. 3. – С. 5-9.
- Хромушин, И. В. Исследование особенностей внедрения кислорода в допированные цераты бария и стронция / И.В. Хромушин [и др.] // Известия НАН РК- 2006. – №6. – С. 72-76.
- Корниенко, П. А. Исследование радиационной стабильности твердооксидных протонпроводящих электролитов/ П.А. Корниенко [и др.] // Вестник НЯЦ РК, 2007. – вып. 3. – С. 33-36.

Как следует из рисунка 8, в данном случае содержание углерода существенно зависит от способа приготовления образцов, тогда как содержание водорода претерпевает лишь незначительные изменения.

Выводы

• Проведено сравнительное исследование особенностей интеркаляции газов в решетку цератов бария BaCeO₃ и стронция SrCeO₃, допированных трехвалентными катионами; определены температурные диапазоны подвижности протонов и кислорода и показана возможность внедрения сверхстехиометрического кислорода в решетку допированных цератов бария.

• Выявлен характер зависимости концентрации внедренных молекул от температуры, парциального давления и степени допирования, отмечено присутствие протонов в решетке номинально чистых недопированных цератов бария и стронция, обусловленное наличием церия в смешанно-валентном состоянии Ce+3/Ce+4.

• Показано, что низкотемпературное реакторное облучение приводит к увеличению количества интеркалированных протонов и кислорода, тогда как высокотемпературное реакторное облучение вызывает в перовскитах фазовый переход, обусловленный аморфизацией кристаллической решетки и последующей кристаллизацией диоксида церия в отдельную фазу.

• Предложены математические модели, позволяющие определять энергии активации десорбции кислорода и воды, а также рассчитывать стехиометрические коэффициенты углерода и водорода.

ГАЗ-ПРОТОНДЫҚ ӨТКІЗГІШ ЖҮЙЕДЕГІ АЛМАСУ МЕХАНИЗМДЕРІ

¹⁾Мунасбаева Қ.Қ., ¹⁾Хромушин И.В., ²⁾Жотабаев Ж.Р., ¹⁾Аксенова Т.И., ¹⁾Корниенко П.А.

¹⁾КР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан ²⁾Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Курчатов

Барий мен стронций цераттарына салыстырмалы зерттеулер жүргізілген және оксид торына протондар мен оттегінің енгізу процестерінің негізгі заңдылықтары мен ерекшеліктері айқындалған. Реакторлық сәулелендірудің "газ-протондық өткізгіш" алмасу процестеріне ықпалы зерттеліп танылған. СеО₂ фазаның кристалдануы себепші болатын жоғары температуралы реакторлық сәулелендіру кезінде фазалық ауысу табылған.

Оттегі мен су десорбциясының активтендіру энергияларын, сондай-ақ тіркеудің тиімділігін анықтауға мүмкіндік беруші математикалық моделдер ұсынылған; есептемелер орындалған және барий цератында сутегі мен көміртегінің стехиометрлік коэффициенттері анықталған.

EXCHANGE PROCESSES IN GAS-PROTON CONDUCTOR SYSTEMS

¹⁾K.K. Munasbayeva, ¹⁾I.V. Khromushin, ²⁾Zh.R. Zhotabaev, ¹⁾T.I. Aksenova, ¹⁾P.A. Kornienko

¹⁾Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan ²⁾National Nuclear Centre of the Republic of Kazakstan, Kurchatov

The comparative researches of barium and strontium cerates were carried out and the main regularities and peculiarities of the intercalation processes of water and oxygen molecules were revealed. Influence of reactor irradiation on exchange processes in solid state was also studied. It was found that the phase transformation takes place in barium and strontium cerates after high temperature reactor irradiation.

The math models were suggested for calculations of activation energy of water and oxygen molecules desorption. The effectiveness of different gas registration was calculated too due to the thermodesorption experimental results and the stoichiometric coefficients for carbon and hydrogen were determined.

УДК 039.74:621.039.546

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОНННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЧЕХЛА ТВС И ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА РЕАКТОРА БН-350 В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ СУХОГО ХРАНЕНИЯ

Уткелбаев Б.Д., Коянбаев Е.Т., Азимханов А.С.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Проведены рентгеноструктурный фазовый анализ коррозионного слоя и микроструктурные исследования материалов после их длительного термического старения при температурах 400°С и 600°С.

Введение

В Казахстане принято решение о транспортировке отработавших топливных сборок быстрого ядерного реактора БН - 350 из города Актау на территорию бывшего Семипалатинского полигона. Долговременное хранение отработавшего ядерного топлива реактора БН-350 будет осуществляться на территории реакторного комплекса «Байкал-1» Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

В настоящее время все ядерное топливо упаковано в герметичных чехлах из нержавеющей стали, которые являются вторым барьером для выхода радионуклидов в окружающую среду, и хранится в воде бассейна выдержки реактора. В качестве первого барьера на пути выхода радиоактивных продуктов деления в окружающую среду будут использоваться герметичные оболочки твэлов, поэтому для получения прямых экспериментальных данных по коррозионному поведению барьерного материала необходимо исследовать облученный оболочечный материал. Проблема заключается в том, что эти материалы в настоящее время недоступны и вряд ли будут доступны в ближайшем будущем. Однако для исследования можно использовать необлученные и облученные образцы чехла ТВС из активной зоны реактора БН-350, а также необлученные оболочки твэла. Материалы чехла ТВС и оболочек твэла являются нержавеющими сталями аустенитного класса и, поэтому, одним из немногих подходов для прогнозирования деградации первого барьера на пути выхода радиоактивных продуктов деления в окружающую среду является исследование облученного и необлученного чехлового материала и необлученной оболочки твэла. Идея заключается в том. чтобы прогнозировать степень деградации облученного материала оболочки твэла по результатам исследования коррозионного поведения облученных и необлученных чехловых материалов. Отжиг материалов используется для моделирования нагрева сборок за счет остаточного энерговыделения ядерного топлива. По результатам экспериментального определения скорости коррозии материалов при отжиге в атмосфере воздуха моделируются аварийные режимы сухого хранения топливных сборок реактора БН-350.

Методика эксперимента и расчета

Объектом исследования являются образцы облученного и необлученного чехла ТВС из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т и необлученного оболочки твэла из аустенитной нержавеющей стали 0Х16Н15М3Б реактора БН-350.

При оценке коррозионной устойчивости металлов наиболее распространён гравиметрический метод [1]. Он применяется в двух вариантах: определение увеличения удельной массы образца вследствие образования продуктов коррозии на его поверхности (положительный показатель) и определение удельных потерь масс после удаления продуктов коррозии (отрицательный показатель). Положительный показатель изменения массы является основным показателем, использующимся для определения кинетики коррозионного процесса, и вычисляется по формуле:

$Km^+ = \Delta m / S \cdot \tau$

где S – суммарная площадь поверхностей образца; τ – время испытаний; Δm – разность масс образца до и после испытаний.

Если известен химический состав образующейся окалины, то по положительному показателю изменения массы Km⁺ рассчитывают отрицательный показатель изменения массы Km⁻ [2].

$$\mathrm{Km}^{-} = \mathrm{Km}^{+} \cdot \mathrm{nok} \cdot \mathrm{A}_{\mathrm{Me}} / \mathrm{nMe} \cdot \mathrm{A}_{\mathrm{ok}}$$

где A_{me} – атомная масса металла; $A_{o\kappa}$ – атомная масса окислителя; пме – валентность металла; пок – валентность окислителя.

От отрицательного показателя изменения массы Km⁻ (г/м²ч) к глубинному показателю K_п (мм/год) можно перейти по формуле:

$$K_{II} = Km^2 \cdot 8,76 / \rho_{Me}$$

где ρ_{me} – плотность металла (г/см³).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коррозионные испытания образцов чехла ТВС и оболочек твэлов реактора БН-350 проводились в электрической муфельной печи SNOL-8,2/1100, оснащенной хромель-алюмелевой термопарой, при температурах 400°С и 600°С в атмосфере. Так как были получены расчетные данные о распределении температуры в контейнере с топливными сборками реактора БН-350 в условиях сухого хранения. Расчеты показали, что в результате нагрева за счет остаточного энерговыделения температура оболочек твэлов, первого барьера на пути выхода радиоактивных продуктов деления в окружающую среду, может достигать 600°С [3].

Тип и объемная доля формируемых окислов в коррозионном слое образца влияют на скорость процесса. Поэтому необходимо экспериментально определять фазовый состав коррозионного слоя образцов. Для этого был определен фазовый состав в коррозионном слое термически состаренных образцах чехла ТВС с помощью рентгеновской дифрактометрии. На рисунке 1 и 2 приведены данные рентгеноструктурного фазового анализа коррозионного слоя образцов чехла ТВС, состаренных в атмосфере при температурах 400°С и 600°С.

Идентификация пиков отражения показала присутствие окислов железа типа Fe_3O_4 (магнетит) и Fe_2O_3 (гематит). Относительное процентное соотношение объемных долей окислов железа Fe₃O₄ к Fe₂O₃ для облученных и необлученных образцов чехла ТВС после отжига при температуре 400 °С составило примерно по 50 %. А относительное процентное соотношение объемных долей окислов железа Fe₃O₄ к Fe₂O₃ для облученных и необлученных образцов чехла ТВС после отжига при температуре 600°С составило примерно 20 % и 80 % соответственно. В аустенитных сталях железо (у – Fe) находится в состоянии у – фазы. При термическом старении у – Fe с объемноцентрированной кубической кристаллической решеткой превращается в α – Fe с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой. На дифрактограммах образцов чехла ТВС при температурах 400°С и 600°С наблюдаются линии α – Fe, что доказывает процесс прохождения термического старения.



Рисунок 1. Дифрактограмма окалины образца ТВС после отжига при температуре 400 °C в течение 12000 часов



Рисунок 2. Дифрактограмма окалины образца ТВС после отжига при температуре 600 °С в течение 5000 часов
Проведено длительное термическое старение в атмосфере необлученных оболочечных материалов. Длительность испытаний при температурах 400°С и 600°С составила ~ 12000 ч и 5000 ч. соответственно. Результаты длительного термического старения необлученных образцов оболочки твэла при температурах 400°С и 600°С представлены на рисунке 3.



Рисунок 3. Кинетика окисления необлученных образцов оболочки твэла реактора БН-350 при температурах 400 ℃ и 600 ℃

Для облегчения процедуры и повышения точности нахождения средней скорости коррозии результаты испытаний необлученных образцов оболочного материала были перестроены в логарифмических координатах (рисунок 4, 5). Оказалось, что скорость коррозии этих образцов хорошо описывается степенной зависимостью, и экспериментальные точки удовлетворительно укладываются на прямой в логарифмических координатах. Аналитические выражения этих прямых показаны на рисунке 4 и 5.

Путем преобразования этих выражений, были найдены эмпирические формулы, удовлетворительно описывающие увеличение удельной массы материала в зависимости от времени термического старения.

Необлученный образец оболочки твэла при температуре 400°С:

$$G = 0.0013 \cdot \tau^{0.3284}$$

Необлученный образец оболочки твэла при температуре 600°С:

$$G = 0,2937 \cdot \tau^{0,1810}$$

Из полученных выражений определяется удельное количество продуктов коррозии G за любое время испытаний $\tau_{i,}$ и средняя скорость коррозии Km^+ .

Результаты прогноза кинетики окисления в атмосфере образцов чехла ТВС реактора БН-350 при температурах 400°С и 600°С за 50 лет, сделанный в 2006 году показали, что удельный привес облученных образцов при 600°С был на 17% больше, чем у необлученных, а при 400°С - на 60% [4].



Рисунок 4. Скорость коррозии необлученного образца оболочки твэла реактора БН-350 при температуре 400 ℃



Рисунок 5. Скорость коррозии необлученного образца оболочки твэла реактора БН-350 при температуре 600 ℃

Учитывая, что материалы чехла ТВС и оболочки твэла однотипные можно допустить, что отношение скоростей коррозии облученных и необлученных образцов одинаковы, как для чехлового материала, так и для оболочек. В этом случае, по экспериментальным данным для облученных и необлученных образцов чехла ТВС при температурах 400°С и 600°С можно экстраполировать удельное увеличение массы облученных образцов оболочки твэла, а также построить кривую кинетики окисления за 50 лет (рисунок 6). Проведенные оценки показали, что удельный привес необлученных и облученных образцов оболочки твэла в течение 50 лет при 400°С составит ~ 0,087 мг/см² и 0,139 мг/см², а при 600°С - $3,1 \text{ мг/см}^2$ и $3,6 \text{ мг/см}^2$ соответственно. Расчетное значение глубины коррозионного слоя облученных образцов оболочек твэла реактора БН-350 после 50 лет сухого хранения показывают, что при 400°С оно составит 1 мкм, а при 600°С - 25 мкм.



Рисунок 6. Кинетика окисления образцов оболочки твэла реактора БН-350 при температурах 400 °C и 600 °C в течение 50 лет

Для определения характера и глубины коррозионного разрушения были проведены микроструктурные исследования необлученных образцов чехла ТВС и оболочек твэла. Результаты исследования представлены на рисунках 7 – 10. Из фотографии видно, что коррозия имеет равномерный характер. Никаких локальных видов коррозии по границам зерен не наблюдается. Толщина коррозионного слоя для образцов чехла ТВС после отжига при температуре 400°С и 600°С составляет ~ 1,5 мкм и ~ 2 мкм соответственно, а оболочки твэла ~ 0,5 мкм и ~ 10 мкм.



Рисунок 7. Микроструктура необлученного образца чехла ТВС после термического старения в течение 5000 ч при температуре 600 °C в атмосфере



Рисунок 8. Микроструктура необлученного образца оболочки твэла после термического старения в течение 5000 ч при температуре 600 °C в атмосфере



Рисунок 9. Микроструктура необлученного образца чехла ТВС после термического старения в течение 12000 ч при температуре 400 ℃ в атмосфере



Рисунок 10. Микроструктура необлученного образца оболочки твэла после термическогостарения в течение 12000 ч при температуре 400 ℃ в атмосфере

Заключение

• Коррозионные испытания необлученных оболочечных материалов в атмосфере показали, что кинетика окисления оболочечных материалов подчиняется степенной зависимости.

• Определен состав оксидного слоя образцов после отжига образцов при 600°С и 400°С, который состоит из магнетита (Fe₃O₄), гематита (Fe₂O₃) и альфа железа (α – Fe). Относительное процентное соотношение объемных долей окислов железа Fe₃O₄ к Fe₂O₃ для образцов чехла TBC после отжига при температуре 400°С составило примерно по 50 %, а для образцов чехла TBC после отжига при температуре 600°С составило примерно 20 % и 80 % соответственно. На дифрактограммах образцов чехла TBC при температурах 400°С и 600°С наблюдаются линии альфа железа, что доказывает процесс прохождения термического старения.

• Полученные с помощью электронного микроскопа фотографии показывают, что толщина окалины образцов необлученного чехла ТВС и оболочки твэла, образовавшейся в результате термического старения при температурах 400°С и 600°С в течение 12000 и 5000 часов соответственно, составляет примерно от 0,5 до 10 мкм. • Результаты предварительного прогнозирования коррозионного поведения оболочек твэлов реактора БН-350, первого барьера на пути выхода радионуклидов в окружающую среду, в условиях аварийного сухого хранения топливных сборок в течение 50 лет при температурах 400°С и 600°С показали, что глу-

бина корродированного слоя облученных образцов оболочек твэла при температуре 400°С за 50 лет может составить 0,001 мм, а при 600°С – 0,025 мм, что приблизительно составляет 6 % от толщины оболочки твэла.

Литература

- 1. Рачев, Х. Справочник по коррозии [Текст] / Х. Рачев, С. Стефанова, перевод с болгарского С.И. Нейкоского. М.: Металлургия, 1982. 416 с.
- 2. Лабораторные работы по коррозии и защите металлов [Текст] / Н.Д. Томашов [и др.]. М.: Металлургия, 1971. 241 с.
- 3. Отчет о научно-технической деятельности института атомной энергии: отчет за 2004 год /ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; Курчатов, 2004. – 153 с.№ К – 821 от 21.01.2008.
- 4. Изучение поведения отработавших топливных сборок ядерных реакторов при их длительном сухом хранении: отчет о НИР (промежуточ.): 02.02.05/ ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. Б.Д. Уткелбаев. – Курчатов, 2007. – 20 с. - № ГР 0207РК00907, 2007. – Инв.№ 37, 2008.

ҚҰРҒАҚ САҚТАУДЫН АПАТ РЕЖИМІН ҮЛГІЛЕЙТІН ЖАҒДАЙЫНДА, БН-350 РЕАКТОРЫНЫН ЖШЖ ҚАБЫ ЖӘНЕ ЖШЭЛ ҚАБЫҒЫ ЗАТТАРЫНЫҢ КОРРОЗИЯЛЫҚ ЗАҚЫМДАНУЫН ЗЕРТТЕУ

Уткелбаев Б.Д., Коянбаев Е.Т., Азимханов А.С.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

400°С және 600°С температураларында заттарды ұзақ термиялық қартайтудан кейін олардын микроқұрылымдық зерттеулері және тотық қабатынын рентгенқұрылымдық фазалық талдауы жүргізілді.

EXAMINATION OF CORROSIVE DAMAGEABILITY OF FA CASING AND FUEL CLADDING MATERIALS OF BN-350 REACTOR UNDER CONDITIONS SIMULATING DRY STORAGE EMERGENCY STATE

B.D. Utkelbaev, Ye.T. Koyanbaev, A.S. Azimkhanov

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

F-Ray diffraction phase analysis of corrosive layer and microstructural researches of materials after its long-term thermal aging by the temperature 400°C and 600°C are curried out.

УДК 621.039.54

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ДЕЛЯЩЕГОСЯ ВЕЩЕСТВА

Котов В.М., Дудко А.С., Иркимбеков Р.А.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе рассматривается возможность применения дополнительных источников нейтронов для повышения эффективности тепловых реакторов с высоким воспроизводством делящихся веществ. Авторы исследовали особенности использования электроядерной установки. В ней в качестве сырьевого материала используется 232 Th. Образующийся 233 Pa удаляется из зоны облучения совместно с продуктом его распада – 233 U. Такая схема исключает образование продуктов деления в электроядерной установке, а также образование неблагоприятных нуклидов обычного ториевого цикла, например 232 U. Работа электроядерной установки происходит в автономном режиме, в котором обеспечивается высокая надежность работы теплового реактора.

Основными элементами установки являются канал ввода протонов, мишень, тяжеловодный замедлитель, каналы циркуляции ториевой смеси, отражатель. Проведены расчеты нескольких вариантов, отличающихся следующими параметрами:

- расстояние между ториевыми каналами и протонной мишенью;
- количество загружаемого в каналы тория;
- изотопный состав азота в солевом варианте ториевой смеси

В лучших вариантах до 95 % образующихся нейтронов поглощается в тории. Оценена рентабельность связки "электроядерная установка и тепловой реактор. Показано, что достижимо полное использование уранового сырья при небольших затратах (до2.5%) энергии реактора на работу электроядерной установки.

Введение

В работе рассматривается возможность применения дополнительных источников нейтронов для повышения эффективности топливного цикла тепловых реакторов с высоким воспроизводством делящихся веществ. Такими дополнительными нейтронами могут быть продукты реакции протонов высокой энергии на тяжелых металлах [1], термоядерные реакторы [2, 3].

Целью данной работы является проведение расчетов электроядерной установки для достижения оптимальной эффективности производства урана - 233.

Электроядерная установка

В электроядерной установке в качестве сырьевого материала используется ²³²Th. В результате его облучения получается ²³³Pa, который удаляется из зоны облучения совместно с продуктом его распада – ²³³U. После выдержки из отстойника извлекается ²³³U.

Такая схема исключает образование продуктов деления в электроядерной установке, а также образование других неблагоприятных нуклидов обычного ториевого цикла, например 232 U [4]. Размещение 232 Th в тепловом спектре исключает реакцию n-2n. Работа электроядерной установки происходит в автономном режиме, в котором исключается воздействие отказов, возможно достаточно частых, электроядерной установки на работу теплового реактора. Тем самым обеспечивается высокая надежность работы основного элемента - теплового реактора.

Основными элементами конструкции электроядерной установки являются канал ввода протонов, мишень, тяжеловодный замедлитель, каналы циркуляции по которым прокачивается ториевая соль Th(NO₃)₄, отражатель.

На рисунке 1 предсталены два варианта компоновки электроядерной установки, различающиеся массой загружаемого тория (200 килограмм и 7200 кг).



1 – канал ввода протонов; 2 – графитовый отражатель; 3 – тяжеловодный замедлитель; 4 – каналы циркуляции ториевой смеси.

Рисунок 1. Схема электроядерной установки

Общими характеристиками для проведенных расчетов были диаметр и высота зоны тяжеловодного замедлителя равные 2 метрам и толщина графитового отражателя равная 0.5 метра.

При работе ускорителя через запаянную трубку в центральном канале беспрепятственно доставляются протоны высокой энергии к центру установки.

В свинцово-висмутовой эвтектике происходят реакции приводящие к образованию большого количества нейтронов (в нашем случае - 22) на один высокоэнергетический протон с энергией равной 1Гэв. Полученные нейтроны из центра электроядерной установки разлетаются во все стороны. Попадая в замедлитель, они термализуются, и при прохождении ториевой соли захватываются торием, приводя к образованию протактиния ²³³Ра из которого, после бета распада получается делящийся ²³³U.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

На рисунке 2 представлена зависимость поглощения нейтронов в тории от расстояния между мишенью протонов и каналом с металлическим торием. Целью данных расчетов было определить минимальное расстояние между этими объектами. Количество тория в установке равно 200 кг. При расстоянии меньшем минимального спектр нейтронов жестче и, как следствие, возникают процессы с образованием нежелательных ²³²U и ²³⁴U.

Видно, что для расположения ториевых стержней минимальным является расстояние равное семи сантиметрам от источника нейтронов.

На рисунке 3 представлено влияние изменения количества загружаемого в каналы металлического тория на эффективность производства ²³³U.



Рисунок 2. Зависимость поглощения нейтронов в тории от расстояния между ториевыми стержнями и источником быстрых нейтронов



Рисунок 3. Зависимость поглощения нейтронов в тории от массы металлического тория

Видно, что с увеличением количества тория возрастает величина поглощения. При массе тория 7200 кг была достигнута максимальная величина поглощения в тории, составившая 85%. Дальнейший рост массы тория практически не увеличивает положительный эффект.

Для обеспечения циркуляции тория в облучательном канале установки его следует использовать в виде солевого раствора. В данной работе использовалась соль Th(NO₃)₄, обладающая высокой плотностью тория и удовлетворительными технологическими характеристиками. Было замечено, что в этой соли происходит высокая вероятность поглощения нейтронов в азоте. Рассмотрена возможность замены природного азота на изотоп ¹⁵N.

На рисунках 4 и 5 показано влияние изотопного состава азота на эффективность поглощения нейтронов в тории. В солевом варианте с изотопом ¹⁵N возможно достижение максимальной величины поглощения в тории близкой к варианту с чисто металлическим торием



Рисунок 4. Зависимость поглощения нейтронов в тории от массы тория в солевом варианте с природным азотом



Рисунок 5. Зависимость поглощения нейтронов в тории от массы тория в солевом варианте с азотом на основе изотопа ¹⁵N

РАСЧЕТ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Для оценки рентабельности электроядерной установки были проведены расчеты характеристик кампаний реакторов ВВЭР-1000 и предлагаемого теплового реактора с высоким воспроизводством делящихся веществ (ТР с ВВДВ – в таблице) в вариантах с использования топлива на основе природного урана и с заменой части ²³⁵U на производимый в электроядерной установке ²³³U. Результаты расчетов приведены в таблице 1. Видно, что расходы на работу электроядерной установки, обеспечивающей замену природного 235 U на 233 U в тепловом реакторе с высоким воспроизводством делящихся веществ, составляют около 2.5 %, а для современного реактора ВВЭР-1000 при такой замене потребуется 73 % вырабатываемой им энер-

гии. При этом остатки энергии в BBЭР-1000 будут меньшими, чем в исходном варианте (без использования электроядерной установки). Этот эффект обусловлен составом топлива реакторов, в особенности, той его части, которая приходится на ²³⁵U в исходном варианте.

Габлица I

	Доля ДВ в топливе, %	Доля ²³⁵ U в ДВ, о.е.	Длительность работы, лет	Затраты энергии на ЯЭУ, %
BB3P-1000	4.40	1.0	40	0
BBЭP-1000 с ЭЯУ	4.40	1.0	120	73,0
ТР с ВВДВ	0.70	0.2	400	0
ТР с ВВДВ с ЭЯУ	0.70	0.2	3000	2,5

Заключение

В рамках проведенной работы получены следующие результаты:

1. В автономно работающей электроядерной установке можно вырабатывать ²³³U с высокой эффективностью использования нейтронов, образующихся за счет реакций протонов на тяжелых ядрах.

2. Повышение эффективности использования нейтронов достигается:

а) путем увеличения массы тория в установке;

б) путем замены природного азота в ториевой смеси на азот, обогащенный изотопом ^{15}N ;

в) оптимизацией величины зазора между стенкой источника быстрых нейтронов и стенкой ториевого канала.

3. Увеличение массы тория в установке ведет к росту его расхода в контуре циркуляции при заданном времени пребывания тория в электроядерной установке. Ведутся расчеты по определению оптимальной массы тория в установке.

4. Производство ²³³U в электроядерной установке более технологично, чем в объемных источниках нейтронов на основе термоядерных реакторов.

Литература

- 1. Гулевич, А. В. Многоцелевая электроядерная система на базе подкритического реактора, управляемого ускорителем электронов/ А.В. Гулевич, Е.А. Земсков, О.Г. Комлев, О.Ф. Кухарчук, К.Г. Мельников, Н.Н. Новикова, О.Г. Фокина, В.В. Чекунов // Журн. атомная энергия. 2007. Т. 102, № 2. С. 92-98.
- Kotov, V. M. Liquid-salt channel-tipe reactor with dynamic loading and core superposition. / V.M.Kotov, S.V.Kotov, Zh.S.Takibaev, L.N.Tikhomirov// Plasma Devices and Operations. – 2005. - V. 13, № 3. – S. 213-221.
- Kotov, V. M. Application of volume neutron source to enhance the use of fertile materials in nuclear power at thermal reactors/ V.M.Kotov // Plasma Devices and Operations. – 2007. - V. 15, № 3, S. 219-224.
- 4. Матвеев, Л. В. Уран 232 и его влияние на рад обстановку в ядерном топливном цикле/ Л.В.Матвеев, Э.М. Центер. М. : Энергоатомиздат, 1985.

БӨЛІНЕТІН ЗАТТАРДЫ ӨНДІРУ ҮШІН ЭЛЕКТРЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР ЕСЕБІ

Котов В.М., Дудко А.С., Иркимбеков Р.А.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Жоғары қайта өндірілетін бөлінетін заттармен жылу реакторларының тиімділігінің жоғарлату үшін нейтрондардың қосымша қайнар көздерін қолдану мүмкіндігі жұмыста қарастырылады. Электроядролық қондырғыларды пайдалану ерекшелігін авторлар зерттеді. Онда ²³²Th шикізатты материал сапасында пайдаланылады. Жасалған ²³³Pa сәулулуну белдеуінен оның – ²³³U ыдырау өнімімен бірге шеттетіледі.Бұндай схема электрядролық қондырғыда бөліну өнімінің пайда болуының шығарады, кәдімгі торилы циклде жағдайсыз нуклидтердің пайда болуы, мысалда ²³²U. Жылу реактордың жоғары сенімділік жұмысы қамсыздандырылады, электрядролық қондырғы жұмысы автономды режимінде болады. Қондырғының негізгі элементтері болып табылады протондарды енгізу каналы, нысана, ауысулы баяулатқыш, торилы қоспаның циркуляция каналы, шағылыстырғыш.

Келесі параметрлармен айыра танылатын бірнеше нұсқаларының есептемелері жүргізілді:

- протонды нысана мен торилы каналдар арасындағы аралық;
- торий каналына жүктелген саны;
- торилы қоспаның соелы нұсқада изотопты азот құрамы

Жақсы нұсқаларда ториде 95 % дейін жасалған нейтрондар жұтады. Жылу реакторы және электрядролық кондырғылар байламының тиімділігі бағаланды. Электрядролық кондырғы жұмысына (2.5% дейін) реактор энергиясын көп емес шығындарда уранды шикізатты толық пайдалану жетістігі көрсетілді.

CALCULATION OF THERMONUCLEAR FACILITY FOR PRODUCING OF FISSION MATERIAL

V.M. Kotov, A.S. Dudko, R.A. Irkimbekov

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

In this work possibility of additional neutron sources for thermal reactors efficiency increasing with high production of fission materials is considered. The authors researched special features of electronuclear facility usage. As the raw material 232 Th is used in it. Formed 233 Pa is removed from radiation zone together with its delay product – 233 U. Such scheme excludes formation of fission products in electronuclear facility, and also forming of unfavorable nuclides of usual thorium cycle, for example 232 U. Work of electronuclear facility is happened in autonomous mode, in which high reliability of thermal reactor operating is provided.

The basic elements of the facility are proton entrance channel, target, heavy-water moderator, circulation channels of thorium mixture, reflector. Calculations of several variants are performed differ by the following parameters:

- distance between thorium channels and proton target;
- quantity of thorium loaded in channels;
- isotopic nitrogen composition in saline variant of thorium mixture

In the best variants up to 95 % of formed neutrons are absorbed in thorium. Profitability of connection "electronuclear facility and thermal reactor" is estimated. It is shown that full usage of uranium raw material is reachable under small expenses (up to 2.5%) of reactor power for electronuclear facility operating.

УДК 539.21;539.12.04

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В ТОНКОСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ ВеТі

Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Иманбеков Ж.Ж., Слюсарев А.П., Антонюк В.И.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Целью работы является получение и исследование нового материала на основе интерметаллидов, стойкого к образованию гидридов и карбидов при повышенных температурах.

Исследованы образцы с Ве-Ті покрытиями с требуемым соотношением концентраций компонент и образцы с метастабильными диффузионными слоями бериллидов титана ВеТі и Ве₂Ті. Получены данные по стабилизации твердого раствора Ве в β-Ті при комнатной температуре и определены режимы обработки получения интерметаллидов ВеТі и Ве₂Ті. Обнаружено влияние состава слоистых структур на процесс гидрирования и процесс карбидизации Ті.

Введение

Одной из важных перспективных задач физического металловедения является создание многофункциональных металлических систем с изменяющимися по глубине свойствами - от коррозионно и радиационно- стойких приповерхностных слоев до механически и термически прочного основного материала.

Успешное решение задачи по строительству реактора управляемого термоядерного синтеза упирается в проблему выбора подходящих материалов для узлов реактора, его рабочей камеры и особенно её первой стенки, как наиболее напряженных узлов, испытывающих как воздействие термоядерной плазмы, так и воздействие теплоносителя и излучения со стороны бланкета термоядерного реактора. Предполагается, что первая стенка термоядерного реактора будет выполнена в виде композита из нескольких слоев, каждый из которых будет выполнять определенные функции. Фронтальный (первый) слой материала должен иметь малый атомный номер и высокое сопротивление радиационной эрозии. Промежуточный слой должен нести основную прочностную нагрузку и обладать высокой радиационной стойкостью. Наконец, наружный слой должен иметь высокое сопротивление коррозии в данном теплоносителе, обладать совместимостью с тритийсодержащими средами. Весьма перспективными материалами первой стенки являются бериллий и его сплавы. В этом плане представляют интерес сплавы системы Ве-Ті, об уникальных свойствах каждого из компонентов известно достаточно много [1-5].

Основные достоинства бериллия и его сплавов: легкость, прочность, жесткость, высокая теплоемкость, жароупорность, малое поглощение γ - лучей, малое эффективное сечение захвата тепловых нейтронов. Однако бериллий обладает и рядом недостатков: хрупкость, токсичность, склонность к образованию трещин, плохая обрабатываемость, легко окисляется при низком вакууме, а распыляемость его хуже, чем у нержавеющей стали и алюминия.

Также широкое распространение в атомной энергетике получил титан, который наиболее часто применяют в биологической защите. Титан эффективно поглощает γ - излучение, а также обладает прочностью и небольшим весом. Распыляемость титана более чем в два раза меньше чем у бериллия. Обладает высокой химической и коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, что выгодно отличает его от таких общеизвестных конструкционных материалов, как алюминий и его сплавы, нержавеющая сталь, сплавы на никелевой основе и другие.

К недостаткам титана можно отнести его склонность к образованию гидридов.

Перспективность исследований тонкослойной системы Ве - Ті обусловлена возможным использованием полученных теоретических и экспериментальных данных в технологических процессах создания соединений и сплавов бериллия для применения в атомной и термоядерной энергетике.

Целью данной работы является получение и исследование нового материала, стойкого к образованию гидридов и карбидов в интервале температур 400-600°С.

Эксперимент и результаты исследования

Для получения и исследования тонкослойной сислемы Be-Ti применялись следующие методики: прокат, магнетронное напыление, вакуумные изотермические и изохронные отжиги, рентгенографические исследования, в том числе высокотемпературная рентгенография.

На первом этапе работы методом высокотемпературной ренгенографии изучались три вида образцов системы Be-Ti с различным содержанием Be, полеченные методом магнетронного напыления на подложках из поликора и на медной фольге. Параметры этих образцов приводятся в таблице 1.

Высокотемпературная дифрактометрия позволяет исследовать фазовые превращения, структурные изменения непосредственно в процессе нагревания, изучать симметрию и структуру фаз, существующих только при повышенных температурах, полиморфные превращения [6]. Для изучения образцов при температурах выше комнатной необходимо нагревать образец, измерять и регулировать его температуру, вакуумировать рабочий объем камеры, облучать образец пучком рентгеновских лучей и регистрировать образующуюся дифракционную картину. Всем этим условиям удовлетворяет высокотемпературная вакуумная камера TC-basic с ленточным нагревателем из тантала и максимально достижимой температурой 1400°С, которая установлена на дифрактометре D8 ADVANCE.

N⁰	Обозначение	Содержание Ве, ат.%	Толщина d Be, мкм	Материал подложки	Толщина d подложки
1	Be-Ti-1п	27.4	1	Al ₂ O ₃	1мм
2	Ве-Ті-1м	27,4	I	Cu	17мкм
3	Be-Ti-2n	19.4	1 16	Al ₂ O ₃	1мм
4	Ве-Ті-2м	40,4	1.18	Cu	17мкм
5	Be-Ti-3n	71.0	0.77	Al ₂ O ₃	1мм
6	Ве-Ті-Зм	71,0	0,77	Cu	17мкм

Таблица 1. Параметры образцов тонкослойной системы Ве-Ті

Образцы подвергались отжигу в вакууме $3 \cdot 10^{-5}$ Торр в интервале температур от комнатной до 1400°С через 100°С с выдержкой в каждой температурной точке в течение одного часа. Временная выдержка проводилась для приведения образца в равновесное состояние, соответствующее данной температуре. После выдержки проводилась запись дифрактограммы в каждой температурной точке, затем температура снижалась до комнатной и снова снималась дифрактограмма.

На втором этапе работы методом проката были получены образцы из титановой фольги различной толщины: 8; 10; 14; 28; 45; 50мкм. На этих образцах методом магнетронного напыления были получены одно и двухсторонние покрытия Ве толщиной 1,3 мкм и 2 мкм. Были проведены вакуумные изотермические отжиги (при T=500°C и p=4·10⁻⁶ мм.рт.ст.) двух образцов. Параметры исследуемых образцов приводятся в таблице 2. Образец №15 отжигался с закалкой, образец №23 без закалки. Общее время отжига одного образца составило 75 часов.

Таблица 2. Параметры образцов тонкослойной системы Be-Ti

№ образца	Толщина d Be, мкм	Толщина d Ti, мкм
№ 15	2	10
Nº 23	2	8

Для получения рентгенографическими методами экспериментальных данных по процессам диффузии и фазовым превращениям в двухслойной системе Ве – Ті регистрировались дифрактограммы в геометрии Брэгга-Брентано и в геометрии параллельного пучка. Анализ образца проводился со стороны Ве – слоя и Ті – подложки.

Снималась обзорная дифрактограмма в широком диапазоне углов дифракции для контроля изменения фазового состава и перекристаллизации материала подложки и слоя. Проводилась запись с увеличенным временем накопления дифракционного сигнала (5 с) диапазонов дифрактограммы с выбранными рефлексами для определения положения центра тяжести и площади дифракционного пика.

Этот цикл измерений проводился после нанесения Ве – слоя на Ті – подложку и после каждого последовательного этапа изотермического отжига. Такой комплексный подход при рентгенодифрактометрическом изучении диффузии и фазовых превращений в слоистой системе Ве - Ті в процессе термических отжигов позволяет контролировать исходное структурное состояние материала Ті – подложки, особенности перекристаллизации титана на двух сторонах в процессе отжига, отслеживать изменение положения, интенсивности и формы дифракционных отражений, связанное с диффузией бериллия.

По литературным данным в системе Ве-Ті существуют шесть интерметаллических соединений: Ті Ве₂, Ті Ве₃, α -Ті₂ Ве₁₇, β -Ті₂ Ве₁₇, Ті Ве₁₂, Ті Ве [7]. Относительно образования ТіВе нет единого мнения. В одних работах показано образование гексагонального соединения ТіВе, в других не подтверждается. В работе [8] показано существование ТіВе с кубической структурой.

Исследования тонкослойной системы Be-Ti на подложке из поликора

Предварительные исследования влияния вакуумных отжигов на структурно-фазовое состояние полученных композиционных покрытий на поликоре показали, что при температуре 500°С происходит кристаллизация α -Ті и стабилизация твердого раствора Ве в α -Ті, а при температуре 800°С происходит стабилизация твердого раствора Ве в β -Ті для первого образца Ве-Ті-1п (27.4 ат. % Ве). Для второго образца Ве-Ті-3п (71 ат. % Ве) этого не наблюдается.

На рисунке 1 показана последовательность фазовых превращений в образцах Ве-Ті-1п и при изохронных отжигах.



Рисунок 1. Последовательность фазовых превращений в образце Be-Ti-1n при изохронных отжигах

При гидрирование первого образца Be-Ti-1м (27.4 % ат. Be) в атмосфере водорода предварительно аморфный титан начинает кристаллизоваться в виде гидрида титана TiH_{1,924}.

На дифрактограмме второго образца Ве-Ті-2м (48,4 % ат. Ве) на Си-фольге после гидрирования наблюдаются только дифракционные отражения медной подложки.

В процессе гидрирования третьего образца Be-Ti-3м (71 % ат. Be) образуется бериллид меди BeCu. На дифрактограмме этого образца после гидрирования проявляется рефлекс бериллида меди BeCu, свидетельствующий о диффузии бериллия из напыленного слоя в медную подложку. Дифракционные линии титана, бериллидов и гидридов титана не проявляются, как в объеме, так и в поверхностном слое образца.

Исследования двухслойной системы Ве-Ті

По результатам анализа дифрактограмм каждой временной точки отжига образцов №15 и №23 были построены графики изменения интенсивности пиков со временем следующих фаз: BeTi, Be₂Ti, Ti, TiC.

Из рисунка 2а видно, что после 20 часового отжига образца №15 происходит стабилизация структуры Ті, после чего концентрация Ті начинает уменьшаться. Это связано с образованием интермиталлидов ВеТі и Ве₂Ті (рисунок 3). В образце №23 (без закалки) Ве₂Ті не образуется.

Уменьшение Ве на поверхности исследуемых образцов (рисунок 2б) обусловлено Диффузией Ве в Ті и дальнейшим образованием интерметаллидов ВеТі, Ве₂Ті и твердого раствора Ве в Ті.

Защитные свойства бериллида титана BeTi от карбидизации титановой подложки видно на рисунке 4а. В образце №15 со стороны бериллиевого покрытия (A-side) не происходит карбидизации титана, а со стороны титановой подложки (B-side) четко видно образование TiC. Образование TiC в образце №23 (рисунок 4б) объясняется распадом BeTi к концу отжигов.

Таким образом, как показали наши предварительные исследования интерметаллид BeTi защищает титан не только от гидрирования, но и от карбидообразования.

Полученные методом диффузии опытные образцы с метастабильными слоями бериллида титана ВеТі в дальнейшем будут испытаны в атмосфере водорода.





Рисунок 2. Изменение интенсивности пиков Ti(a) и Be(б) в образцах №15 и № 23

Рисунок 3. Образование ВеТі (а) и Ве₂Ті (б) в образцах №15 и № 23



Рисунок 4. Образование карбида титана TiC в образцах №15 (а) и №23 (б)

Заключение

В результате проведения работы, получены Be-Ti композиционные покрытия с требуемым соотношением концентраций компонент. Проведены высокотемпературная вакуумная обработка Be-Ti покрытий на различных подложках с целью образования твердого раствора Be в α- и β-сплавах Ti и термическая обработка полученных структур в среде водорода.

Получены впервые данные по стабилизации твердого раствора Ве в β -Ті при комнатной температуре на подложке из поликора. Установлены оптимальные температурные режимы обработки для получения интермиталлида BeTi. Представлены результаты комплексного исследования по гидрированию структур, полученных в системе Be-Ti на мед-

ной подложке при термической обработке в среде водорода.

Впервые обнаружено влияние концентрационного состава слоистых структур на процесс гидрирования.

Получены методом диффузии опытные образцы с метастабильными слоями бериллида титана ВеТі на подложке из титановой фольги. Обнаружено, что полученное покрытие из бериллида титана BeTi защищает титан от карбидизации.

Эти результаты имеют большое практическое значение для создания покрытий, защищающих материалы и изделия от наводороживания и карбидизации. Полученные данные окажут определенный вклад при разработке новых конструкционных материалов для ядерной и термоядерной энергетики.

Литература

- 1. Титан и его сплавы / МЭП. М., 1970. 76 с.
- 2. Бериллий, его соединения и сплавы / ГОСИНТИ. М., 1964. 94 с.
- 3. Папиров, И. И. Структура и свойства сплавов бериллия / И. И. Папиров. М.: Энергоиздат, 1981. 368 с.
- 4. Кадыржанов, К. К. Бериллий в термоядерной энергетике. Препринт / К. К. Кадыржанов [и др.] Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2004. № 26. 97 с.
- 5. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. М.: Металлургиздат, 1962. Т. 1, 2.
- 6. Финкель, В. А.: Высокотемпературная рентгенография металлов / В. А. Финкель. М.: Металлургия, 1968. 345 с.
- Барабаш, О.М. Структура и свойства металлов и сплавов. Кристаллическая структура металлов и сплавов. Справочник / О. М. Барабаш, Ю. Н. Коваль. – Киев: Наукова Думка. 1986.- с. 290-292.
- 8. Tanner, L. Giessen Metall. Trans / L. Tanner . A., 1978. Vol. 9. P. 67.

ЖҰҚА ҚАБАТТЫ ВЕТІ ЖҮЙЕСІНДЕ ФАЗА ТҮЗІЛУ

Поляков А.Н., Поддубная Е.В., Иманбеков Ж.Ж., Слюсарев А.П., Антонюк В.И.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Жоғарылаған температуралар кезінде гидридтер мен карбидтердің пайда болуына бекем келетін интерметаллидтер негізінде жаңа материал алу және зерттеу осы жұмыстың мақсаты болап табылады.

Құрауыштар концентрациясыны талап етілетін арақатыстықтағы Ве-Ті жабындылады бар үлгілер және ВеТі мен Ве₂Ті титан бериллидтерінің метатұрлаулы диффузиялық қабаттары бар үлгілер зерттелген. Бөлме температурасында β-Ті-де Ве қатты ерітіндісінің тұрлаулылануы бойынша деректер алынған және ВеТі мен Ве₂Ті интерметаллидтерін алудың өңдеу режімдері анықталған. Ті-ді гидридтеу процессі мен карбидтеу процессіне қабатты құрылымдар құрамының ықпалы табылған.

PHASE FORMATION IN THIN-LAYER TO SYSTEM BETI

A.N. Polyakov, E.V. Poddubnaja, J.J. Imanbekov, A.P. Sljusarev, V.I. Antonjuk

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

The purpose of operation is deriving and examination of a new material on the basis of intermetallic, resistant to formation of hydrides and carbides at the increased temperatures.

Exemplars with Be-Ti coats with a demanded relation of concentrations of components and exemplars with metastablese diffusion stratums beryllides titanium BeTi are explored and Be_2Ti . data on stabilization of solid solution Be in β -Ti are obtained at a room temperature and treatment schedules of deriving of intermetallic BeTi and Be₂Ti are certain. Influence of composition of layer structure on process of hydrogenation and process carbidation Ti is revealed.

УДК 550.34.064

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

По данным инфразвуковой станции IS31-Актюбинск выделен ряд постоянно действующих источников сигналов, наиболее представительным из которых является факел сжигания попутного газа на месторождении Жанажол. Выдвинуто предположение о природе второго по представительности источника – микробаромы, генерируемые океаническими штормами. Идентифицированы сигналы от взрывов в карьерах и запусков ракет. Предложена предварительная блок-схема автоматического распознавания природы источников регистрируемых инфразвуковых сигналов.

Введение

Прошло уже 7 лет со времени ввода в эксплуатацию на северо-западе Казахстана инфразвуковой станции IS31 Актюбинск. Станция входит в состав Международной системы мониторинга Организации по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ) и представляет собой группу с апертурой 2 км, состоящую из 8 микробарометров МВ2000 [1]. Станция ведет регистрацию инфразвуковых колебаний в непрерывном режиме. Данные, по спутниковому каналу в режиме реального времени передаются в Международный центр данных (МЦД) (г. Вена), а затем в Казахстанский центр данных (г. Алматы), где они систематически обрабатываются и анализируются. Наиболее актуальной задачей в связи с повышением эффективности работы станции является идентификация источников регистрируемых инфразвуковых сигналов.

Методика обработки данных

Последние 3 года в записях станции в автоматическом режиме ведется поиск когерентных сигналов. Алгоритм поиска определен применяемым методом прогрессивной многоканальной корреляции (PMCC, CEA-DASE-LDG, France) [2]. Главное достоинство метода заключается в его способности выделять посредством поиска взаимной корреляции между записями разных элементов инфразвуковой или сейсмической группы сигналы, регистрируемые не одним, а несколькими ее элементами. Кроме того, метод позволяет находить сигналы от постоянно действующих источников. За это время удалось обнаружить порядка 470 000 детектирований.

Анализ накопленных данных позволил составить представление об источниках инфразвука, сигналы которых регистрирует станция. На рисунке 1 приведены гистограммы азимутального распределения регистрируемых событий за октябрь 2005 г., которые четко показывают, что существуют направления, по которым когерентные сигналы приходят регулярно.



Рисунок 1. Гистограммы азимутального распределения детектирований за октябрь 2005 г.

Детектирования сигналов от этих постоянно действующих источников превалируют в бюллетенях. Идентификация природы таких источников очень важна, во-первых, для обеспечения автоматического распознавания детектирований источников в бюллетенях, во-вторых, - для изучения строения атмосферы. Однако, в отличие от сейсмологической практики, когда азимут прихода волны может быть определен по разнице времен ее прихода на разные элементы группы, а эпицентральное расстояние - по разности времен прихода продольной и поперечной волн, в практике инфразвукового мониторинга локализация источника сигналов по данным только одной инфразвуковой группы невозможна. Азимут прихода инфразвукового сигнала может быть определен, но эпицентральное расстояние не может быть определено, так как поперечные волны (волны сдвига) не распространяются в газообразной атмосфере, имеющей к тому же непостоянное строение. В этой связи для локализации инфразвуковых источников необходимо привлечение дополнительной информации.

Одним из источников такой дополнительной информации явились космические снимки. Изучение космоснимков в направлениях, по которым на станцию регулярно приходят сигналы, позволяет определить вероятные места генерации сигналов. Так, достаточно хорошо дешифрируются на снимках карьеры, промышленные взрывы в которых регулярно записывают сейсмические и инфразвуковые станции сети НЯЦ РК. Гистограмма азимутального распределения детектирований (рисунок 1 а) показывает, что подавляющее большинство сигналов, регистрируемых станцией, имеет азимут прихода 185° -195°. Гипотеза о природе источника этих сигналов была представлена в 2006 г. на Конгрессе по инфразвуковым технологиям (Infrasound Technology Workshop, 2006) в г. Фербенкс (Аляска) [3]. Основываясь на изучении космических снимков территории вокруг станции, было сделано предположение, что источником является группа газовых факелов месторождения Жанажол. Изучение свойств детектируемого сигнала также подтверждало выдвинутую гипотезу. Была найдена обратная корреляция между периодами, когда сигнал уверенно детектировался и периодами, когда сила ветра превышала определенное пороговое значение. Этот факт позволил сделать вывод, что сигнал генерируется постоянно. Было также обнаружено уменьшение амплитуды сигнала после ввода в эксплуатацию 5 октября 2005 г. газопровода Жанажол - КС13, отводящего часть попутного газа от месторождения.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Временный технический секретариат ОДВЗЯИ и Комиссариат по атомной энергии Франции проявили большой интерес к проверке выдвинутой гипотезы. Усилиями вышеназванных организаций совместно с Институтом геофизических исследований НЯЦ РК осенью 2007 г. был проведен полевой эксперимент. В Западном Казахстане в пределах сейсмической станции Акбулак в дополнение к инфразвуковой станции IS31-Актюбинск была установлена временная четырехэлементная инфразвуковая группа [4]. Микробарометры были расположены на оголовках приборных скважин АВК01 – АВК04. Сигнал изучаемого источника регистрировался с 13 сентября 2007 г. по 28 ноября. На рисунке 2 показаны азимуты на источник для всех детектирований по станции IS31-Актюбинск (голубые ромбы) и по временной инфразвуковой группе Акбулак (красные квадраты) за 20 октября 2007 г.



Рисунок 2. Азимут на источник всех сигналов, детектированных инфразвуковыми станциями IS31-Актюбинск и Акбулак. 20 октября 2007 г.

Из рисунка 2 видно, что подавляющее большинство сигналов, детектированных станцией IS31-Акбулак, имеет азимуты 187°, а станцией Акбулак -240°. Эти азимуты совпадают с направлениями от соответствующих станций на месторождение Жанажол. Таким образом, полевой эксперимент однозначно подтвердил выдвинутую гипотезу об источнике инфразвукового сигнала – факелах сжигания попутного газа месторождения Жанажол.

Как показывает рисунок 1 б, второй по представительности сектор гистограммы лежит в пределах 285°- 330°. Скорее всего, источником сигналов данного направления являются микробаромы - из класса атмосферных инфразвуковых волн, генерируемых морскими штормами [5]. Об этом могут свидетельствовать длительные перерывы в их регистрации и высокие кажущиеся скорости прихода сигналов. Представляется необходимым в будущем изучить корреляционную связь между периодами генерации этих сигналов и наличием сейсмических сигналов - микросейсм, приходящих в это же время из этих же регионов. По другим направлениям, как показывает гистограмма на рисунке 1 в, регулярно приходит сравнительно немного сигналов. Среди них представляется возможным выделить сигналы от карьерных взрывов, запусков ракет.

Карьерные взрывы. Наиболее изученным типом сигналов инфразвука в районе расположения стан-

ций являются карьерные взрывы. Проведенный осенью 2007 г. эксперимент с регистрацией сигналов временной инфразвуковой группы, установленной непосредственно на элементах сейсмической группы Акбулак, позволил локализовать источники по данным этих двух инфразвуковых групп. На рисунке 3 приведен пример записи карьерного взрыва, произведенного 25 октября 2007 г., тремя станциями: инфразвуковой IS31-Актюбинск, сейсмической Акбулак и временной инфразвуковой Акбулак.



8 трасс – записи сисмической группы IS31-Актюбинск; последние 4 трассы – записи временной инфразвуковой группы Акбулак

Рисунок 3. Пример записи карьерного взрыва 25.10.2007 г.

Первые же попытки локализовать источники показали, что с хорошей точностью локализуются взрывы в карьерах с известными координатами. Это - карьеры месторождений медно-колчеданных руд Домбаровский, 50 лет Октября и Джусинское. На рисунке 4 показаны определенные по космоснимкам положения карьеров и результаты локализации взрывов в этих карьерах по данным двух инфразвуковых групп.



Рисунок 4. Результаты локализации карьерных взрывов по данным инфразвуковой группы IS31 и временной инфразвуковой группы Акбулак

Запуски космических аппаратов. Станция IS31-Актюбинск часто регистрирует запуски ракет с космодрома Байконур. Сигналы от запусков имеют специфическую форму и большую, по сравнению с карьерными взрывами, длительность. Такие сигналы легко находятся в бюллетенях, т.к. время запусков публикуется в средствах массовой информации.

Выводы

Идентифицирован источник инфразвука, регистрируемый станцией IS31-Актюбинск - первый по представительности детектирований в бюллетенях. Предполагается, что вторыми по представительности являются детектирования микробаром. Исследование этой гипотезы и использование накопленной информации о сигналах от карьерных взрывов и запусках космических аппаратов позволят перейти к практической реализации автоматизированного распознавания источников сигналов, регистрируемых станцией.

На рисунке 5 показана предварительная блоксхема распознавания инфразвуковых сигналов в автоматическом режиме.

Процесс распознавания строится на совместном использовании инфразвуковых и сейсмических данных (IS31-Актюбинск, Акбулак). Для определения критериев распознавания также широко использованы результаты эксперимента с использованием временной инфразвуковой группы. Как показано на блок-схеме, при распознавании учитываются такие параметры детектирований как длительность, наличие сейсмических фаз и повторяемость в течение года. Реализация схемы автоматического распознавания событий могла бы позволить легко выделить сигнал, случайно обнаруженный 20 октября 2007 года. На рисунке 2 (район 20 час.) видно, что регистрация сигналов газовых факелов обеими станциями прекратилась. Вместо этого началась регистрация другого источника, по-видимому, значительно большей мощности, чем факелы месторождения Жанажол, что привело к временному прекращению регистрации их сигналов. Волновые формы сигнала представлены на рисунке 6. В информационных сводках Департамента по мобилизационной подготовке, гражданской обороне, организации предупреждения и ликвидации аварий и стихийных бедствий г. Алматы была найдена следующая информация [6]: «...Взрывы газа: Западно-Казахстанская область, Джангалинский район, пос. Жанаталап, САЦ-2. 21.10.2007 в 00 ч. 25 мин. по предварительной информации на 976 км магистрального газопровода при давлении 40 кг/см² произошел свищ (разрыв) с последующим возгоранием, в результате чего был отключен участок с 958 км по 981 км. В 02 ч 26 мин горение прекратилось, подача газа потребителям подавалась по резервным линиям...».



Рисунок 5. Предварительный алгоритм распознавания природы инфразвуковых сигналов



Рисунок 6. Волновые формы сигнала от взрыва магистрального газопровода «Средняя Азия – Центр 2» 20 октября 2007 г.

Соответствие времени и направления свидетельствуют о том, что станции действительно зарегистрировали последствие разрыва газопровода.

Таким образом, информация, накопленная за много лет работы казахстанской станции Международной системы мониторинга ОДВЗЯИ, данные установленной осенью 2007 г. временной инфразвуковой группы, а также проведенные исследования позволяют подготовить переход к автоматизированному распознаванию природы сигналов, регистрируемых станцией IS31-Актюбинск.

Литература

- Демин, В.Н. Новая инфразвуковая станция международной системы мониторинга ОДВЗЯИ Актюбинск (IS31) / В.Н. Демин, В.Г. Кунаков, А.А. Смирнов // Мониторинг ядерных испытаний и их последствий: тезисы докладов. Междунар. конф., Боровое, Казахстан: 12 – 16 августа 2002 г. - Курчатов, 2002. - С. 11.
- 2. Cansi, Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method / Y. Cansi // Geophysical research letters. May 1, 1995. Vol. 22, №. 9. P. 1021-1024.
- Smirnov, A. Identification of the Oil-well Gas Flair Group as a Unique Infrasound Source Using I31KZ Data / A. Smirnov // 2006 Infrasound Technology Workshop. Fairbanks, Alaska. – 25 – 28 September 2006.
- Smirnov, A. Preliminary Results of Localization and Characterization of Steady Infrasound Source as Detected by I31KZ / A. Smirnov [et al] // 2007 Infrasound Technology Workshop. Tokyo, Japan. – 13 – 16 November 2007.
- Staff (2003). Microbarom / Mcgraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms. New York: McGraw-Hill. ISBN 007042313X.
- 6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.almatyzashhita.kz/index.php?newsid=863.

ИНФРАДЫБЫСТЫҚ СИГНАЛДАР КӨЗДЕРІН СӘЙКЕСТЕНДІРУ

Дубровин В.И., Смирнов А.А.

КР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Бірқатар тұрақты көздері айқындалған, олардың біреуі, ен сенімдісі, Жаңажол кенорнының бағыттас газдарын өртеу шырағы болып табылады. Анықтығы бойынша 2-інші болатын көздің тегі туралы болжауы ұсынылған – мұхит дауылдары, өндірілетін микробаромдары. Карьерлардағы жарылыстарынан және ракеталарды жіберуінен сигналдары сәйкестендірілген. Инфрадыбысты сигналдар көзінің тегін автоматты тануының алдын ала блок сұлбасы келтірілген.

IDENTIFICATION OF INFRASOUND SIGNALS SOURCES

Dubrovin V.I., Smirnov A.A.

Institute of Geophysical Researches NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

According to IS31 Aktyubinsk infrasound station data a range of permanent active signal sources was revealed. The most representative is gas flair of Zhanazhol oil and gas deposit. It was hypothesized that the second source are oceanic storms generating microbaroms. Signals from explosions and rocket launches were identified. A preliminary block diagram of automatic identification of the infrasound signals sources nature was proposed.

УДК 550.344

МАГНИТУДНЫЕ ПОПРАВКИ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НЯЦ РК

Михайлова Н.Н., Мукамбаев А.С.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Впервые изучены магнитудные поправки к данным станций сети Национального ядерного центра Республики Казахстан для событий, происходящих на территории трех полигонов Центральной Азии: Лобнор (Китай), Похаран (Индия), Чагай (Пакистан). Установлено систематическое занижение значений магнитуды mb на 0,41 (\pm 0,10) по определениям REB (Reviewed event bulletin - каталог Международного центра данных) относительно бюллетеней NEIC (National Event Information Center - каталог Геологической службы США) и КNDC (Казахский национальный центр). Магнитудные поправки по станций Боровое относительно NEIC близки к нулю, что позволяет в дальнейшем при магнитудных оценках принять эту станцию в качестве опорной. Рекомендовано провести исследования по созданию единой региональной калибровочной кривой (до Δ =2000 км).

Введение

Определение магнитуд является очень важным аспектом ядерного мониторинга по двум причинам. Во-первых, на определении магнитуд по продольным mb и поверхностным M_s волнам базируется оценка мощности подземных ядерных взрывов (ПЯВ). Этот метод оценки приведен в [1, 2], где дается теоретическое обоснование и экспериментальная проверка предположения о том, что совместное рассмотрение магнитуд m_b и M_s взрыва позволяет оценить сейсмическую эффективность ПЯВ, а, следовательно, уточнить его мощность. Во-вторых, определение магнитуд важно, поскольку магнитудные отношения являются одним из важнейших дискриминантов для распознавания взрывов и землетрясений. В основу этого дискриминанта положена различная природа возбуждения взрывов и землетрясений. При взрыве возбуждаются более интенсивные высокочастотные продольные волны, а при землетрясениях - низкочастотные поверхностные. Указанные спектральные различия удобно оценивать по разности магнитуд m_b - M_s.

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТУДНЫХ ПОПРАВОК ДЛЯ СТАНЦИЙ НЯЦ РК ОТНОСИТЕЛЬНО КАТАЛОГОВ МЕЖДУНАРОДНЫХ ЦЕНТРОВ ДАННЫХ

Известно, что оценка магнитуды сейсмического события подвержена сравнительно большой дисперсии, что связано с особенностями распространения волн, взаимным расположением станций и источника. Влияют также характеристики аппаратуры и условия под станцией. В практике большинства сейсмических служб оценку магнитуды осуществляют по нижеследующей схеме:

 $m = lg (A/T) + \sigma (\Delta) + \delta_m(h) + \delta_m c_T,$

где: А/Т – максимальная колебательная скорость в определенной группе волн, σ (Δ) – эмпирическая функция затухания, $\delta_m(h)$ – поправка за глубину источника, δ_m ст – станционная поправка.

Наиболее широкое распространение получили шкалы по mb и Ms волнам. Измерения проводятся на

записях вертикальной компоненты для магнитуды m_b - в группе волн Рg или Р, для магнитуды M_s - в группе поверхностных волн Релея. Как правило, для определения магнитуды m_b на телесейсмических расстояниях используется калибровочная функция [3]. На региональных расстояниях расчет магнитуд производится с использованием региональных калибровочных функций, хотя такие функции имеются не для всех районов. В Казахстане для определения MPV(аналог m_b) используется калибровочная кривая, разработанная Михайловой Н.Н., Неверовой Н.П. [3]. Однако эта кривая действительна для диапазона расстояний 0 - 1000 км, поэтому параллельно с Мру определяется m_b, так как часть станции НЯЦ РК для одного события находится на расстоянии более 1000 км. Поправка $\delta_m(h)$ необходима только для глубоких землетрясений. В пределах глубин земной коры пользуются обычно одной калибровочной кривой.

Станционные поправки отражают целый ряд эффектов, не всегда имеющих достаточно убедительные объяснения. Это - влияние грунтовых условий в месте установки сейсмоприемников, геологического строения более глубоких толщ, особенностей поглощения сейсмических волн вдоль определенных трасс и др. Станционные поправки изучают как интегрально для всех событий, зарегистрированных данной станцией, так и для конкретных трасс «станция-источник». Для станций сети НЯЦ РК такая работа ранее не проводилась, поскольку сеть функционирует сравнительно недавно и статистика событий только набирается. В настоящей работе приведены первые результаты исследований магнитудных поправок.

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТУДНЫХ ПОПРАВОК ДЛЯ СОБЫТИЙ ВБЛИЗИ ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ АЗИИ

В первую очередь изучены магнитудные поправки для событий, регистрируемых на территории трех полигонов – Лобнор (Китай), Похаран (Индия), Чагай (Пакистан). Отбор событий в окрестностях полигонов проведен по каталогам NEIC (National Event Information Center - каталог Геологической службы США, USGS), составленный по данным глобальной сети IRIS GSN и REB (Reviewed event bulletin - каталог Международного центра данных, IDC). Каждая наблюдательная станция относительно района конкретного полигона характеризуется относительно узким створом азимутов и ограниченным диапазоном эпицентральных расстояний. Можно считать, что сейсмические волны от разных событий вблизи полигона на конкретную станцию проходят практически по одинаковым трассам. Необходимо найти систематические отклонения в значениях определяемых магнитуд. В таблице 1 представлены средние расстояния и азимуты трасс на полигоны для 13 казахстанских станций.

Для определения станционных значений магнитуд в качестве исходных данных использованы архивные записи в SEED- формате (Standart for the Exchange of Earthquake Data). По каждой станции и на каждой записи измерены максимальные значения колебательной скорости (A/T). Затем по программам расчета магнитуд определены значения m_b и m_{PV} и по ним станционные поправки для каждого события:

$$\delta m_{ij} = m_{ij} - m_{j(NEIC,REB)}$$

Здесь і – станция, j – событие из каталога, mij – значение магнитуды данного типа для i- ой станции j –ого события, m_{jNEIC} и m_{jREB} - значения среднесетевых магнитуд из каталогов мировых центров NEIC и REB для j – го события.

В результате расчетов для каждой станции получены выборки значений δm_{ii} для двух типов магнитуд (ть и тру). для трех полигонов и относительно двух центров данных. В общем случае, для каждой станции получено по 12 выборок значений бт. Дальнейшие исследования сводились к построению и анализу распределений значений бm. Главной проблемой при анализе данных было малое количество экспериментальных данных. В районах изучаемых полигонов сейсмичность не столь высока, чтобы за 10 и менее лет для расстояний порядка 2000 км набрать достаточное число зарегистрированных событий. Все распределения значений бт построены в интегральном виде. За характеристики распределений были приняты медиана и персентили на уровне 15% и 85%. На рисунках 1 и 2 представлены графики распределения значений δm_b для станции Боровое (BRVK) относительно событий на полигоне Лобнор и Чагай.

	– –	1											
	anni	10 1		11/11/01/11/0	nacemogium	11	001111111000	co	cmain	11111	11/1	100011201	
1	uonui	ш1.		пичепил	рисстолнии	и	$u_{3}u_{3}u_{3}v_{1}u_{0}v_{0}$	uv	стипи	uu	пи	полисог	ı
			-		P								

6-0000		Лобнор			Похаран			Чагай			
Станции	Δ°	Baz	R км	Δ°	Baz	R км	Δ°	Baz	R км		
Боровое–IRIS, BRVK	16,868	125,973	1875	25,955	176,786	2886	24,433	191,853	2716		
Восточное (группа), VOS	16,329	126,456	1815	25,602	178,184	2846	24,198	193,482	2690		
Зеренда (группа), ZRNK	17,443	123,246	1939	25,909	174,166	2880	24,186	189,196	2689		
Чкалово (группа), CHKZ	17,083	128,251	1899	26,564	177,518	2953	25,08	192,261	2788		
Курчатов–IRIS, KURK	11,477	139,627	1276	24,14	194,868	2684	24,138	210,988	2684		
Маканчи-IRIS, MAKZ	7,081	136,19	787	21,233	205,619	2360	22,35	223,135	2485		
Талгар, TLG	8,527	97,88	948	16,691	196,866	1855	17,454	219,244	1940		
Подгорное, PDG	6,917	102,236	769	17,334	203,392	1927	18,614	224,408	2069		
Каратау (группа), KKAR	13,418	90,735	1492	16,007	175,621	1779	14,874	200,135	1653		
Маканчи (группа), MKAR	6,923	137,618	769	21,314	206,36	2370	22,488	223,766	2500		
Боровое (группа), BVAR	16,796	126,089	1867	25,918	176,997	2881	24,413	192,089	2714		
Актюбинск, АКТО	22,859	101,21	2541	25,594	150,412	2845	22,051	164,186	2451		
Акбулак (группа), ABKAR	21,413	100,403	2380	23,964	153,05	2664	20,605	168,031	2291		
Применание: Ваг – обратный											



Рисунок 1. Интегральные распределения значений δm_b по данным станции Боровое относительно магнитуд по каталогам NEIC и REB для полигона Лобнор



Рисунок 2. Интегральные распределения значений бть по данным станции Боровое относительно магнитуд по каталогам NEIC и REB для полигона Чагай

Из рисунка 1 видно, что графики по двум каталогам мировых служб NEIC и REB близки к нормальному распределению, но смещены один относительно другого примерно на 0,4 m_b. Причем, по данным NEIC медиана распределения близка к нулю (-0,05), а по данным REB медиана распределения составляет + 0,35.

На рисунке 2 приведен аналогичный график для полигона Чагай. Результаты подтверждают выводы по полигону Лобнор. Два распределения сдвинуты одно относительно другого на 0,4 m_b. Поправка по NEIC близка к нулю (+0,05), а по REB равна +0,45.

Выявленное расхождение послужило поводом для исследования магнитудных определений по каталогам NEIC и REB. С этой целью из двух каталогов были выбраны одни и те же события, для которых в обоих каталогах имелись значения m_b. По выборке построен график корреляции значений m_{bREB} и m_{bNEIC} (рисунок 3), уравнение ортогональной регрессии по которой: m_{bREB} = -0,41+ m_{bNEIC}. Таким образом, установлено систематическое занижение значений mb по определениям REB на 0,41 (±0,10) относительно определений NEIC. Ранее [5] по совершенно независимым данным было отмечено занижение значений m_{bREB} относительно данных казахстанского KNDC и российского GSRAS бюллетеней. На рисунке 4 показаны замеченные в этой работы несоответствия. В среднем установленные расхождения в каталогах составляют 0,47 mb. Сделан вывод, что, видимо, в силу особенностей методических подходов, в бюллетене REB значения m_b занижены относительно других каталогов. В связи с этим при поиске станционных поправок использованы данные каталога NEIC.



Рисунок 3. Корреляционная зависимость значений магнитуд mb по данным REB и NEIC



Рисунок 4. Сравнение значений магнитуд по объемным волнам. Данные интерактивного бюллетеня KNDC и REB

На рисунке 5 приведены интегральные распределения значений δm_b для трех станций сети НЯЦ РК – Маканчи, Боровое и Подгорное, - применительно к событиям на полигоне Лобнор. Все графики подобны, однако видно, что только станция Боровое не имеет систематической поправки. Станция Маканчи имеет поправку $\delta m = +0,41$, станция Подгорное – $\delta m = +0,70$.



Рисунок 5. Интегральные распределения значений бт_ь для станций Боровое, Маканчи и Подгорное. Полигон Лобнор. Сравнение с NEIC

Подобным образом проведен сравнительный анализ с данными каталога NEIC по всем станциям сети НЯЦ РК, для которых удалось собрать необходимые данные. Сводные графики кривых распределения значений δm_b показаны на рисунке 6.



Рисунок 6. Сводные графики распределения значений бт_ь для полигонов

На всех графиках отмечается близкое к нулевым значение медианы δm_b по станции Боровое – IRIS. Наибольший общий разброс значений m_b характерен для полигона Лобнор, наименьший - для полигона Чагай. Возможно, это связано с величиной расстояний, на которых находятся станции. Полученные данные позволяют установить, что вряд ли можно использовать единую зависимость для всех расстояний. Именно на близких станциях Подгорное, Талгар наблюдаются большие значения отклонений. Возможно, необходимо поставить вопрос о разработке новой калибровочной кривой для региональных расстояний

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СТАНЦИОННЫХ ПОПРАВОК АМВ И АМ_{РУ} ПО СТАНЦИЯМ НЯЦ РК

Изучены интегральные магнитудные поправки для станций НЯЦ РК независимо от района, где произошло событие, относительно бюллетеней NEIC и REB. С этой целью из этих мировых каталогов для района, ограниченного координатами 35-55°N, 40-100 Е°, за период времени 2002 - 2007 гг. отобраны события, находящиеся на региональных расстояниях от сейсмических станций НЯЦ РК. При этом для выбора одинаковых событий из различных каталогов в качестве параметров идентификации приняты координаты и время, девиация которых в различных каталогах не превышала определенный порог (∆t ≤ 20 с, $\Delta D \le 2^\circ$, где t – время в очаге, D – расстояние между событиями из разных каталогов). Еще одним критерием при отборе событий из мировых каталогов являлось значение поля ndef, определяющее количество станций, участвующих в локализации события. Для повышения точности определения энергетических параметров события и уменьшения погрешности из мировых каталогов выбирались лишь те события, где величина ndef была больше или равнялась 10. В результате поиска отобрано около 11 000 событий из каталога NEIC и около 12 000 событий из каталога REB, удовлетворяющих выбранным критериям. Поскольку на предыдущем шаге исследований были обнаружены систематические занижения магнитуды в бюллетене REB, все дальнейшие результаты приводятся для каталога NEIC.

Для каждой станции сети НЯЦ РК построены графики распределения магнитудных поправок по отношению к международным каталогам. На рисунке 7 представлены распределения наиболее вероятных поправок магнитуды m_b для станций НЯЦ РК

по отношению к международному сейсмическому бюллетеню NEIC.

Видно, что большинство станций сети НЯЦ РК имеет одинаковый характер распределения магнитудных поправок (CHKZ, VOS, ZRNK, KURK, ABKAR), для них характерна небольшая отрицательная поправка. По станциям MKAR, KKAR и BRVK поправки носят иной характер, медиана рас-



Рисунок 7. Графики распределения наиболее вероятных поправок магнитуды ть для станций НЯЦ РК по отношению к международному сейсмическому бюллетеню NEIC

пределений магнитудных поправок для этих станций близка к 0. Поправки по станции KNDC характеризуются большими положительными значениями. На рисунке 8 приведены распределения магнитудных поправок δm_{pv} . В целом, результат подтверждает зависимость, полученную для поправок к m_b . В таблице 2 приведены результаты исследований магнитудных поправок по всем станциям.



Рисунок 8. Графики распределения наиболее вероятных поправок магнитуды т_{ру} для станций НЯЦ РК по отношению к международному сейсмическому бюллетеню NEIC

Таблица 2. Магнитудные поправки для станций ИГИ НЯЦ РК по отношению к каталогу NEIC

Станция	Медиана δm _{mb}	Ν	Медиана δm _{mpv}	N	Станция	Медиана δm _{mb}	Ν	Медиана δm _{mpv}	Ν
ABKAR	-0,35	527			KURK	-0,35	177	-0,05	139
BRVK	-0,08	508			MKAR	0	1306	0,2	637
CHKZ	-0,44	147			VOS	-0,4	256		
KKAR	0,02	1828	0,08	1592	ZRNK	-0,27	231		
KNDC	0,95	116	0,76	115					

Заключение

Исследование магнитудных поправок к данным казахстанских станций мониторинга на примере событий, происходящих на территории трех полигонов Центральной Азии: Лобнор (Китай), Похаран (Индия), Чагай (Пакистан) позволили выявить расхождение значений \mathbf{m}_b с данными двух мировых каталогов (NEIC и REB). Установлено, что в силу особенностей методического подхода, в бюллетене REB значения \mathbf{m}_b занижены относительно других каталогов. Величина систематического занижения значений \mathbf{m}_b по определениям REB составляет 0,41 (±0,10).

Отмечено близкое к нулевым значение медианы δm_b по станции Боровое – IRIS. Наибольший общий разброс магнитудных поправок характерен для полигона Лобнор, наименьший - для полигона Чагай. Возможно, это связано с диапазоном расстояний, на которых находятся станции. Для полигона Лобнор он более значителен. Именно на близких станциях Подгорное, Талгар наблюдаются большие значения отклонений.

В результате исследований установлено необходимость создания единой калибровочной кривой для определения m_{pv} и m_b на региональных расстояниях до 2000 км для определение магнитудных поправок и дальнейшее сопоставление его с калибровочными кривыми используемые в мировых центрах данных.

Литература

- Archambeau, C.B. Verification of a very-low-yield nuclear test ban // In: Nuclear Weapon Tests: Prohibition or Limitation? (Ed. By J. Goldblat and D. Cox) / C.B. Archambeau // SIPRI, CIPS. 1988. – P.273-296
- Советско-Американские работы по сейсмическому контролю ядерных взрывов / И.Л.Нерсесов [и др.] М.: Наука, 1991. - 144 с.

- Veith, K.F. Magnitude of short-period P-wave data / K.F. Veith, G.E. Clawson // Bull. Seism. Soc. Am. 1972. Vol. 62. P. 435-453.
- Михайлова, Н.Н. 1986. Калибровочная функция σ(Δ) для определения магнитуды MPVA землетрясений Северного Тянь-Шаня. Комплексные исследования на Алма-Атинском прогностическом полигоне. / Н.Н. Михайлова, И.П. Неверова // Алма-Ата: Наука. – С. 41-47.
- Sineva, Z.I. Analysis of Convergence REB and Local Kazakhstan Bulletin / Z.I. Sineva, N.N. Mikhailova // Report of 2006 NDC Evaluation Workshop. – P. 26-27.

ҚР ҰЯО СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫ ҮШІН МАГНИТУДАЛЫҚ ТҮЗЕТУЛЕР

Михайлова Н.Н., Мұқамбаев А.С.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Орталық Азияның үш полигондары – Лобнор (Қытай), Похаран (Индия), Чагай (Пакистан) аумақтарында болып жатқан оқиғалары үшін бірінші рет Қазақстан Республикасы Ұлттық ядролық орталығы желісінің станциялар деректеріне магнитудалық түзетулері зерттелген. REB (Reviewed event bulletin – халықаралық деректер орталығының каталогы) анықтаулары бойынша mb мәндері NEIC (National Event Information Center – АҚШ Геологиялы қызметінің каталогы), KNDC Қазақ ұлттық орталығы) бюлетендеріне қатысты 0,41 (±0,10) мөлшеріне жүйелі төменделуі анықталған. Бурабай станциялары бойынша магнитудалық түзетулері NEIC қатысты нөлге жақын. Келешекте бұл станцияны магнитудалық бағалауында тіректі ретінде санау мүмкіншілігі туралы қорытынды жасалған. Бірыңғай аймақтық калибрлеу қисығын (∆=2000км дейін) жасау бойынша зерттеуін жүргізуі ұсынылған.

MAGNITUDE CORRECTIONS FOR NNC RK SEISMIC STATIONS

N.N. Mikhailova, A.S. Myukambayev

Institute of Geophysical Researches NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

For the first time magnitude corrections were studied for stations network of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan for the events happened on the territory of three Central Asia Test Sites - Lop Nor (China), Pokharan (India), Chagay (Pakistan). Regular underestimating of mb values in REB (Reviewed event bulletin – the catalogue of the International Data Center) by 0,41 (\pm 0,10) in comparison with NEIC (National Event Information Center – the catalogue of the USA Geological Service) and KNDC (Kazakhstan National Data Center) bulletins was noted. Magnitude corrections by NEIC for Borovoye station are close to zero; it allows to consider this station as a main one for magnitude estimations in future. It is recommended to conduct researches on creation of a single regional calibration curve (up to Δ =2000 km).

УДК 539.141/142

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИЕЙ В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

¹⁾Красовицкий П.М., ²⁾Виницкий С.И., ²⁾Гусев А.А., ²⁾Чулуунбаатар О.

¹⁾Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан ²⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Задача взаимодействия каналированных частиц, сведенная к двумерному уравнению Шредингера, решалась в сферической системе координат с помощью метода Канторовича. Получены значения коэффициента усиления для некоторых частных случаев. Зависимость коэффициентов от энергии имеет характерный вид с ярко выраженным максимумом.

Введение

Взаимодействие каналированных частиц длительное время рассматривается в качестве одного из возможных путей решения проблемы синтеза легких элементов и вообще взаимодействия ядер при низкой энергии [1,2]. Предполагается, что эффект фокусировки каналированного пучка может существенно изменить характеристики сечения. Для точной оценки необходимо знание волновой функции взаимодействия каналированных частиц в области столкновения (в нуле координат). Такая волновая функция при определенном выборе взаимодействующих частиц может быть получена из решения двумерного уравнения Шредингера. Предварительные выводы об этом были сделаны в работах [3,4]. Однако, чтобы определить волновую функцию в нуле, необходимы высокоточные численные методы решения дифференциальных уравнений.

Одной из проблем, возникающих при решении этой задачи, является выбор системы координат, в которой алгоритм наиболее оптимален. Кажется очевидным выбор цилиндрической системы координат, так как задача имеет наиболее простую асимптотику именно при такой записи. Именно таким образом задача решалась в [4]. Были определены коэффициенты прохождения и отражения соответствующей задачи рассеяния, сделаны предварительные выводы о характере волновой функции вблизи нуля. Однако, самая главная характеристика – волновая функция в нуле – не была получена. Анализ показал, что большое значение имеет область вблизи нуля, и именно по этой области предпочтительней выбирать систему координат.

Одним из уже известных подходов, использующих сферические координаты, является численный алгоритм, реализованный с помощью программ KANTBP [5] и POTHMF [6]. Эти программы были успешно применены для решения двумерных уравнений, аналогичных тем, что описывают каналирование в кристалле – программный пакет решал уравнения, характеризующие процессы поведения водородоподобного атома в сильном магнитном поле [7]. Модифицируя параметры задачи, можно получить полную аналогию решаемым уравнениям для изучаемой проблемы взаимодействия каналированных частиц.

Постановка задачи

Коротко изложим ранее полученные формулы для взаимодействия каналированных частиц [3,4]. Две частицы, находящиеся в режиме каналирования, могут быть описаны шестимерным уравнением Шредингера.

$$\begin{cases} -\frac{1}{2M}\Delta_{R} - \frac{1}{2\mu}\Delta_{r} + \\ +U_{12}(|\vec{r_{1}} - \vec{r_{2}}|) + \\ +U_{1}(\vec{r_{1}}) + U_{2}(\vec{r_{2}}) \end{cases} \Psi \vec{r_{1}}, \vec{r_{2}} = E_{G}\Psi \vec{r_{1}}, \vec{r_{2}} , \quad (1)$$

где r_1, r_2 – координаты частиц с массами m_1, m_2 и зарядами z_1, z_2 соответственно, M, μ – полная и приведенная масса двух частиц соответственно. Потенциалы U_1 и U_2 определяют взаимодействие частиц с кристаллом, а потенциал U_{12} – частиц между собой.

При использовании двух приближений: аппроксимации потенциала взаимодействия частиц с кристалла непрерывным потенциалом и разложении его в ряд по степеням расстояния от оси каналирования (ρ) и учета только главного слагаемого [8], а также при условии, что отношение зарядов и масс взаимодействующих частиц равно, в уравнении (1) можно отделить часть, отвечающую движению центра масс [3,4]. Волновая функция, отвечающая непосредственно за взаимодействие между частицами, подчиняется трехмерному уравнению Шредингера.

$$\left\{ -\frac{1}{2\mu} \Delta_r + U_{12}(r) + \alpha \frac{m_1^2 z_1 + m_2^2 z_2}{m_1 + m_2^2} \rho^2 \right\} \varphi \vec{r} = . (2)$$
$$= E_{\text{int}} \varphi \vec{r}$$

Здесь $\vec{r} = \vec{r_1} - \vec{r_2}$, α – параметр разложения потенциала взаимодействия частицы с кристаллом, потенциал взаимодействия $U_{12}(r)$ – кулоновский.

В уравнении (2) может быть проведено еще одно разделение переменных, а именно, можно опреде-

лить зависимость от угла ϕ в цилиндрической или сферической системе координат (координата ρ цилиндрической системы координат в этом случае совпадает с ранее веденной такой же переменной).

Выбор системы координат

Первоначально анализ уравнения (2) дает следующее. Потенциал U₁₂, отвечающий за взаимодействие между частицами, убывает при стремлении r к бесконечности. Поэтому остается только один потенциал – осцилляторный по координате ρ . Логично было предположить, что оптимальным будет выбор цилиндрической системы координат. Тогда в области $z > z_{max}$ сразу можно записать асимптотическую форму решения для искомой волновой функции. Она будет суммой с неизвестными коэффициентами от произведений кулоновских функций по z и осцилляторных по ρ . Еще проще записав из условий симметрии и физических закономерностей три условия на трех других границах, формируем полностью подготовленную краевую задачу для численного решения. Именно таким образом задача решалась в [4]. Для решения был выбран метод матричной прогонки с дискретизацией исходного уравнения по методу Нумерова. Прямой прогонкой были получены коэффициенты прохождения и отражения для соответствующей задачи рассеяния при некоторых значениях энергиях. Однако, программа обратной прогонки, успешно восстановив волновую функцию на большей части интервала, вблизи нуля выдавала очевидно ошибочные результаты.

Анализ данной проблемы показал следующее. Вблизи нуля координат в уравнении (2) можно пренебречь вторым (осцилляторным) потенциалом, и учитывать только кулоновский. В этом случае двумерная волновая функция может быть представлена в виде:

$$\phi \sim \sum a_{klm} P_l^m \cos \theta R_{kl} r , \qquad (3)$$

где $P_l^m \cos \theta$ – полиномы Лежандра, R_{kl} r – радиальные компоненты, выражаемые через кулоновские функции, a_{klm} – неизвестные коэффициенты. Суммирование по индексу *m* не производится. Из рекуррентной формулы для полиномов Лежандра

$$l - m + 1 P_{l+1}^m \cos \theta =$$

= $2l + 1 \cos \theta P_l^m \cos \theta - l + m P_{l-1}^m \cos \theta$

следует, что с ростом l полином будет все более осциллирующей функцией, то есть, если полином порядка l содержит слагаемое вида соз $s\theta$, полином порядка l+1 будет содержать слагаемое вида соз $s+1\theta$. Численный поиск волновой функции в таком виде приведет к необходимости учета бесконечного количества все более быстро осциллирующих компонент. Кроме того, если даже существуют физические ограничения, позволяющие ограничить ряд в (3) некоторым $l_{\rm max}$, необходимо наложить условие на изменение волновой функции на численном интервале, определяемое через слагаемое с наибольшей осцилляцией. Оно может быть записано в следующем виде:

$$l_{\max} + m \Delta \theta << 2\pi$$

Условие для параметров программы, решающей задачу в цилиндрических координатах, будет

$$\frac{l_{\max} + m \sqrt{\Delta z^2 + \Delta \rho^2}}{2\pi} \ll \sqrt{z^2 + \rho^2}$$

то есть, при уменьшении расстояния до нуля необходимо уменьшение шага дискретизации. Для программы [4], при параметрах $\Delta z = 0.003$, $\Delta \rho = 0.03$, $l_{\rm max} \sim 10$, m = 0 получаем, что

$$\sqrt{z^2 + \rho^2} >> 0.05$$
 .

Примерно на таком расстоянии наблюдался значительный рост ошибки расчетов волновой функции.

Решение этой проблемы возможно несколькими путями. Прямое задание меньшего шага является пока трудновыполнимым из-за технических проблем: увеличение времени решения, увеличение программной ошибки и.т.д. Кроме этого, можно использовать переменный шаг дискретизации. Этот метод зарекомендовал себя с положительной стороны в одномерных задачах [9]. Однако, аккуратная дискретизация двумерного уравнения с переменным шагом представляет из себя тоже достаточно сложную задачу. Поиск показал, что существует метод, позволяющий решать задачу в сферических координатах, вместе с тем учитывая и цилиндрическую симметрию. Этот метод (метод Канторовича [10]) успешно применялся для решения задач ионизации атома в сильном магнитном поле [7]. Краткое его описание представлено ниже.

Метод Канторовича

Пусть задано двумерное дифференциальное уравнение, описывающее поведение водородоподобного атома в магнитном поле

$$\left(-\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}r^2\frac{\partial}{\partial r}+\frac{A^0}{r^2}\frac{r,\theta}{r^2}-\frac{2Z}{r}-e\right)\Psi r,\theta = 0 \quad (4)$$

где оператор A^0 r, θ задается в виде

$$A^{0} r, \theta = -\frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \sin\theta \frac{\partial}{\partial\theta} + \frac{m^{2}}{\sin^{2}\theta} + \gamma mr^{2} + \frac{1}{4}\gamma^{2}r^{4}\sin^{2}\theta$$

а величины γ, m характеризуют магнитное поле. Уравнение (4) может быть сведено к системе одномерных дифференциальных уравнений, если использовать подстановку:

$$\Psi r, \theta = \sum_{i} \chi_i r \Phi_i r, \theta$$
,

где $\Phi_i r, \theta$ – набор собственных функций оператора $A^0 r, \theta$, составляющие ортонормированный базис. Координата *r* рассматривается как параметр. Функции $\Phi_i r, \theta$ носят название угловых сплюснутых сфероидальных функций.

Уравнение (4) записывается в виде системы

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{r^2} \mathbf{I} \frac{d}{dr} r^2 \frac{d}{dr} + \mathbf{V} r + \\ +\mathbf{Q} r \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{dr^2 \mathbf{Q} r}{dr} - 2E\mathbf{I} \end{pmatrix} \boldsymbol{\chi} r = 0, \quad (5)$$

где **I**, **V**, **Q** – матрицы, определяемые через функции Φ и кулоновский потенциал в (2), а χ - матрицастолбец, составленный из неизвестных функций χ_i .

Решение системы уравнений (5), записанной вместе с граничными условиями и образующей целиком краевую задачу, производится численно на конечноэлементной сетке. Для задач ионизации атома в сильном магнитном поле на языке Fortran была составлена программа KANTBP, отвечающая за решение системы уравнений (5) и программа POTHMF, вычисляющая угловые сплюснутые сфероидальные функции, матрицы и граничные условия для (5).

Для решения задачи взаимодействия каналированных частиц в программах были произведены некоторые модификации. В основном они касались технических настроек, позволяющие непосредственно вычислять волновые функции в районе нуля.

Результаты решения

а) Вычисление коэффициентов прохождения и отражения

Первой задачей была проверка ранее полученных результатов [4]. В таблице 1 приведено сравнение результатов прямого решения уравнения (2) методом матричной прогонки из работы [4] и решения эквивалентной системы уравнений (5) с помощью программ KANTBP и POTHMF. В двух правых столбцах приведено распределение по уровням рассеянной волны, проходящей по каналу. Как и в [4] представлены только коэффициенты отражения, в обеих программах при указанных энергиях коэффициенты прохождения равны нулю.

Видно, что решение на правой границе $r_{\rm max}$, с точностью программ совпадает в обоих случаях. Однако, программный пакет КАΝТВР и РОТНМГ позволяет определять искомые величины с большей точностью. Особенно это касается возможности определения малых (<10⁻¹²) величин. Вместе с тем можно сделать вывод и о возможности использования прямого решения в дальнейшем.

б) Получение коэффициента усиления

Программный пакет KANTBP и POTHMF был дополнен возможностью определения величины

$$\frac{C \quad 2E - 2E_1}{C_0 \quad 2E},\tag{6}$$

где в числителе стоит коэффициент пропорциональности между находимым программой решением в нуле и его асимптотическим видом, определяемым аналитически.

Входные пар	оаметры	Программный пакет KANTBP и POTMPH	Прямое решение методом матричной прогонки	
Энергия	уров	вень	Koathduu	
(в осцилляторных единицах)	начальный	конечный	коэффиц	иенты отражения
6	1	1	1.0000	0.99016
	1	2	8.01036·10 ⁻⁹	1.00562·10 ⁻⁸
	1	3	3.20061·10 ⁻³¹	1.562277·10 ⁻¹²
8	1	1	0.999819	0.9933
	1	2	1.80954·10 ⁻³	2.12436·10 ⁻³
	1	3	1.11516·10 ⁻¹²	1.50803·10 ⁻¹²
	1	4	6.20370·10 ⁻³¹	3.74694·10 ⁻¹²
10.5	1	1	0.973322	0.9677
	1	2	2.6628·10 ⁻²	2.655·10 ⁻²
	1	3	1.53520·10 ⁻⁵	1.300·10 ⁻⁵
	1	4	2.68553·10 ⁻¹⁰	6.343·10 ⁻¹⁰
	1	5	5.60119·10 ⁻³⁰	1.122·10 ⁻⁸
	2	1	2.66628·10 ⁻²	2.663·10 ⁻²
	2	2	0.971105	0.96304
	2	3	2.23267·10 ⁻³	2.22·10 ⁻³
	2	4	8.62196·10 ⁻¹⁰	1.061·10 ⁻⁹
	2	5	5.1855·10 ⁻³⁰	9.621·10 ⁻¹¹
	3	1	1.53520·10 ⁻⁵	1.15579·10 ⁻⁵
	3	2	2.23267·10 ⁻³	1.9·10 ⁻³
	3	3	0.997750	0.98955
	3	4	1.51888·10 ⁻⁶	1.8933·10 ⁻⁶
	3	5	5.80930·10 ⁻²⁵	1.8413·10 ⁻¹¹

Таблица 1. Сравнение результатов решения двумя различными способами

В знаменателе находится аналитический коэффициент, являющийся аналогом *C* для кулоновских функций. Энергия в числителе отсчитывается от величины первого осцилляторного уровня. Определим это отношение как коэффициент усиления.

Зависимость коэффициента усиления для различных входных параметрах показана на рисунке 1. Параметры задачи, показанные на рисунках, соответствуют параметрам программного пакета КАNTВР и РОТНМF. При решении, как и в [4], возможно разделение на четную и нечетную компоненты. Здесь представлено решение для четной компоненты. Параметры программ m, γ выбраны 0, 1 соответственно. В этом случае для решения задачи взаимодействия одинаковых частиц с массами и зарядами ядра дейтрона необходимо задать Z=144. В связи с некоторыми техническими трудностями пока решены задачи с меньшим значением Z.



Рисунок 1. Зависимость коэффициента усиления от энергии при различных параметрах задачи

Литература

- Demkov, Yu. N. A sub-atomic microscope, superfocusing in channeling and close encounter atomic and nuclear reactions / Yu. N. Demkov, J. D. Meyer // Eur. Phys. J. B. – 2004. – Vol. 42. – P. 361-365.
- Изучение резонансов дальнодействия в атомной и ядерной физике / Н. Ж. Такибаев [и др.] // Вестник НЯЦ РК. Ядерная физика и радиационное материаловедение. – 2003. – Вып. 4. – С. 75-80.
- Красовицкий, П. М. Эффекты взаимодействия каналированных частиц в области глубоко подбарьерной энергии столкновения / П. М. Красовицкий // Вестник НЯЦ. – 2005. – Вып. 4(24) – С. 18-22.
- 4. Красовицкий, П. М. Взаимодействие каналированных частиц при низких энергиях / П. М. Красовицкий, Н. Ж. Такибаев // Известия РАН. Серия физическая. 2006. Т. 70, № 5. С.709-712.
- 5. KANTBP: A program for computing energy levels, reaction matrix and radial wave functions in the coupled-channel hyperspherical adiabatic approach / O. Chuluunbaatar [et al] // Comput. Phys. Commun. 2007. V. 177, P. 649-675.

На рисунках видно, что при низких энергиях кривая зависимости имеет характерное поведение, возрастая от нуля, и имея максимум. В максимуме возможно значительное превышение единицы, особенно при низких Z (левый рисунок – свыше 200). Положение максимума растет вместе с ростом величины Z. Такое поведение является очень обнадеживающим, и может являться следствием эффектов фокусировки в кристалле. При взаимодействии частиц в канале идет конкуренция двух процессов: фокусирующего - от осцилляторного канала и расфокусирующего - от кулоновского взаимодействия, поэтому существует область энергии, где плотность волновой функции имеет значительный максимум. При выполнении этой гипотезы можно ожидать значительного увеличения ядерных реакций в астрофизической области энергии. Полученные значения коэффициента усиления служат хорошим аргументом для выполнения сложного этапа работ по исследованию взаимодействия каналированных частиц при реальных значениях Z.

Выводы

В работе были определены оптимальные условия, при которых можно решить задачу взаимодействия каналированных частиц. Было найдено, что для того, чтобы определить волновую функцию в нуле координат, необходимо использовать метод Канторовича. Сущность метода заключается в разложении волновой функции по угловым сплюснутым сфероидальным функциям. Программы КАNТВР и POTHMF, написанные для решения похожих уравнений методом Канторовича, были модифицированы для новых условий.

Получены предварительные результаты для коэффициента усиления. Зависимость коэффициента усиления от энергии имеет характерный, довольно значительный максимум. Этот максимум может быть объяснен как результат конкуренции влияния двух потенциалов: фокусирующего взаимодействия с кристаллом – осцилляторного и расфокусирующего кулоновского потенциала – отвечающего за взаимодействие между частицами.

Авторы глубоко признательны проф. Пенькову Федору Михайловичу за неоценимую помощь в работе.

- POTHMF: A program for computing potential curves and matrix elements of the coupled adiabatic radial equations for a hydrogen-like atom in a homogeneous magnetic field / O. Chuluunbaatar [et al] // Comput. Phys. Commun. – 2008. – V. 178. – P. 301-330.
- Calculation of a hydrogen atom photoionization in a strong magnetic field by using the angular oblate spheroidal functions / O. Chuluunbaatar [et al] // Journal of Physics A, - 2007. - V. 40. - P. 11485-11524.
- 8. Кумахов, М. А. Атомные столкновения в кристаллах / М. А. Кумахов, Г. Шиммер. М.: Атомиздат, 1980. 190 с.
- 9. Лендьел, В.И. Нерелятивистская квантовая теория рассеяния / В. И. Лендьел, М. Салак. Львов: Виша школа. Из-во при Львов. ун-те, 1983. 136 с.
- 10. Канторович, Л.В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. Москва: Гостехиздат, 1952. 708 с.

СФЕРАЛЫҚ КООРДИНАТАЛАР ЖҮЙЕСІНДЕ ЦИЛИНДРРЛІК СИММЕТРИЯЛЫ ЕСЕПТІҢ ШЕШІЛІ

¹⁾Красовицкий П.М., ²⁾Виницкий С.И., ²⁾Гусев А.А., ²⁾Чулуунбаатар О.

¹⁾КР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Казақстан ²⁾Біріккен ядролық зерттеулер институты, Дубна, Ресей

Арнаға түсірілген бөлшектердің озара әрекетінің, екіөлшемді Шредингер тендеуіне колтірілген, есебі Кантарович әдісінің көмегімен сфералық координаталар жүмісінде шешілді. Койбір жене оқилар үшік күшейту коэффициентінің мәкдері алынған. Коэффициенттердік энергияға тәуелділігінің айқын көрсетілгек максимумы бар ерекше кесігіні болады.

THE SOLUTION OF A PROBLEM WITH CYLINDRICAL SYMMETRY IN THE SPHERICAL COORDINATE FRAME

¹⁾P.M. Krassovitskiy, ²⁾S.I. Vinitsky, ²⁾A.A. Gusev, ²⁾O. Chuluunbaatar

¹⁾Institute of nuclear physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan ²⁾Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

The problem of channeling particles interaction has been reduced to two-dimension Schrödinger equation. It has been solved in spherical coordinate frame by Kantorovich method. The values of multiplication factor for some cases have been found. The dependence of multiplication factor from energy has characteristic shape with evident maximum.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОТНОШЕНИЯ Ѕ/Р ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ И ЮЖНОЙ АЗИИ

Аксамбиев С.С., Соколова И.Н.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Приводятся результаты изучения динамических параметров записей землетрясений, произошедших в обширном регионе Центральной и Южной Азии. Рассчитаны спектральные отношения S/P, описаны разработанные методы картирования параметров распознавания взрывов и землетрясений.

Введение

В Центре данных ИГИ НЯЦ РК разработаны достаточно эффективные методы распознавания ядерных взрывов и землетрясений из регионов известных испытательных полигонов – Лобнор, СИП, Похаран и Чагая [1-3]. Эти методы основаны, главным образом, на анализе S/P дискриминантов, базирующемся на различной природе генерации сейсмических волн разными типами сейсмических источников. Однако, как правило, разработанные алгоритмы не являются универсальными, выявленные критерии распознавания пригодны для конкретных трасс «известный полигон - станция». Если ранее подземные ядерные испытания проводились на полигонах, местоположение которых было известно, то в будущем можно ожидать проведения несанкционированных ядерных испытаний в других районах мира. Для обнаружения и распознавания таких возможных ядерных взрывов необходимы методы транспортации S/P- дискриминантов за счет введения поправок за расстояния и магнитуды события [4 - 6]. Однако, использование только зависимости параметра S/P от расстояния недостаточно, так как на региональных расстояниях на динамические характеристики короткопериодных волновых полей сильно влияют локальные неоднородности поля поглощения поперечных волн [7 - 9]. В подтверждение этого на рисунке 1 приведены примеры записей станции Талгар (TLG,) землетрясений, произошедших в разных районах, в диапазоне расстояний 695 - 1080 км.



Рисунок 1. Примеры сейсмограмм коровых землетрясений, произошедших в различных районах. Станция TLG, канал 1.25 Гц

Видно, что, хотя диапазон расстояний, на которых зарегистрированы землетрясения, относительно небольшой, записи резко различаются по соотношению уровней различных фаз. Для двух землетрясений, трассы которых проходят через Казахскую платформу (Джезказганское 23.06.1996 и Шалгинское 22.08.2001), на сейсмограммах доминирует группа волн Lg, амплитуда которой на 1 - 2 порядка больше амплитуды волн Pn и Pg. Для землетрясений из районов Каракорума и Западного Тянь-Шаня, трассы которых проходят через горные массивы и впадины, уровень амплитуды группы волн Lg ниже в несколько раз. Еще меньше уровень волны Lg для землетрясений из района Северного Тибета.

Для картирования S/P дискриминантов для обширного региона Центральной и Южной Азии по данным сети станций НЯЦ РК выполнены следующие работы:

 проведена систематизация имеющихся данных по поглощению S-волн и геологическому строению.
На этой основе территория Северной Евразии разбита на блоки с аналогичным строением;

2) отобраны коровые землетрясения из мировых каталогов и создана база цифровых сейсмических записей событий для каждой станции и для каждого блока. База данных при необходимости дополнена ретроспективными цифровыми и оцифрованными записями сейсмических станций НЯЦ РК, а также суррогатных станций Комплексной сейсмологической экспедиции Объединенного института физики Земли (КСЭ ОИФЗ РАН) и Института сейсмологии (ИС МОН РК);

3) проведены замеры параметров Sm/Pm, Lg/Pm, Lg/Pn, Sm/Pn для различных узкополосных ЧИСС фильтров для каждого блока по каждой станции;

4) проведено картирование территории Северной Евразии по исследованным параметрам.

Систематизация данных по поглощению S-волн в регионе Центральной и Южной Азии и по геолого-тектонической характеристике

В [10, 11] описан метод картирования литосферы и астеносферы по поглощению поперечных волн. Метод основан на анализе короткопериодных записей землетрясений в промежуточной зоне эпицентральных расстояний (1000 - 3000 км). При таких расстояниях в районах с относительно повышенным поглощением поперечных волн на сейсмограммах выделяется волно-

вая группа (Sm), сформированная преимущественно поперечными волнами, однократно отраженными от многочисленных слабых границ в земной коре и верхней мантии. Максимум волновой группы (Sm) формируется после вступления волны Sn, волны дважды пересекают литосферу и астеносферу и их уровень относительно Р-волны (параметры As/Ap) [10-12] служит мерой интегрального поглощения поперечных волн в районе эпицентра изучаемого землетрясения. При картировании вводятся поправки на эпицентральное расстояние и особенности строения среды в районе регистрирующей станции [13].

С использованием данных по поглощению поперечных волн и данных по геолого-тектоническому строению, проведено разбиение территории Северной Евразии на блоки с аналогичным строением (рисунок 2).



Рисунок 2. Регионализация Центральной и Южной Азии по близким характеристикам поглощения S-волн и сходному геолого-тектоническому строению



ABKAR AKTO BRVK BVAR CHKZ KKAR KURK MKAR VOS ZRNK

Рисунок 3. Количество сейсмических записей, по которым выполнены замеры параметра Sm/Pm для каждой из станции

Как следует из рисунка 2, всего на территории Центральной и Южной Азии выделено 38 блоков.

База данных событий по Центральной и Южной Азии

Для выбора событий по каждому блоку были проанализированы каталоги NEIC (National Event Information Center (каталог Геологической службы США) и сводный бюллетень Центра сбора и обработки специальной сейсмической информации (ЦСОССИ) НЯЦ РК и Института сейсмологии МОН РК за 2003 - 2007 гг. Выбирались коровые землетрясения с магнитудой mb≥4.0. Если количество событий превышало 10, то из них выбирались землетрясения с максимальными магнитудами. Всего в базу данных включены цифровые записи более 400 событий в формате CSS3.0 (Center for Seismic Studies v.3.0)/. Каждая сейсмограмма проверена на качество, при этом часть их отбракована по таким причинам, как отсутствие записи на сейсмограмме из-за слабого сигнала, очень низкое соотношение сигнал/помеха, наложение двух и более сигналов и др. В общей сложности отобрано и обработано более 3200 записей. В базу данных, кроме волновых форм в формате CSS3.0, включена информация о наблюдательных станциях, регистрирующей аппаратуре, источниках, измеренных амплитудах, периодах и др. Для каждого из блоков получены матрицы различных параметров для каждой станции, каждого фильтра. На рисунке 3 приведено количество замеров параметра Sm/Pm для каждой из 10 наблюдательных станций, которое изменялось: ABKAR (Акбулак), АКТО (AS059-Актюбинск), BRVK (Боровое-IRIS), CHKZ (Чкалово), KKAR (Каратау), KURK (AS058-Курчатов), МКАК (PS23-Маканчи), VOS (Восточное), ZRNK (Зеренда).

Методика измерений

Для выделения на записях региональных сейсмических фаз при расстояниях до 2000 км использовался годограф, полученный в Комплексной сейсмологической экспедиции (КСЭ) ОИФЗ РАН [14]. Основными фазами, выделяемыми в районе Центральной Азии на этих расстояниях, являются Pn(P), Pg, Sn и Lg. Группы Sn и Pn, сформированы соответственно поперечными и продольными волнами, проникающими в верхнюю мантию. Волны Lg и Pg образованы соответственно поперечными и продольными волнами, запредельно отраженными от границ земной коры.

Для выделения на записях сейсмических фаз при расстояниях больше 2000 км использовался годограф IASPEI-91 (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, 1991).

Помимо амплитуды основных региональных фаз, измерялась максимальная амплитуда в группе Рволн (Pm), а также в волновом пакете, сформированном поперечными волнами (параметр Sm, соответствующий максимальной фазе на отрезке между вступлениями Sn и Lg-волн). После этого рассчитывались логарифмы отношений амплитуд. Наибольшее количество данных получено для параметров Lg/Pm и Sm/Pm.

Измерение отношений амплитуд разных фаз выполнено при узкополосной фильтрации на вертикальном канале. Использованы фильтры с центральной частотой 0.6, 1.25, 2.5, 5 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы на уровне –3 Дб от максимума. В целом методика замеров была аналогична методике, которая использовалась для нахождения параметров распознавания ядерных взрывов и землетрясений для испытательных полигонов Центральной и Южной Азии [15, 16]. В качестве примера на рисунке 4 приведены сейсмограммы события из региона 13 (Копетдаг, 12/22/2003, t_0 =19-13-05.6, ϕ =37.207°, λ =56.897°) с расставленными временами вступления основных региональных фаз.

По результатам измерений для каждого блока и для каждого диапазона частот построены распределения величин логарифмов отношений амплитуд фаз, сформированных поперечными волнами, к амплитудам различных групп продольных волн, рассчитаны медианы, средние значения и стандартные отклонения.

Анализ результатов

Значения спектральных отношений продольных и поперечных волн, полученные по результатам замеров, были нанесены на карту Центральной и Южной Азии. На рисунке 5 приведен пример картирования территории по параметру Sm/Pm, для которого получен наибольший объем данных, по станции BRVK. Аналогичные карты построены для других параметров распознавания - Lg/Pm, Lg/Pn, Sm/Pn для всех станции НЯЦ РК.



Рисунок 4. Сейсмическая запись события с отмеченными временами вступления основных региональных фаз. Блок 13 (Копетдаг). Вертикальная компонента



Рисунок 5. Картирование территории Центральной и Южной Азии по параметру Sm/Pm для фильтра 0.6 Гц Станция BRVK

Из рисунка 5 следует, что в целом величины Sm/Pm по данным станции BRVK уменьшаются с увеличением эпицентрального расстояния, что свидетельствует о более сильном затухании поперечных волн в земной коре и верхней мантии по сравнению с продольными волнами. В связи с этим возможности распознавания сейсмических событий в рассматриваемом регионе ухудшаются на больших расстояниях. По данным станции BRVK выделяются участки резкого падения этих величин (в первую очередь, в районах Ирана (блок 19) и Тибета (блок 25). В Северной Индии (блоки 33, 34) значения параметра возрастают по сравнению с Тибетом. Судя по имеющимся предварительным данным, район китайского полигона Лобнор (блок 10) и его ближайшие окрестности характеризуются сравнительно высокими значениями параметра Sm/Pm, что облегчает возможности распознавания подземных ядерных взрывов на этом полигоне.

Выводы

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Проведена систематизация известных данных по поглощению S-волн и геологическому строению. Территория Центральной и Южной Азии разбита на блоки с аналогичным строением.

2. Из каталогов NEIC и ЦСОССИ отобраны коровые события. Создана база данных сейсмических событий по цифровым записям для каждой станции и для каждого блока.

3. Проведены замеры параметров Sm/Pm и Lg/Pm для различных узкополосных ЧИСС фильтров применительно к каждому блоку и по каждой станции.

4. Проведено картирование территории Северной Евразии по исследованным параметрам.

5. Полученные данные в дальнейшем можно будет использовать в практике распознавания природы сейсмических событий.

Литература

- 1. Копничев, Ю.Ф. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов на полигоне Лобнор / Ю.Ф. Копничев., О.М Шепелев., И.Н Соколова // Физика Земли. 2001. № 12. С.64 77.
- Соколова, И.Н. Особенности волновой структуры сейсмических записей подземных ядерных взрывов. / И.Н. Соколова, О.М. Шепелев // Курчатов. – (16-18 мая, 2001.) Труды конференции-конкурса молодых ученых. – С. 69 - 76.
- Копничев, Ю.Ф. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов и землетрясений на полигонах Индии и Пакистана. / Ю.Ф. Копничев, О.М. Шепелев, И.Н. Соколова // Геофизика и проблемы нераспространения. Вестник НЯЦ РК. – 2001. – вып. 2. – С. 96 - 101.
- 4. Кедров, О. К. Распознавание ядерных взрывов и землетрясений в Евразии по сейсмическим данным на региональных расстояниях / О. К. Кедров, Е. И. Люкэ // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1999. № 9. С. 52 75.
- Rodgers, A. J. (1999), A comparison of methodologies for representing path effects on regional P/S discriminants / A. J. Rodgers [et al] // Bull. Seism. Soc. Am., 89, 2 – P. 394 - 408.
- 6. Пасечник, И.П. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. / И.П. Пасечник // М.: Наука, 1970. 193 с.
- 7. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. / Ю.Ф. Копничев // М.: Наука, 1985. 176 с.
- 8. Копничев, Ю.Ф. Детальное картирование верхней мантии Тянь-Шаня по поглощению поперечных сейсмических волн / Ю.Ф. Копничев., А.Н. Нурмагамбетов // Физика Земли. 1987. №10. С. 11-25.
- 9. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км. / Ю.Ф. Копничев, А.Р. Аракелян. // Вулканология и сейсмология. – 1988. – № 4. – С. 77 - 92.
- 10. Копничев, Ю.Ф. Детальное картирование верхней мантии Тянь-Шаня по поглощению поперечных сейсмических волн / Ю.Ф. Копничев, А.Н. Нурмагамбетов // Физика Земли. 1987. № 10. С. 11 25.
- 11. Копничев, Ю.Ф. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км. / Ю.Ф. Копничев., А.Р. Аракелян // Вулканология и сейсмология. 1988. № 4. С. 77 92.
- 12. Глубинное строение слабосейсмичных районов СССР. / Ю.К. Щукин [и др]. М.: Наука, 1987. 238 с.
- 13. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности литосферы и астеносферы Центральной Азии. / Ю.Ф. Копничев // ДАН. 1992. Т. 327? N 4 6. С. 475 480.
- 14. Нерсесов, И.Л. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра / И.Л. Нерсесов, Т.Г. Раутиан // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР. М.: Наука, 1964. – С. 63 - 87.
- Соколова, И.Н. Распознавание подземных ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях по станциям сейсмической сети НЯЦ РК. / И.Н. Соколова // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 3. – С. 119 - 123.
- 16. Соколова, И.Н. Распознавание подземных ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях. / И.Н. Соколова // Российский геофизический журнал. Санкт-Петербург, 2004. С. 35 36.

ОРТАЛЫҚ ЖӘНЕ ОҢТҮСТІК АЗИЯ АУМАҒЫ ҮШІН S/P СПЕКТРАЛЬ ҚАТЫНАСТАРЫ

Ақсамбиев С.С., Соколова И.Н.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Орталық және Оңтүстік Азияның кең аумағында болған жерсілкінулер жазбаларының динамикалық параметрлерін зерттеу нәтижелері келтірілген. S/P спектраль қатынастары есептелген, жарылыстар мен жерсілкінулерді тану параметрлерін картаға түсіру әдісі әзірленген.

S/P SPECTRAL RATIO FOR CENTRAL AND SOUTH ASIA TERRITORY

S.S. Axambiev, I.N. Sokolova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Dynamic parameters investigation results of earthquake records happened in Central and South Asia region are shown. S/P spectral ratios were calculated. Developed mapping methods of explosions and earthquakes identification parameters are described.

ИЗУЧЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ПЛОЩАДОК СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ ПАРКА ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ (ПЯТ)

¹⁾Морговская М.К., ¹⁾Михайлова Н.Н., ²⁾Демин В.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан ²⁾Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

Представлены результаты исследований по оценке сейсмической опасности одной из площадок под строительство AC. Применены методы сейсмологической регистрации взрывов, землетрясений и микросейсм. Дана количественная оценка изменения (увеличения или уменьшения) сейсмической балльности по сравнению с ее фоновой (исходной) величиной с указанием интенсивности в баллах для рассматриваемой площадки.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙ-СТВИЙ НА ПЛОЩАДКАХ

По собранным за последние годы макросейсмическим данным в г. Курчатове неоднократно ощущались землетрясения. Так, в 1976 г. ощущались колебания с интенсивностью 4 - 5 баллов, в 1996 г. - 3 балла, в 2003г. - 4 балла, 29 января 2008 г.- 3 балла. [4] Собранные сведения служат основанием для детального анализа как сейсмичности территории СИП, так и параметров сейсмических воздействий от возможных землетрясений. Одним из аспектов оценки сейсмической опасности является метод сейсмического микрорайонирования. Его целью является определение характеристик воздействий за счет инженерно-геологических условий площадки. Основным методом решения этой задачи является инструментальная регистрация землетрясений и взрывов.

Методы сейсмической регистрации землетрясений и взрывов

Метод базируются на сравнении амплитуд сейсмических колебаний (смещений, скоростей, ускорений), спектров Фурье и спектров действия для количественной оценки относительных изменений сейсмической интенсивности на участках с различными инженерно-геологическими условиями. [1, 2, 5].

Для установления соотношений количественных характеристик между параметрами сейсмических воздействий различной интенсивности и выявления роли остаточных деформаций в общем сейсмическом эффекте, параллельно с регистрацией землетрясений малых энергий и взрывов рекомендуется производить регистрацию сильных землетрясений в ждущем режиме. [1, 6]. Метод регистрации фона высокочастотных микросейсм следует применять как вспомогательный для оценки резонансных характеристик грунтов, путем регистрации и сопоставления преобладающих периодов и амплитудного уровня микроколебаний для различных типовых грунтовых условий.

Результаты полевых исследований

С целью изучения сейсмических колебаний в северной части г. Курчатова (района исследуемой площадки) выполнены непрерывные сейсмические наблюдения с использованием двух аппаратурно-программных комплексов (сейсмических станций) DAS PMD-6102. В ходе обработки зарегистрированной информации для оперативного удобства сейсмические трассы обеих станций были объединены в один пакет (12 трасс). На непрерывной сейсмической записи за период с 11.05.2007 по 10.07.2007 были выявлены три типа сигналов: микросейсмы естественного и искусственного происхождения; карьерные химические взрывы; землетрясения различной удалённости.

Анализ полученных результатов

Исследование параметров сейсмических воздействий проведено на двух площадках (рисунок 1): на первой площадке были установлены временные сейсмические станции (S09 и S10)) с трехкомпонентными датчиками, на второй - стационарной сейсмостанции Курчатов – станция IRIS (KURK), расположенная на дне 22-метровой шахты и оборудованная трехкомпонентным датчиком. Станция Курчатов – IRIS (KURK) расположена на грунтах I категории по сейсмическим свойствам в соответствии с таблицей 4.1 СНиП РК 2.03-30-2006 [1], [3] и принята за эталон (рисунок 1).



Рисунок 1. Расположение изучаемой площадки, полевых станций (S09 и S10) и стационарной станции IRIS-KURK

Исследования производились, во-первых, по записям станций S09 и S10 событий разной природы карьерных взрывов и землетрясений, - изучались отношения амплитуд в цугах S -волн в различных частотных диапазонах и по записям стационарной станции Курчатов - IRIS (KURK). Во-вторых, изучались спектральные отношения уровней спектров Фурье по этим трем станциям для землетрясений и взрывов. В-третьих, изучались параметры сейсмических шумов на различных частотах. Для изучения амплитуды записей землетрясений были выбраны события из числа обработанных в течение полевого сезона. Эпицентры использованных для анализа землетрясений представлены на рисунке 2. Относительно станций землетрясения находятся как на локальных, так и на региональных расстояниях (от 111 км до 1518 км).



Звездочки: красная – эпицентр землетрясения, белая - эпицентр землетрясения, для которого рассчитан спектр сигнала

Рисунок 2. Эпицентры землетрясений, использованных для анализа сейсмических воздействий. Белым треугольником показано размещение полевых станций;

После измерения всех амплитуд рассчитывалось отношение амплитуд на станциях S09 и S10 к KURK. Затем для каждой станции и для каждого фильтра рассчитывались значения медиан распределений отношений амплитуд. В таблице 1 приведены значения медиан, полученные по записям землетрясений [5].

Таблица 1. Значения медиан отношения амплитуд по станциям S09 и S10 к станции Курчатов для разных частотных фильтров. Землетрясения

Частота (Гц)	0,6	1,25	2,5	5
S09	1,23	9,97	16,13	12,90
S10	0,82	2,40	12,56	11,38

Как видно из таблицы 1, на разных частотах происходит различное усиление грунтовой толщей колебаний относительно скального фундамента. Наибольшее усиление по обеим станциям отмечено на частоте 2,5 Гц. Оно достигает 12,56, 16,13 для станций S10 и S09, соответственно. Между собой станции S09 и S10 существенно различаются. На частоте 1,25 Гц станция S09 в 4 раза сильнее усиливает колебания по сравнению со станцией S10 (9,97 против 2,4). Схематично полученная частотная характеристика грунтов по данным двух станций приведена на рисунке 3.

Такой же анализ сделан по записям взрывов (таблица 2).



Рисунок 3. Значения усиления амплитуд по станциям S09 и S10 относительно станции Курчатов для разных частотных фильтров (по записям землетрясений)

N	Дата	Юлианский день	Время в очаге, t0	Широта	Долгота	Глубина,h	Магниитуда,	Энергетический класс, Е	Расстояние до станции, км
1	5/14/2007	(134)	11:14:33.488	51.129273	75.325983	0.000000	2.69	7.46	228
2	5/20/2007	(140)	13:08:26.678	50.035548	78.761634	0.000000	2.32	6.63	83
3	5/21/2007	(141)	7:21:46.398	50.224560	79.909232	0.000000	2.10	4.93	115.039
4	5/29/2007	(149)	13:07:59.716	50.081199	79.044332	0.000000	2.42	6.89	84.644
5	6/06/2007	(157)	7:23:31.525	49.957275	78.687684	0.000000	2.87	7.52	90.835
6	6/07/2007	(158)	9:26:33.122	49.896171	83.801345	26.600146	3.90	10.38	387.839
7	6/12/2007	(163)	6:30:38.742	49.692926	78.011288	0.000000	1.78	4.92	125.185
8	6/12/2007	(163)	13:15:43.999	50.067758	78.782981	11.901790	2.65	6.96	79.889
9	6/17/2007	(168)	6:47:37.751	49.910513	79.751813	0.000000	1.91	5.23	129.088
10	6/26/2007	(177)	13:02:54.283	50.255991	79.903201	0.000000	2.28	6.08	112.843
Π			~						

Таблица 2. Каталог промышленных взрывов, использованных для анализа.

Примечание: красным выделены события, для которых рассчитан спектр сигнала



Треугольник - расположение полевой станции. Звездочка: фиолетовая - эпицентр взрыва, белая - взрывы, для которых рассчитан спектр сигнала

Рисунок 4. Эпицентры взрывов, использованных для анализа

На рисунке 4 представлена карта эпицентров зарегистрированных промышленных взрывов, использованных для анализа.

Методика измерений амплитуд по записям взрывов была аналогична измерениям по записям землетрясений.

После замеров амплитуд и всех отношений, рассчитаны медианы распределений по каждой станции, по каждому фильтру. Значения медиан отношений амплитуд приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения отношения амплитуд по станциям S09 и S10 к амплитудам по станции Курчатов для разных частотных фильтров. Промышленные взрывы

Частота (Гц)	0,6	1,25	2,5	5
S09	1,09	8,14	10,88	6,64
S10	0,88	2,39	16,75	7,3

Как видно из таблицы 3, наблюдается картина, сходная с данными по землетрясениям. Наибольшее усиление характерно для частоты 2,5 Гц. Оно достигает 10,88 – 16,75 для станций S10 и S09 соответственно. Наибольшее различие в усилении между двумя станциями отмечено на частоте 1,25, доходящее примерно до 4 раз (8,14 против 2,39). Схематично полученная частотная характеристика грунтов по данным двух станций приведена на рисунке 5. Все данные по взрывам и землетрясениям были проанализированы совместно. Результирующий график амплитудных усилений представлен на рисунке 6 и таблице 4.



Рисунок 5. Значения отношения амплитуд, зарегистрированных станциями SO9 и S10 относительно станции Курчатов по разным частотным фильтрам (взрывы)




S09 и S10 по отношению к станции Курчатов (KURK)							
для разных	частотнь	іх фильтр	ров (сводна	я)			
Частота (Гц)	0,6	1,25	2,5	5			

Таблица 4. Значения отношения амплитуд по станциям

Частота (Гц)	0,6	1,25	2,5	5
S09	1,16	8,33	14,32	9,94
S10	0,85	2,40	12,69	10,10

В исследованном диапазоне частот от 0,6 до 5 Гц грунты на обеих площадках ведут себя идентично: наблюдается резонансное усиление колебаний на частоте 2,5 Гц. На границах частотного диапазона усиление абсолютно одинаково, но на частоте 1,25 Гц условия по станции S09 несколько хуже станции S10. Этот вывод был проверен и с помощью спектрального анализа записей по ряду событий. С этой целью рассчитывался амплитудный спектр Фурье по записи каждой станции. Использовались записи, как землетрясений, так и взрывов. Пример полученных спектров показан на рисунках 7 и 8.



Рисунок 7. Спектры Фурье карьерного взрыва по трем станциям



Рисунок 8. Спектры Фурье землетрясения по трем станциям

Если ограничиться диапазоном частот 0,6 – 5 Гц, то видно, что по станциям S09 и S10 уровень спектра выше, чем по станции Курчатов. Между собой две полевые станции имеют близкий уровень спектров. Наибольшие расхождения в уровнях достигаются на частотах близких к 1,25 Гц. Третьим видом изучаемых колебаний были постоянно действующие сейсмические шумы (микросейсмы). По записям каждой станции были отобраны отрезки записей длиной по 10 минут без видимых событий или хвостов сильных далеких землетрясений. По каждому отрезку проводился расчет спектров шума, причем раздельно анализировались записи дневного и ночного шума. Всего получено 10 спектров сейсмического шума. На рисунках 9 и 10 приведены примеры спектров шума для дневного и ночного периодов.



Рисунок 9. Спектры сейсмического шума (дневное время)



Рисунок 10. Спектры сейсмического шума (ночное время)

Для проведения статистической обработки спектров шумов было проведено осреднение всех спектральных кривых. Осредненные спектры показаны на рисунке 11.

После осреднения все спектры были обработаны в комплексе, и выявлены основные закономерности. Общими закономерностями являются: стабильно более высокий уровень по станциям S09 и S10 по отношению к станции Курчатов; близкие значения уровней двух полевых станций на частотах 0,6 и 5 Гц; максимальное завышение полевых станций относительно стационарной станции KURK на частотах 1,25 – 2,5 Гц.





Выводы

 Экспериментально изучены спектральные характеристики колебаний грунтов на исследованной площадке. Максимальное усиление сейсмических колебаний на рыхлых грунтах относительно эталонных скальных грунтов происходит на частоте 2,5 Гц. Этот резонансный эффект грунтовой толщи следует учитывать при проектировании сооружений.

2. Проведенными расчетами показано, что за счет усиления колебаний грунтовой толщей на исследуемой площадке может наблюдаться приращение исходной балльности на один балл относительно средних грунтовых условий и на два балла относительно скальных грунтов.

3. Методика проведения работ может быть рекомендована для применения в других практических исследованиях по сейсмическому районированию, микрорайонированию и оценке сейсмического риска.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. СНиП РК 2.03-30-2006 «Строительство в сейсмических районах». Изд.: Комитет по делам строительства и жилищнокоммунального хозяйства Министерства индустрии и торговли Республики Казахстан. - Алматы, 2006. – 80 с.
- Tanaka, T. Attenuation relations for peak amplitudes of earthquake ground motions. Proc. Fifteenth Earth. Ground Motion Symp. / T. Tanaka, U. Fukushima // Architectural Inst., Japan., 1987. – P. 7 - 16.
- 3. Шкала для оценки интенсивности землетрясений MSK 64 (К) / Изд.: Комитет по делам строительства и жилищнокоммунального хозяйства. Министерство индустрии и торговли Республики Казахстан // Алматы, 2004. – 16 с.
- Михайлова, Н.Н. Исследование сейсмичности территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона и его окрестностей / Н.Н. Михайлова [и др.] // Москва: Геофизика XXI столетия, 2006. - С. 179 - 190.
- Калиберда И.В., Бугаев Е.Г, Бедняков В.Г, Лавров И.М., Фихиева Л.М. (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Аптикаев Ф.Ф., Николаев А.В. (Институт физики Земли РАН), Казновский С.П. (ВНИИАМ), Пискарев В.В., Тяпин А.Н. (ФГУП "Атомэнергопроект"). Некоторые итоги обеспечения сейсмостойкости АЭС в России.
- 6. Программа работ на проведение инженерных изысканий и исследований при выборе площадок ЯТК / ИГИ НЯЦ РК, Курчатов, 2007.

ЯДРОЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ПАРКІНІҢ (ЯТП) ОБЪЕКТІЛЕРІН ҚҰРУ АЛАҢДАРЫН ЗЕРТТЕУІНДЕ СЕЙСМИКАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРІНІҢ СПЕКТРЛІК МІНЕЗДЕМЕЛЕРІН ЗЕРДЕЛЕУ

¹⁾Морговская М.К., ¹⁾Михайлова Н.Н., ²⁾Демин В.Н.

¹⁾ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер нституты, Курчатов, Қазақстан ²⁾Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Курчатов

АС құруына алаңдардың біреуінің сейсмикалық қауіпін бағалау бойынша зерттеулерінің нәтижелері келтірілген. Жарылыстарды, жерсілкінулерді және микросейсмоларды сейсмологиялық тіркеу әдістері қолданылған. Қаралудағы алаңы үшін, оның ая (бастапқы) балдылығының шамасымен салыстыруында, қарқындылығын көрсетуімен, сейсмикалық балдылығы өзеруінің (көбею немесе азаю) санды бағлауы берілген.

INVESTIGATION OF SEISMIC IMPACT SPECTRAL FEATURES WHILE OBJECTS INSPECTION WITHIN CONSTRUCTION SITE OF THE PARK OF NUCLEAR TECHNOLOGIES (TECHNOPARK)

¹⁾M.K. Morgovskaya, ¹⁾N.N. Mikhailova, ²⁾V.N. Demin

¹⁾Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan ²⁾National Nuclear Centre of the Republic of Kazakstan, Kurchatov

Research results for evaluation of seismic hazard within the construction site for APP have been given. Seismological recording methods of explosions, earthquakes and microseisms have been applied. Quantitative assessment of changes (increase of decrease) for seismic intensity in comparison with its initial value within the investigated site has been provided.

УДК.550.34:681.3

ИНФОРМАТИВНОСТЬ И ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ БЮЛЛЕТЕНЕЙ ЦЕНТРА ДАННЫХ ИГИ НЯЦ РК

Куликова Г.О.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Для восьми районов Центральной Азии проведена оценка уровня минимальных энергетических классов и магнитуд событий представительно, без пропуска, регистрируемых станциями сети НЯЦ РК, и включаемых в сейсмологические бюллетени, создаваемые в Центре данных ИГИ НЯЦ РК. Отдельно оценен магнитудный порог сейсмических событий, регистрируемых сетью станций НЯЦ РК, на территории трех ядерных испытательных полигонов Азии.

Введение

Казахстанский Центр сбора и обработки специальной сейсмической информации (ЦСОССИ) [3], созданный в 1999 г. в г. Алматы как филиал ИГИ НЯЦ РК, выполняет функции Казахского национального центра данных (KNDC) в Международной системе мониторинг (МСМ) Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ОДВЗЯИ). В Центре данных создаются сейсмические бюллетени с полной информацией о событиях, регистрируемых на территории Центральной Азии. Однако имеются регионы, где данные сети НЯЦ РК являются не достаточно полными. К ним относится, например, район Северного Тянь-Шаня вблизи города Алматы, где представительность данных сети НЯЦ РК значительно уступает представительности данных сети станций Сейсмологической опытно-методической экспедиции (СОМЭ) МОН РК, сконцентрированной именно в этом районе.

СЕТЬ СТАНЦИЙ НЯЦ РК И СОМЭ МОН РК

Основу сети сейсмических наблюдений НЯЦ РК составили геофизические обсерватории: Боровое, Курчатов, Актюбинск, Маканчи, созданные в советское время специально для контроля за ядерными испытаниями, проводимыми в разных районах мира [4]. В 1994 г. они были переданы Институту геофизических исследований НЯЦ РК. В настоящее время сеть станций НЯЦ РК (рисунок 1) включает восемь сейсмических групп, пять 3-х компонентных станций и три инфразвуковые станции. Данные почти всех станций поступают в режиме реального времени в Центр данных в г. Алматы. Станции сейсмической сети СОМЭ МОН РК, обеспечивающие экспериментальными данными Институт сейсмологии МОН РК (рисунок 2), сконцентрированы вблизи г. Алматы.







СЕЙСМИЧЕСКИЕ БЮЛЛЕТЕНИ ЦЕНТРА ДАННЫХ ИГИ НЯЦ РК

Результатом обработки данных, поступающих от станций НЯЦ РК в режиме реального времени в Центр данных, являются 3 типа бюллетеней [1]: автоматический, интерактивный и сводный,- отличающиеся набором входных данных, методикой их обработки и степенью оперативности.

Автоматический бюллетень

Обработка событий в автоматическом режиме проводится непосредственно после поступления данных и завершается с окончанием работы программ обработки. Решения, приведенные в автоматическом бюллетене, могут считаться первым приближением в оценке основных параметров землетрясений или взрывов. Автоматическая локализация событий проводится с использованием программы GBF, предоставленной Норвежским центром NORSAR, в три этапа.

На первом этапе определяются времена вступлений и идентифицируются типы волн: P, Pn, Sn, Lg, Rg для региональных сигналов или ложное детектирование. При этом к одному вступлению может быть отнесено несколько типов волн (например, P и Pn, или Sn и Lg). При нескольких вступлениях с близкими азимутами и кажущимися скоростями, в последующей обработке участвует только первое вступление, последующие вступления считаются принадлежащими коде этой волны.

На втором этапе ведется локализация события по выделенным и идентифицированным вступлениям сейсмических фаз. При этом используется разбивка земной поверхности равномерной сетью с параметрами: центр сети: 50° с. ш., 75° в. д.; расстояние между узлами сети – 1,5°; число узлов решетки – 82 по широте и 54 по долготе. Производится перебор всех вступлений для каждого узла решетки. Если для какого-либо узла решетки находится более, чем одно подходящее вступление, то в районе этого узла решетки производится дополнительный поиск по более густой сети (0.1°). В результате выбираются координаты узла решетки с минимальной невязкой по временам прихода и азимутам подхода ассоциированных вступлений. Результаты анализа заносятся в промежуточный файл.

На третьем этапе ведется отбраковка решений со слишком большими невязками, рассчитываются магнитуды событий, результаты локализации события записываются в формате CSS3.0 (Center for Seismic Studies v.3.0) .в базу данных. Тем самым заканчивается обработка данных автоматического сейсмологического бюллетеня, который в режиме близком к реальному времени, помещается на Webсайте ЦСОССИ (www.kndc.kz).

Интерактивный бюллетень

Интерактивный бюллетень сейсмических событий создается с участием аналитиков Центра данных, выполняющих круглосуточно обработку данных мониторинга с использованием специального программного обеспечения. Интерактивный бюллетень создается с задержкой по отношению ко времени получения данных на сутки и по сравнению с автоматическим бюллетенем он содержит более полную и точную информацию. Составление оперативного интерактивного бюллетеня происходит в два этапа. На первом этапе дежурный аналитик просматривает исходные записи, проверяет правильность и корректирует автоматически расставленные вступления, переименовывает неправильно распознанные фазы, добавляет новые вступления. На следующем этапе с использованием программы SEATOOLS аналитик производит локализацию событий. Аналитик также определяет азимут и «медленность» для фаз, расставленных вручную. Результаты локализации хранятся в виде суточных файлов в формате CSS3.0.

Регулярное составление оперативного интерактивного сейсмологического бюллетеня ведется с осени 2001 г. В этот вид бюллетеня включаются как данные по взрывам - ядерным, промышленным, так и по землетрясениям.

Сводный бюллетень

Сводный бюллетень включает события, зарегистрированные двумя сетями наблюдений: НЯЦ РК и СОМЭ МОН РК. Бюллетень составляется в Центре данных ИГИ НЯЦ РК после получения данных СОМЭ, которые поступают по электронной почте в виде таблиц с результатами обработки данных мониторинга (без волновых форм сигналов). Сводный бюллетень составляется в три этапа. На первом этапе дежурный аналитик, используя специальное програмное обеспечение, проводит ассоциирование событий, полученных из СОМЭ, с событиями из базы Центра данных. На втором этапе проводится корректировка времен вступлений выявленных фаз, добавляются новые вступления. На третьем этапе с помощью программы **SEATOOLS** (предоставленной сотрудниками норвежского ценра данных NORSAR) аналитик проводит локализацию уже ассоциированных событий.

Оперативный сводный сейсмологический бюллетень составляется регулярно, начиная с 2003 г. и, также как интерактивный бюллетень, включает данные по сейсмическим событиям различной природы. По готовым бюллетеням, после распознавания событий, составляются два вида каталогов: землетрясений и промышленных взрывов. На рисунке 3 приведена карта эпицентров землетрясений за 2003 г. середина 2007 г. За этот период обработано и локализовано более 67 000 сейсмических событий, т.е. в среднем около 60 событий в день.

РЕГИСТРАЦИЯ СЕТЬЮ НЯЦ РК СОБЫТИЙ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА

На основе создаваемых в Центре данных бюллетеней проведена оценка энергетической представительности. событий, регистрируемых на территории Казахстана. С этой целью территория с наиболее высоким уровнем сейсмичности была разделена на 8 районов. Использован каталог землетрясений за период с 2003 г. по июль 2007 г., составленный в Центре данных. На рисунках 5а, 5б и 5в показаны карты минимальных магнитуд событий, регистрируемых тремя ведущими сейсмическими группами НЯЦ РК: Акбулак, Маканчи, Каратау.



Рисунок 3. Карта эпицентров землетрясений за период с 2003 г. до середины 2007 г.

Рисунок 4. Карта регионализации территории для оценки энергетической представительности регистрации



Рисунок 5. Карты минимальных значений магнитуд по станциям

Наиболее низкие магнитуды регистрируются в непосредственной близости от станций. По мере удаления от них уровень минимальных магнитуд зарегистрированных землетрясений повышается [2]. В связи с азимутальным различием в затухании сейсмических волн наблюдается разная дальность регистрации событий одной и той же энергии в разных направлениях. Несмотря на то, что данные о минимальных магнитудах позволяют получить некоторое представление о чувствительности сети, для уверенных оценок этого недостаточно. Более полное представление о минимальных порогах магнитуд событий, регистрируемых и обрабатываемых без пропуска, дает изучение так называемых графиков повторяемости, позволяющих определять представительную магнитуду или энергетический класс землетрясений. С этой целью построены кумулятивные графики повторяемости по сейсмическим событиям, включенным в каталог землетрясений, являющийся частью сводного сейсмического бюллетеня. В таблице 1 приведены оценки минимального представительного энергетического класса по районам.

Как видно из таблицы 1, наибольшее число событий зарегистрировано в районе 3 (10480), а также в районах 4 и 2 (8778 и 6061, соответственно). В других районах, менее сейсмичных, число событий колеблется от 203 до 4060. На рисунке 6 приведены графики повторяемости событий, построенные для районов, по которым определен достоверный энергетический класс.

Таблица 1. Сведения о представительном энергетическом классе регистрируемых событий

Номер района	К предст.	Число со- бытий	Номер района	К предст.	Число со- бытий	Номер района	К предст.	Число со- бытий
1	7	330	4	6	8778	7	7	1301
2	7	6061	5	6	4060	8	9	325
3	6	10480	6	-	203			



Рисунок 6. Графики повторяемости, построенные для районов: а - 1, б - 2, в - 3, г - 4, д - 5, е - 6, ж - 7, з -8

Из приведенных графиков следует, что минимальная величина представительного энергетического класса наблюдается в областях 2, 3 и 4. Сравнение данных сводного бюллетеня с данными интерактивного бюллетеня (в котором не учитываются данные станций СОМЭ) для одних и тех же районов в виде графиков повторяемости приведено на рисунке 7.

Количество зарегистрированных слабых событий изменяется в зависимости от использованного бюл-

летеня. Особенно это заметно для региона 3, где количество событий, например, класса 6, обработанных совместно по данным СОМЭ и НЯЦ РК, превышает количество событий, обработанных только по данным сети НЯЦ РК, более чем на 5000 событий, то есть, более 1000 событий в год. Таблица 2 демонстрирует количественные различия событий для регионов 2 - 4 по данным сводного и интерактивного бюллетеней.



Рисунок 7. Графики повторяемости по данным интерактивного и сводного бюллетеней, построенные для различных районов: а - 2, б - 3, в- 4

Энорготиноо		Число событий			Энорготиноский	Число событий		
Регион	класс	интерактивный бюллетень	сводный бюллетень	Регион	класс	интерактивный бюллетень	сводный бюллетень	
	<5	4434	5342	3	<7	1841	4825	
2	<6	2266	2560		<5	4717	8201	
	<7	1139	1072	4	<6	3197	6924	
2	<5	4315	9910		<7	1324	2227	
3	<6	3207	8312					

Таблица 2. Количество событий для регионов 2 - 4 по данным сводного и интерактивного бюллетеней

Из таблицы видно, что количество слабых событий для района 3, где большей частью и сосредоточены станции СОМЭ, в сводном бюллетене значительно выше, чем в интерактивном бюллетене. Это свидетельствует о продуктивности сотрудничества Центра данных и СОМЭ МОН РК.

РЕГИСТРАЦИЯ СЕТЬЮ НЯЦ РК СОБЫТИЙ НА территории ядерных полигонов Лобнор, Похаран, Чагай

Ядерные полигоны Лобнор, Похаран, Чагай, расположение которых показано на рисунке 8, являются ближайшими к сейсмической сети НЯЦ РК испытательными полигонами. Поэтому очень важно оценить энергетическую представительность сейсмических бюллетеней НЯЦ РК применительно к территории этих полигонов.

Оценка была проведена по сводному бюллетеню. Данные о минимальном энергетическом классе, представленные в таблице 3, говорят о чувствительности сети станций НЯЦ РК относительно событий на территории полигонов.

На рисунке 9 приведены графики повторяемости для каждого полигона в отдельности. Как видно из графиков, для полигона Лобнор сеть НЯЦ РК достоверно регистрирует события с энергетическим классом 7. Для полигонов Чагай и Похаран значение представительного энергетического класса значительно выше. Это можно объяснить тем, что сейсмическая группа Маканчи расположена достаточно близко к территории полигона Лобнор.



Рисунок 8. Карта эпицентров событий, произошедших вблизи территорий ядерных испытательных полигонов Лобнор, Похаран, Чагай

Таблица 3. Значения минимальных энергетических классов регистрируемых событий вблизи территорий испытательных полигонов

Название полигона	Lat	Lon	K _{min}	Количество зарегистрированных событий
Лобнор	38.00-44.00	84.00-92.00	5.2	875
Похаран	26.00-33.00	67.80-75.00	8.7	54
Чагай	25.00-33.00	61.00-67.80	9.9	22



Рисунок 9. Графики повторяемости для полигонов

Выводы

• Сейсмическая сеть станций НЯЦ РК достоверно регистрирует события на всей территории Центральной Азии. Значения представительного энергетического класса варьируются в зависимости от региона, однако для всей территории Центральной Азии оно не превышает девяти.

• Уровень минимального энергетического класса событий, без пропусков регистрируемых на территориях вблизи испытательных полигонов Центральной Азии, свидетельствует о том, что станции НЯЦ РК

должны надежно регистрировать испытания малых ядерных устройств (мощностью 1 кт и менее).

• Успешное сотрудничество с СОМЭ МОН РК обеспечило высокую представительность регистрации в самом активном регионе Центральной Азии – Северном Тянь-Шане, вблизи г. Алматы.

Литература

- 1. Михайлова, Н.Н. Обработка данных сейсмических станций НЯЦ РК / Н.Н. Михайлова, З.И. Синева // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2002. Вып. 2(10). С. 64 68.
- Михайлова, Н.Н. Оценка эффективности сейсмической группы PS23-Маканчи при регистрации региональных и телесейсмических событий / Н.Н. Михайлова, З.И. Синёва // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2004. – Вып. 2(18). – С.13 - 19.
- Михайлова, Н.Н. Казахстанский центр сбора и обработки специальной сейсмической информации: функции, задачи, система телекоммуникаций, базы данных / Н.Н. Михайлова, З.И. Синёва // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2001. – Вып. 2. – С. 21 -2 6.
- Беляшова, Н.Н. Сейсмологическая сеть Национального ядерного центра Республики Казахстан как составная часть Международной системы мониторинга ядерных испытаний / Н.Н. Беляшова, М.Н. Малахова // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК, 2000. – Вып. 2. – С. 13 - 16.

ҚР ҰЯО ГЗИ ДЕРЕКТЕР ОРТАЛЫҒЫНДАҒЫ СЕЙСМОЛОГИЯЛЫҚ БЮЛЕТЕНДЕРІНІҢ АҚПАРАТТЫЛЫҒЫ МЕН СЕНІМДІЛІГІ

Куликова Г.О.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Орта Азияның сегіз аудандары үшін, ҚР ҰЯО станциялар желісімен сенімді, босатпай тіркелетін және ҚР ҰЯО ГЗИ Деректер орталығында жасалып жатқан сейсмологиялық бюлетендеріне қосылатын оқиғалардың минималь энергетикалық кластары мен магнитудалардың деңгейін бағалауы жүргізілген. ҚР ҰЯО станциялар желісімен тіркелетін Азиядағы үш ядролық сынаулар полигондарының аумағындағы сейсмикалық оқиғалардың магнитудалық табалдырығы бағаланған.

INFORMATIVENESS AND REPRESENTATIVITY OF SEISMOLOGICAL BULLETINS OF THE DATA CENTER IGR NNC RK

Kulikova G.O.

Institute of Geophysical Researches NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The present work estimates the level of smallest representative energy classes and magnitudes recorded in different Central Asia regions. Energy classes and magnitude values of events recorded by NNC RK network stations as well and included into seismological bulletins created in the Data Center IGR NNC RK were defined for eight regions. Magnitude registration threshold of seismic events recorded by NNC RK stations network was estimated for the territory of three Asian Test Sites.

ВЫХОД В РЕЖИМ СТАЦИОНАРНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО РЕАКТОРА С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ

Котов В.М., Иркимбеков Р.А.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Развитие атомной энергетики требует интенсивного наращивания мощностей ЯТЦ, но при использовании современных технологий происходит быстрое расходование природного сырья. Быстрое развитие станет возможным только при строительстве реакторов нового поколения – реакторов с высоким воспроизводством делящихся веществ с использованием как уранового, так и ториевого сырья. Проблема запуска ториевых реакторов состоит в отсутствии природных делящихся нуклидов в тории. Доказательство возможности запуска такого реактора без привлечения технологии быстрых реакторов повысит внимание к таким тепловым реакторам.

Исследован процесс накопления делящихся веществ в топливе реактора на тепловых нейтронах, работающего в замкнутом сопряженном уран-ториевом топливном цикле. Проработано пять вариантов начальной загрузки реактора, отличающихся технологией получения примененных делящихся веществ. Показана возможность запуска исследованных вариантов реактора. Определено время, за которое делящиеся компоненты достигнут равновесной концентрации в топливе, подобрано количество делящихся компонент в стартовом составе топлива.

Введение

Актуальной задачей атомной энергетики является повышение доли вырабатываемой ею энергии по отношению к энергии, вырабатываемой при сжигании органических топлив. Существующие тепловые реакторы, работающие на урановом топливе и потребляющие практически только ²³⁵U, эту задачу решить не в состоянии. Реакторы на ториевом топливе могут вводиться в строй также только с использованием в начале своей работы ²³⁵U.

Реакторы на быстрых нейтронах позволяют построить эффективную энергетику в отношении использования урана, но требуют больших начальных вложений природного урана, при возможности последующей работы на отвалах обогатительного производства [1, 2]. Это создает как технические, так и экономические трудности, а также увеличивает риск распространения делящихся веществ в качестве оружейных материалов.

В ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК в рамках НТП "Развитие атомной энергетики в Казахстане" исследуется возможность построения широкомасштабной энергетики, лишенной указанных недостатков. Пути решения такой задачи основаны на уменьшении паразитных потерь нейтронов, которое обеспечивается применением изотопно-модифицированных конструкционных материалов, реализации совместного ториевого и уранового топливного цикла, использовании в топливном цикле равновесного содержания делящихся веществ, а также привлечении в работу дополнительных источников нейтронов. Исследованы различные компоновки активной зоны и отражателя, температурные режимы работы, варианты применения различных теплоносителей, замедлителей, конструкционных материалов [3 4].

Важность исследований заключается в первую очередь в возможности расширения масштабов ядерной энергетики при минимальных объемах добычи урана. Низкое содержание делящихся веществ в топливе и постоянный оперативный запас реактивности на уровне $0,3 \beta$ сводит к минимуму вероятность аварий с использованием предлагаемых реакторов. Все это в свою очередь создает высокую экономическую эффективность данных реакторов. Для оценки экономики ЯТЦ использовались современные цены на добычу урана и работу с ядерным топливом [5].

На рисунке 1 приведены данные по экономике ЯТЦ современных реакторов ВВЭР-1000 и CANDU, и перспективного реактора, работающего в различных режимах использования уранового сырья и выгорания. Для сравнения реакторов их технико-экономические показатели нормированы на годовую выработку продукции, равную 1 ГВт-год, при одинаковых отпускных ценах – 4 цента за 1 кВт-час.

ВЫХОД В РЕЖИМ СТАЦИОНАРНОЙ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО РЕАКТОРА С ВЫСОКИМ ВОСПРОИЗВОДСТВОМ ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ



Рисунок 1. Экономические показатели различных реакторов

Конструкция реактора

Расчет проводился для тяжеловодного канального реактора тепловой мощностью 650 МВт. Высота активной зоны – 6 м, диаметр активной зоны – 6.8 м. Каналы реактора расположены в треугольной решетке с шагом 250 мм. Количество каналов в реакторе – 649. Канал реактора (рисунок 2) образован из двух циркониевых трубок, между которыми размещены 20 твэлов. Для уменьшения теплового потока от канала замедлителю, канал окружен теплоизоляцией. Центральная полость канала, образованная внутренней трубкой, заполнена газом ¹³⁶Хе. В качестве топлива используются нитриды тория, урана и плутония, азот которых обогащен по изотопом азота ¹⁵N. Общая масса топлива загружаемого в активную зону составляет 50 т. Топливо реактора разделено на уран-плутониевые и торий-урановые таблетки с массовым соотношением сырьевых урана и тория три к одному. В таблице 1 приведен равновесный состав топлива реактора работающего в режиме, близком к оптимальному. Приведенные в данной таблице со-держания изотопов ²³⁶U и ²⁴²Pu достигаются в ходе многих десятков лет работы реактора. В ходе первых кампаний их роль незначительна. Отражатель реактора смешанный. Ближний слой к активной зоне толщиной 150 см – тяжелая вода. Дальний слой толщиной 70 см - графит. При нейтронно-физическом расчете предполагалось, что средняя температура топлива составляет 1000 °C, средняя температура теплоносителя 330 °С и средняя температура замедлителя 70 °С.

Таблица 1. Равновесный состав топлива, кг.

²³² Th	12255	²³⁸ U	36894
²³³ Pa	13.3	²³⁹ Np	1.5
²³³ U	168	²³⁹ Pu	104
²³⁴ U	84	²⁴⁰ Pu	95.4
²³⁵ U	25.7	²⁴¹ Pu	26
²³⁶ U	154	²⁴² Pu	178



1- теплоизоляция канала; 2- внешний корпус канала; 3- слабо поглощающий нейтроны газ; 4- внутрення стенка канала; 5- теплоноситель; 6- сердечник ТВЭЛа; 7- оболочка ТВЭЛа.

Рисунок 2. Канал реактора с тяжеловодным теплоносителем

Стартовый состав топлива

В ходе исследования рассматривалась возможность использования в качестве стартового топлива, как природных ресурсов, так и продуктов накопленных в течение многих лет существования атомной энергетики. В данной работе приводятся результаты исследования пяти вариантов стартовой загрузки реактора:

- на основе природного урана в первой кампании и смеси урана, тория и делящихся веществ из отработавшего топлива первой кампании во второй кампании
- на основе обогащенного урана и тория;
- на основе смеси урана, тория и оружейного плутония – ²³⁹Pu;

- на основе смеси урана, тория и делящихся веществ из отработавшего топлива существующих тепловых реакторов.
- с использованием изотопа урана ²³³U, полученного от внешних источников.

Состав топлива подбирался таким, чтобы приближаться по качеству к топливу стационарной работы реактора (таблица 1). Размножающие свойства изотопа урана ²³³U в тепловых реакторах заметно превосходят размножающие свойства изотопа урана ²³⁵U и изотопа плутония ²³⁹Pu. По этой причине концентрация делящихся изотопов в топливе стартовой загрузки реактора должна превосходить концентрацию делящихся изотопов топлива соответствующего стационарной работе реактора. Стартовый состав топлива приведен в таблице 2.

№ вар	Исходное топливо		²³³ U	²³⁵ U	²³⁶ U	²³⁸ U	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
1	На основе природного урана		-	357	-	49630	-	-	-	-
2	На основе обогащенного урана		-	376	-	37218	-	-	-	-
3	С добавкой оружейного плутония		-	268,1	-	37218	107,5	-	-	-
4	На основе отработавшего топлива реактора ВВЭР-1000		-	320	50,1	37160	48,3	21,1	8,4	5,1
5	С добавкой изотопа урана ²³³ U, полученного от внешних источников		108	268,1	-	37218	-	-	-	-

Таблица 2. Состав стартового топлива, кг.

Для обеспечения стартовой загрузки на основе природного урана, в первой кампании производится наработка плутония, далее полученное отработавшее топливо, отчищенное от продуктов деления, смешивается с природным ураном в пропорциях, при которых размножающие характеристики топлива будут приближаться к характеристикам топлива стационарной загрузки реактора.

Для обеспечения стартовой загрузки на основе обогащенного урана потребуется 65 т природного урана для производства требуемого в таблице 2 урана с обогащением 1 %, при условии, что в отвальном уране будет 0.3 % 235 U.

Для обеспечения стартовой загрузки реактора с оружейным плутонием используется 37500 кг природного урана и 107.5 кг оружейного плутония. Для выработки этого плутония потребуется дополнительное количество природного урана большее, чем 65 т.

Для стартовой загрузки с отработавшим топливом трехлетней кампании реактора BBЭР-1000 используется отработавшее топливо [6], разбавленное природным ураном в отношении 1:3.5, Таким образом, топлива, выгружаемого из одного реактора BBЭР-1000 в год, достаточно для запуска двух реакторов.

Для обеспечения стартовой загрузки реактора с использованием изотопа урана ²³³U используется природный уран и 108 кг ²³³U.

ПРОЦЕССЫ НАКОПЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПО-НЕНТ ТОПЛИВА

В общем, можно отметить, что все варианты работоспособны. Выход в равновесное состояние достигается не более чем за шесть лет (две кампании), в том числе и в первом варианте, при котором в первую кампанию происходит наработка компонентов только уран плутониевого цикла. Детально сравнение накопления изотопов показано на рисунках 3 – 5.

На рисунке 3 показана динамика накопления изотопа урана ²³³U. Этот изотоп имеет особо важное значение в работе реактора, так как его количество составляет основную часть делящихся компонент топлива, кроме того, наличие этого изотопа в топливе заметно улучшает его размножающие характеристики. На рисунке показано, что накопление 233 U в вариантах 2, 3 и 4 одинаково. Это связано со сходным содержанием тория. В стартовом топливе варианта 5 уже имеется изотоп урана ²³³U, что положительно влияет на протекание кампании. В варианте 1 накопление этого изотопа начинается только со второй кампании, когда в топливо реактора был добавлен торий. Все это создает сложности при управлении реактора в различных режимах, связанные с резким отличием состава топлива, но вариант 1 интересен возможностью запуска реактора без наличия обогатительного производства урана. Накопление этого изотопа в нужных количествах (более 90 %) происходит уже в первую кампанию работы реактора.



Рисунок 3. Динамика накопления 233 U

Динамика накопления ²⁴¹Pu показана на рисунке 4. Этот изотоп также заметно улучшает характеристики топлива, однако его равновесное содержание в топливе заметно ниже, чем ²³³U. Во всех вариантах загрузки реактора этот изотоп выходит в равновесие последним. Это связано с последовательным выходом в равновесие его предшественников – изотопов ²³⁹Pu и ²⁴⁰Pu. Таким образом, получение топлива необходимого для работы реактора происходит в течение двух кампаний и заканчивается достаточной наработкой изотопа плутония ²⁴¹Pu. В варианте 1 его количество после первой кампании даже превышает равновесное количество, это связано с полной загрузкой реактора природным ураном в первой кампании, что и привело к высокому содержанию всех изотопов плутония во второй кампании (рисунок 5), а не только изотопа плутония ²⁴¹Pu. Влияние изотопа ²³⁹Ри на характеристики активной зоны реактора на тепловых нейтронах мало и может быть даже отрицательным в случае рассматриваемого реактора, где эффективное число вторичных нейтронов делящегося нуклида должно быть больше двух. Однако, как указывалось выше, он состоит в цепочке накопления изотопа ²⁴¹Ри.





Рисунок 5. Динамика накопления ²³⁹Ри

03

Время, г

04

05

06

02

Остальные нуклиды, такие как ²³⁶U, ²⁴²Pu, отрицательно влияют на свойства топлива, но их действием можно пренебречь, так как их накопление будет происходить в течение сотен лет.

ЛИТЕРАТУРА

00

01

- 1. Белая книга атомной энергетики / Адамов Е. О. [и др.]. М.: ГУП НИКИЭТ, 2001. 270 с.
- Сравнение направлений развития ядерной энергетики в ХХІ в. на основе расчетов материальных балансов / Н.Н. Пономарев-Степной [и др.] // Атомная энергия. – 2001. – Т. 91, вып. 5. – С. 331 – 336.
- 3. Котов В.М., Котов С.В. Тепловые ядерные реакторы с эффективным топливным циклом. // Алматы. Четвертая международная научно-практическая конференция "Актуальные проблемы урановой промышленности". 18-21 сентября 2006 г.
- 4. Котов, В.М. Воспроизводство делящихся веществ в тепловых реакторах / В.М. Котов, С.В. Котов // Атомная энергия. -2007. – Т. 103. вып. 5.
- Nuclear Fuel Cost Calculator [Интернет pecypc] / World Information Service on Energy. Arnsdorf, Germany. 1 Oct 2007. -5. Netscape 4.0, Internet Explorer 4.0 or higher; Режим доступа на www.wise-uranium.org.
- 6. .Радиационные характеристики облученного ядерного топлива, справочник / Колобашкин В. М., [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1983. - 382 с.

Заключение

В рамках работы рассмотрено пять вариантов начальной загрузки теплового реактора с высоким воспроизводством делящихся веществ. Запуск реактора с высоким воспроизводством делящихся веществ работающего с топливом ториевого и уранового ЯТЦ возможен во всех пяти вариантах без привлечения технологии быстрых реакторов. Кажлый из пяти вариантов может иметь приоритет в зависимости от наличия ресурсов:

- первый вариант привлекателен в первую очередь для стран, не имеющих собственного обогатительного производства и не желающих зависеть от монополизированного рынка обогащенного урана. Такой вариант подходит в первую очередь для таких стран как Канада, Индия, Казахстан,
- во втором варианте требуется технология низкого обогащения урана, подобный вариант подойдет в первую очередь для стран, имеющих такие технологии – Россия, Франция,
- третий вариант подходит в основном для стран имеющих избыточное количество ядерного оружия, но возможно применение этого варианта и в других странах, в случае контролируемых покупок подобного топлива,
- четвертый вариант подойдет для большинства стран имеющих на сегодняшний день ядерные реакторы,
- пятый вариант может принять в разработку любая страна. Вариант в оптимальном развитии требует создания технологии автономного производства изотопа урана ²³³U в электроядерных установках.

Реакторы на тепловых нейтронах с высоким воспроизводством делящихся веществ имеют больший потенциал для замещения мощностей, вырабатываемых ныне с использованием органического топлива, и обеспечивают возможность построения широкомасштабной атомной энергетики. При этом, в сравнении с технологией быстрых реакторов, требуется меньшее количество ресурсов урана в ходе первых сотен лет [4].

БӨЛІНЕТІН ЗАТТАРДЫҢ ЖОҒАРЫ ҚАЙТА ӨНДІРУІМЕН ЖЫЛУ РЕАКТОРЫНЫҢ СТАЦИАНАРДЫ ЖҰМЫСЫНЫҢ РЕЖИМГЕ ШЫҒУЫ

Котов В.М., Иркимбеков Р.А.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

ЯОЦ қуаттарын интенсивті дамытуын атом энергетика дамытуы талап етеді,бірақ қазырғы технологияларды пайдаланған кезде табиғи шикізатты тез жұмсау болады. Жаңа буынды реакторлар құрлысы кезінде ғана тез дамуы мүмкін болады-реакторларды қалай уранды,солай торилы шикізатты пайдалануымен бөлінетін заттардың жоғары қайта өндірісімен.Ториде табиғатты бөлінетін нуклидтердің болмай қалуы торилы реакторларды жіберу мәселесін құрайды.Сондай жылу реакторларына назарын арттырады шапшаң реакторларының технологиясын жақындатусыз осындай реактордың жіберу мүмкіндігінің дәлелдігі.

Бекітулі түйіндес уран-торилы отынды циклнде істейтін,отынды нейтрондарының реактор отынында бөлінетін заттардың қорлану процессі зерттелді.Реактордың бастапқы жіберуінің бес нұсқалары істелді, қолданылған бөлінетін заттардың технологиясымен айыра танылған. Реактордың зерттелген нұсқалары жіберу мүмкіндігі қөрсетілген. Отынның стартты құрамында бөлінетін компонент саны жинақталған,отында тепетеңдік концентрациясына бөлінетін компоненттердің қол жеткізетін уақыты анықталды.

STATIONARY OPERATING MODE OF THERMAL REACTOR WITH HIGH REPRODUCTION OF FISSION MATERIALS

V.M. Kotov, R.A. Irkimbekov

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Development of Atomic power engineering requires intensive NFC power increasing, but using modern technologies fast expense of nature raw materials is happened. Fast development will be possible only under building of new generation reactors – reactors with high reproduction of fission materials using as uranium and thorium raw materials. The problem of thorium reactors startup is in absence of natural fission nuclides in thorium. Argument of possibility of such reactor startup without involvement of fast reactors technologies will increase attention on such thermal reactors.

Process of accumulation of fission materials in reactor fuel on thermal neutrons operating in closed coupled uranium-thorium fuel cycle is examined. Five variants of reactor initial loading differed by technology of used fission materials production are worked out. Possibility of tested reactor variants startup is shown. Time of fission components achievement of equilibrium concentration in fuel is determined; quality of fission components in fuel starting composition is selected.

УДК 621.039.55

ОПЫТ РЕШЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Котов В.М., Витюк Г.А.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Современные программные комплексы, применяемые для решения теплофизических задач, позволяют осуществлять подробное моделирование и с высокой точностью определять важнейшие статические и динамические характеристики исследуемых объектов.

Работы по исследованию теплофизических состояний объектов проводятся в лаборатории исследований теплофизических и нейтронно-физических характеристик облучательных устройств в рамках программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан.

Цель настоящей работы - анализ опыта проведения теплофизических расчетов, характеризующегося разнообразием формулируемых задач, применяемых моделей и задаваемых начальных условий.

Методической основой работы является создание расчетных моделей, адаптация моделей под реальные объекты исследования, формулировка исходных данных, определение оптимального времени расчета, оценка и корректировка числа итераций и коэффициентов сходимости физических процессов в ходе расчета, визуализация и анализ результатов расчетов.

Проведенная работа с комплексами FLUENT [1], SINDA [2] позволила освоить правила и приемы моделирования и применять полученные навыки при решении актуальных теплофизических задач.

Дальнейшее совершенствование работ возможно с использованием вычислительной техники с большей производительностью и позволит повысить представительность результатов расчетов и уменьшить время, затрачиваемое на моделирование и проведение расчета.

Введение

Современные программные комплексы, применяемые для решения теплофизических задач, позволяют осуществлять подробное моделирование и с высокой точностью определять важнейшие статические и динамические характеристики исследуемых объектов.

В исследуемых моделях может происходить существенное изменение таких параметров, как скорость, давление, плотность, температура, плотность потока энергии в различных ее видах, может изменяться фазовое состояние вещества. В расчетных программных комплексах включены закономерности различных физических процессов в таком объеме, что результат вычислений можно считать эквивалентным проведению соответствующего эксперимента.

Основная задача пользователя состоит в создании оптимальной модели, достоверно описывающей исследуемый объект, и позволяющей получать результаты расчета при минимальных затратах ресурсов и времени.

Цель данной работы – анализ опыта проведения теплофизических расчетов, в программных комплексах FLUENT [1], SINDA [2], характеризующегося разнообразием формулируемых задач, применяемых моделей и задаваемых начальных условий.

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКО-ГО НАГРЕВАТЕЛЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Нагреватель газового потока (азота) предназначен для работы в составе экспериментального устройства на реакторе ИВГ.1М для стабилизации температуры исследуемого топлива при его облучении [3]. Цель данного расчета - обоснование эффективности и работоспособности выбранной конструкции нагревателя.

Конструкция нагревателя состоит из цилиндрического корпуса, в котором размещены восемь нихромовых нитей диаметром 1 мм (рисунок 1).

Планируемый суммарный расход используемого в эксперименте азота - 9 г/с. Мощность нагревателя, которая по предварительным расчетом составит 5 кВт, обеспечивает подогрев потока азота с 300 К до 800 К.



Рисунок 1. Нагреватель газового потока

Расчетная модель нагревателя построена в среде GAMBIT, расчет проведен с помощью программного пакета FLUENT [1].

В модели был учтен конвективный теплообмен с окружающей средой (воздухом) и лучистый теп-

лообмен между нихромовыми нитями и стальным корпусом.

По результатам расчетов достигнут высокий уровень теплосъема с поверхности нитей (200 кВт/м²), что обусловлено созданием условий для интенсивного перемешивания газового потока. Максимальная температура нихромовых нитей составила ≈1035 К, что не превышает максимально допустимую рабочую температуру нихрома равную ≈1273 К [7].

На рисунке 2 представлены результаты теплового расчета модели в стационарном режиме.



Рисунок 2. Стационарное распределение температуры в сечениях нагревателя

Перепад давления по высоте нагревателя составил около 7 кПа.

В процессе решения данной задачи проведено большое количество теплофизических расчетов с разными вариантами конструкции и различными условиями теплообмена. Характерной особенностью предложенной конструкции является использование напряженных нихромовых нитей, расположенных с небольшим наклоном к оси нагревателя.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТВС ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Разработке тепловых ядерных реакторов с эффективным топливным циклом, основанном на высоком воспроизводстве делящихся веществ, заключается в создании расчетного обоснования тепловых реакторов с малой загрузкой их активной зоны делящимися компонентами, с предельно малыми потерями нейтронов в конструкционных материалах [4]. К особенностям таких реакторов относятся: малые поверхности теплосъема и сечения тракта теплоносителя.

В процессе работы по данному направлению проведен расчет ТВС реактора с тремя различными видами теплоносителей (гелий, жидкий металл, вода). Мощность твэлов в ТВС составила 1,5 МВт. Высота ТВС равна 4,2 м, а проходное сечение -14,47 см². Расчеты проведены с использованием программного комплекса FLUENT.

Были определены теплогидравлические характеристики ТВС на основе модели, созданной по предварительным нейтронно-физическим расчетам проектируемого реактора. Результаты, по гелиевому и жидкометаллическому вариантам представлены на рисунках 3 и 4. Эти характеристики вполне соответствуют условиям работоспособности. В ходе расчетов были найдены технические решения, позволяющие улучшить теплофизические характеристики ТВС.



Температура, К

Рисунок 3. Температурное поле в сечениях ТВС с жидкометаллическим теплоносителем



Рисунок 4. Температурное поле в различных сечениях ТВС с гелиевым теплоносителем

В ходе данной работы освоена методика установления заданного энерговыделения в твэлах, рассмотрены характерные особенности в режимах течения жидкометаллического теплоносителя, проведено сравнение режимов движения теплоносителей с различной вязкостью, выполнена корректировка коэффициента турбулентности потоков (Turbulent Kinetic Energy, Turbulent Dissipation Rate).

Несколько сложнее ситуация с вариантом пароводяного теплоносителя. Для описания процесса фазового перехода в структуру программы необходимо включить ряд вспомогательных файлов, описывающих межфазные переходы. Работы по варианту расчета ТВС с пароводяным теплоносителем ведутся в двух направлениях – изучение описания процесса фазового перехода в структуре программы и освоение особенностей парообразования. Определенный опыт по второму варианту направления получен на основе расчета теплофизических характеристик ТВС реактора ИВГ1-2М на основе сердечников твэлов реактора ВВЭР-1000.



РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВС РЕАКТОРА ИВГ1-2М НА ОСНОВЕ СЕРДЕЧ-НИКОВ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Одним из вариантов модернизации реактора ИВГ.1М является использование топлива на основе сердечников твэлов энергетических реакторов [5]. Этот вариант модернизации реактора обозначен как ИВГ1-2М. В процессе расчетов определялась работоспособность твэлов ВВЭР-1000 в реакторе ИВГ1.2М. Расчет ТВС реактора, загруженного топливом с обогащением 4,4 % по изотопу урана ²³⁵U, был проведен с учетом радиальной и аксиальной неравномерности энерговыделения. Рассчитывались два варианта модели ТВС реактора с различными расходами рабочего тела 3,9 кг/с и 3,2 кг/с. Для решения поставленной задачи применялся программный пакет FLUENT.

На рисунке 5 приведены графики распределения температуры воды в ее различных слоях вблизи поверхности твэла и температуры в центре и на поверхности сердечника по высоте ТВС.



Рисунок 5. Распределение температуры воды в ее различных слоях вблизи поверхности твэла по высоте TBC, в центре и на поверхности сердечника по высоте твэла

Анализ результатов расчетов показал, что при работе реактора ИВГ1.2М на мощности 10 МВт подогрев теплоносителя составит не более 35°С.

Особенностью расчета являлось проведение подробного разбиения модели с целью получения качественного распределения температуры воды в ее различных слоях вблизи поверхности твэлов и высокая представительность моделирования конструкции и физических процессов.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Особенностями работы теплообменников является необходимость создания минимального перепада давления по длине трактов теплообменника, создания минимальных перепадов температур между рабочими телами с обеих сторон теплопередающей перегородки (в рекуперативных теплообменниках), наличие больших перепадов давления на стенках теплопередающей перегородки. В рамках данной работы были проведены расчеты теплообменников с гелием, водородом и воздухом в качестве рабочих тел.

Ниже приведены результаты расчетов одной трубки рабочего тракта солнечного нагревателя длиной 1 м, внешним диаметром 6 мм и с толщиной стенки 1 мм предназначенного для нагрева водорода в двигательных ракетных установках. Для решения поставленной задачи применялся программный пакет FLUENT.

В процессе расчета приняты следующие допущения: весь солнечный тепловой поток направлен на нагрев вольфрамовой трубки, область нагрева трубки ограничена половиной цилиндрической поверхности, отсутствует лучистый теплообмен во внешнее и внутреннее пространство нагревателя.

Анализ результатов расчетов показывает, что при плотности теплового потока около 500 кВт/м², обеспечивается возможность нагрева водорода с перепадом температур "стенка – рабочее тело" не более 100 К. На рисунке 6 представлено распределение температуры водорода и температуры подогреваемой поверхности трубки по длине трубки при различных давлениях теплоносителя.



Рисунок 6. Распределение температуры водорода и температуры подогреваемой поверхности трубки

В процессе расчетов было определено азимутальное распределение температуры поверхности для трех сечений по длине трубки. Максимальное отклонение от средней температуры по длине окружности трубки составляет около 20 К. Результаты азимутального распределения температуры трубки показывают, что за счет высокой теплопроводности вольфрама обеспечивается достижение равномерного прогрева теплоносителя в трубке, при этом не будет достигнута критическая для вольфрама температура (3600 К) [7]. Следовательно, обеспечивается работоспособность разрабатываемых вариантов нагревателей.

В процессе проведения расчетов характеристик теплообменников для двигательных установок были получены навыки выполнения моделирования неполного поверхностного нагрева конструкционных элементов, визуализации параметров азимутального распределения различных физических параметров и проведения расчетов с газами при высоких температурах (до 3000 K).

РАСЧЕТЫ В ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ИС-СЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ СОПРОВОЖДАЮЩИХ ТЯЖЕЛЫЕ АВАРИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Расчеты в обоснование безопасного проведения внутриреакторных экспериментов являются неотьемлемой частью процесса подготовки к испытаниям на исследовательских реакторах. В рамках работы выполнено расчетное обоснование безопасного проведения пусков реактора ИГР с физическим макетом экспериментального устройства (рисунок 7).

Для определения критических тепловых параметров устройства рассмотрена аварийная ситуация, вызванная несанкционированным вводом положительной реактивности в активную зону реактора. Расчетный анализ теплового состояния чехла ТВС был выполнен в программном пакете SINDA [2] для случая соответствующего максимальному энерговыделению в реакторе ИГР, равного 0,25 ГДж.



Рисунок 7. Центральная часть конструкции физического макета экспериментального устройства

По результатам расчета (рисунок 8) было определенно, что даже при полном отсутствии утечек тепла с поверхности чехла ТВС температура топлива стабилизируется на уровне 1850 К. Чехол ТВС сохраняет исходную форму и предотвращает прямой контакт топлива со стенкой корпуса физического макета.



Рисунок 8. Изменение температуры в различных элементах конструкции

При реализации заданного энерговыделения в ТВС физического макета обеспечивается его работоспособность, при этом чехол ТВС локализует топливо в своем объеме.

Характерной особенностью таких расчетов является возможность определения температурного поля любого из элементов экспериментальных устройств в любой момент времени, при любой заданной диаграмме реализации мощности реактора.

Преимущество программного пакета SINDA [2] в решении стационарных задач – это быстрота реше-

Литература

- 1. Fluent version 6.3.26 User Reference; Fluent, Inc.; 2006.
- 2. Программный пакет SINDA/G; Network Analysis, Inc.
- Разработка и экспериментальное обоснование методик реакторных и внереакторных исследований эксплуатационных характеристик перспективного топлива : отчет о НИР (промежуточ.) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК ; рук. А.Д. Вурим. – Курчатов, 2008 год. – 87 с.
- Разработка тепловых ядерных реакторов с эффективным топливным циклом: отчет о НИР (промежуточ.) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК ; рук. В.М. Котов. – Курчатов, 2008 год. – 44 с.
- Разработка технологии модернизации реакторного топлива, выпускаемого в республике Казахстан, для использования на исследовательских реакторах национального ядерного центра: отчет о НИР (промежуточ.) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук. В.М. Котов – Курчатов, 2008 год. – 26 с.
- 6. Физический макет экспериментального устройства WF-2. Анализ условий безопасного проведения физических исследований : отчет о НИР/ ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК ; утв. Вурим. Курчатов, 2008 год. 14 с. Инв. № 26 от 25.02.2008 года.
- 7. Чиркин, В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин М.: Атомиздат, 1968.

ния, простота моделирования диаграмм задаваемых энерговыделений, физических параметров материалов, а также простота анимационной визуализация в зависимости температуры от времени.

Выводы

Развитие расчетных программных комплексов на современном этапе позволяет осуществлять подробное математическое моделирование теплофизических процессов, происходящих в объектах исследований, в короткие сроки проводить сложные расчеты и с высокой представительностью определять значения теплофизических параметров элементов расчетных моделей.

Проведенная работа с комплексами FLUENT [1], SINDA [2] позволила накопить существенный опыт, освоить правила и приемы моделирования и применять полученные навыки при решении актуальных теплофизических задач.

На текущий момент накоплен опыт проведения теплофизических расчетов, позволяющий: воспроизведение реальной геометрии сложных тел в расчетных моделях, разбиение модели на большое количество объемов, учет взаимного влияния процессов происходящих в соседних объемах, задание конвективных условий теплообмена, задание условий теплообмена излучением, моделирование фазовых переходов, моделирование потока любого типа жидкостей и газов с заданным направлением движения.

Дальнейшее совершенствование полученных навыков, позволит в будущем повысить представительность результатов расчетов и уменьшить время, затрачиваемое на моделирование и проведение расчета.

БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚАЗЫРҒЫ КЕШЕНДЕР КӨМЕГІМЕН ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ МІНДЕТТЕР ШЕШІМІНІҢ ТӘЖІРИБЕСІ

Котов В.М., Витюк Г.А.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Бағдарламалық қазырғы кешені жылуфизикалық міндет шешімі үшін қолданылатын жете үлгілеуін іске асыруды руқсат етеді және зерттелетін объектердің маңызды динамикалық және статикалық сипаттамаларын жоғарғы дәлдікпен анықтау.

Қазақстан Республикасында атом энергетикасын дамыту бағдарламасы рамкасында сәулелендіру құрылғысын нейтронды-физикалық және жылуфизикалық сипаттамаларды зерттеуі объектілердің жылуфизикалық ақуалын зерттеу бойынша жұмыстары лабораторияда жүргізіледі.

Қазырғы жұмыс мақсаты: жылуфизикалық есептемелерді жүргізу тәжірибелерін талдау, тұжырымдалған міндеттердің әр түрлілігімен сипатталатын, қолданылатын модельдер және берілетін бастапқы шарттар.

Әдістемелік жұмыс негізі есептемелік модельдерін құру болып табылады, нақты объектілерді зерттеу маңында модельдерді бейімдеу, шыққан деректердін тұжырымы, есептеудің тиімді уақытын анықтау, есептеу барысында физикалық процесстердің итерация мен коэффиценттер сан үйлесуінің бағасы мен корректировкасы, есептемелер нәтижелерін талдауы және визуализациясы.

FLUENT кешендеріменен жүргізілген жұмыс жылуфизикалық міндеттердін актуальді шешім кезінде алынған дағдыларды қолдану және қорғауыш тәсілдері мен ережелерін SINDA игеруіне рүқсат етті.

Есепті жүргізу және үлгілеуге шығындалған, уақытты азайту және есептемелер нәтижелерін келбеттілікті жетілдіруді рүқсат етеді және көп өнімділігімен есептеу техникасын пайдалануымен мүмкін жұмыстың кейінгі жетілдіруі.

EXPERIENCE IN THE WORKING OUT OF THE THERMAL-PHYSICAL ISSUES USING UP-DATE PROGRAM COMPLEXES

V.M. Kotov, G.A. Vityuk

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Up-date program complexes using for working out of thermal-physical issues allow to realize detailed simulation and to identify the crucial static and dynamic specifications of test samples more accurately.

Studies of thermal-physical states are curried out in the Research Laboratory of thermal-physical and neutronphysical behaviors of irradiated devices within the framework of "Development of Nuclear Power Engineering in Kazakhstan" Program.

The present paper aimed at analysis of experience of thermal-physical calculations' conduction being specified with variety of formulating tasks of models used and initial conditions.

Methodological work foundation consists of creation of calculated models, adoption of models for real test subjects, formulation of initial data, determination of optimal calculation time, assessment and correction of iterations and factors of physical processes convergence during a calculation and visualization and analysis of calculation outcomes.

Conducted work with FLUENT and SINDA Complexes allowed to cope with simulation rules and methods and to apply obtained skills for decision of urgent thermal-physical issues.

Further work mastering is possible in case of usage of large-power computer machinery that allows to enhance calculation outcomes and to reduce time required for simulation and calculations.

УДК 669.293'6'71:539.23:537.312.62

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ НИТРИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ МАГНЕТРОННОМ ОСАЖДЕНИИ

Жаканбаев Е.А., Тулеушев Ю.Ж., Володин В.Н.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Исследованы особенности формирования нитрида ниобия при магнетронном осаждении. В результате исследования получены данные о механизме формирования нитрида ниобия при ионно-плазменном осаждении. Установленно влияние наноразмерного фактора на процессы нитрирования переходных металлов при магнтроном распылении на движущиеся подложки.

Введение

В предыдущих работах был получен опыт по созданию и исследованию покрытий из нитрида ниобия на ленточном носителе, а также слоистых покрытий. Были установлены концентрационные границы существования сверхпроводящей фазы нитрида ниобия при различных концентрациях азота в плазмообразующем газе. Найдены оптимальные режимы получения сверхпроводящей фазы нитрида ниобия и нитрида титана на ленточном носителе [1]. Также была затронута проблема получения слоистых систем нитридов титана и ниобия [2]. Исследованы структура и фазовый состав сложных нитридов титана и ниобия при различном соотношении компонент. Были установлены границы существования сверхпроводящей фазы нитрида ниобия при различных соотношениях компонент ниобия и титана. Но при проведении всех перечисленных исследований остается неясным вопрос о локализации процесса нитрирования металла при ионно-плазменном осаждении:

- 1. Нитрирование поверхности мишени и распыление уже сформированного нитрида.
- Образование нитрида в металл содержащей плазме при взаимодействии частиц металла с азотом
- Поглощение азота осажденным металлом и образования нитрида на поверхности напыляемого покрытия

В связи с вышеизложенным нами были проведены исследования формирования нитридов при ионно-плазменном осаждении. Из исследуемых систем, таких как Nb-N, Ti-N и Zr-N была выбрана система Nb-N так как здесь присутствует сверхпроводящая фаза δ_1 -NbN, которая является основой для ленточного сверхпроводника, к тому же данная фаза имеет узкий интервал существования на фазовой диаграмме состояний (рисунок 1). Что существенно облегчает изучение поставленной задачи. В дальнейшем планируется проведение такого эксперимента на остальных системах: Ti - N и Zr - N.



Рисунок 1. Диаграмма состояний Nb – N

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для осуществления синтеза покрытий нитрида ниобия и нитрида титана использовалась установка для магнетронного напыления, включающая вакуумную камеру, вакуумную систему и систему напуска газа [3]. В отличии от стандартной схемы осаждения на движущуюся подложку, которая использовалась для получения ленточного сверхпроводника, здесь осаждение производилось на неподвижные носители. Подложки были расположены под различными углами и на различных расстояниях от магнетронного распылителя. Схема расположения подложек представлена на рисунке 2. Осаждение производилось на медную фольгу. Концентрация азота в плазмообразующем газе составила 22 об. % N. Рентгеноструктурные исследования выполнены на рентгеновском дифрактометре D8 Advance в Аналитическом центре ИЯФ НЯЦ РК



Рисунок 2. Схема расположения образцов.

Результаты эксперимента и их обсуждение

В результате осаждения по схеме представленной на рисунке 2, было обнаружено, что на подложках 3, 6 и 7 покрытие отсутствует. На подложке под номером 5 при визуальном наблюдении покрытие присутствует, но данным рентгеноструктурного анализа никакой кристаллической структуры в данном покрытии не наблюдается, что по видимому обусловлено очень маленькой толщиной покрытия. Рентгеноструктурные исследования образцов под номерами 1, 2 и 4 показали: в образце №1, который располагался непосредственно перед магнетроном, обнаружено наличие двух фаз – фаза δ_1 -NbN, и β-NbN которая имеет гексагональную решетку (рисунок 3).

Параметр решетки сверхпроводящей фазы нитрида ниобия составил 4.381А. Такое положение можно объяснить тем что образец расположенный непосредственно перед магнетроном, при осаждении получил избыток металла что и привело к образованию фазы с обедненным содержанием азота - β -NbN. В образце №2 было обнаружено наличие двух фаз – фазы δ_1 -NbN и фазы с тетрагональной решеткой Nb₄N₅. Образец под номером 4 (рисунок 4) показал наличие в образце фазы δ_1 -NbN и фазы β -NbN. Образование фаз интридов с более высоким содержанием азота объясняется расположением образцов в стороне от основного потока металла.



Рисунок 3. Дифрактограмма образца №1. ▼ - δ₁-NbN * - β-NbN



Рисунок 4. Дифрактограмма образца №2. $\nabla - \delta_1$ -NbN, * - β -NbN, • - Nb₄N₅

По результатам Резерфордовского обратного рассеяния была получена толщина покрытий для образцов № 1, 2 и 4. В образце №1 толщина покрытия составила 3 мкм, для образца №2 – 1,5 мкм и для образца номер 4 толщина составила 23 нм. В таблице 1 приведены результаты исследования полученных образцов микрозондовым анализом. Приведенные выше результаты показывают хорошую корреляцию с данными других методик.

Таблица 1. Концентрация азота в полученных образцах

N⁰	СN ат %	Наблюдаемые Фазы в образце
1	51,84	δNbN, β-NbN
2	68,92	δNbN, β-NbN Nb₄N₅
3	71,82	-
4	72,21	δ NbN, Nb ₄ N ₅

Оценка интегрального распределения азота в напыленном слое и толщины осажденного слоя в случае неподвижного барабана (рисунок 5), позволяет сделать вывод о том что общее содержание азота в доступном для напыления слое меньше чем для тех же режимов напыления при движении барабана. Поэтому учитывая то, что нет никаких методов активирования плазмы вне потока магнетрона, можно со всей определенностью утверждать, что взаимодействие азота с островковыми частицами ниобия при движении происходит и в темной зоне (противоположной от магнетрона) что может иметь место при термофлуктуационном плавлении наноразмерных островков ниобия.



Рисунок 5. Распределение осажденного покрытия на поверхности неподвижного материала

Краткие выводы

В результате проведенных исследований установлено следующее:

Установлено влияние наноразмерного фактора на процессы нитрирования переходных металлов при магнтроном распылении на движущиеся подложки.

Полученные результаты позволяют управлять процессами нитрирования и конструировать системы из сверхпроводящих и не сверхпроводящих материалов. Последнее обстоятельство позволяет надеется на то что будут созданы сверхпроводящие системы с температурой критперехода находящиеся в области жидкого азота либо еще выше.

Литература

- 1. Жаканбаев, Е.А. Структура и свойства покрытий из нитрида ниобия при ионно-плазменном формировании. /Жаканбаев, Е.А. [и др.]. // Вестник НЯЦ РК, Вып. 1, 2007г. с. 18-22.
- Жаканбаев, Е.А. Получение слоистых систем при напылении нитридов титана и ниобия и исследование их свойств. /Жаканбаев, Е.А. [и др.]. // Вестник НЯЦ РК, Вып. 3, 2007г. с. 18-21.
- Тулеушев, А.Ж. Плазмохимический синтез сверхпроводника на основе нитрида ниобия. / А.Ж. Тулеушев [и др.]. // Материалы межд. научн. конф. Ядерная и радиац. физика, Алматы. – 1999 г. - С. 125-130.

МАГНЕТРОНДЫҚ ТҰНДЫРУ КЕЗІНДЕ АУЫСПАЛА МЕТАЛДАР НИТРИДТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Жаканбаев Е.А., Тулеушев Ю.Ж., Володин В.Н.

КР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Магнетрондық тұндырғанда ниобий нитридің қалыптастырудың ерекшеліктері зерттелген. Зерттеудің нәтижесінде ионөплазмалық тұндыру кезінде ниобий нитридің қалып-тастыру тетігі туралы деректер алынған. Өтетін металдардық интриттеу процестеріне ыкпалын жасау фактор наноразмердық аныкталсан козсалушы тгс етектеріне тозақдатуда магнтрондық жанында.

FEATURES OF FORMATION OF NITRIDES OF THE TRANSITION METALS AT MAGNETRON A DEPOSITION

E.A. Zhakanbaev, Yu.Zh. Tuleushev, V.N. Volodin

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

Features of formation of niobium nitride are explored at magnetron a deposition. As a result of examination the formations of niobium nitride given about the mechanism are received at an ionic - plasma deposition. Influence nanosize factor on processes nitriding of the transition metals sets at magnetron pulverization on moving substrates.

Азимханов А.С., 71 Айдарханов А.О., 52 Аксамбиев С.С., 101 Аксенова Т.И., 66 Антонюк В.И., 80 Байгазинов Ж.А., 33 Барсуков Н.И., 39 Батырбеков Э.Г., 5, 18 Виницкий С.И., 96 Витюк Г.А., 123 Володин В.Н., 129 Гордиенко Ю.Н., 39 Гусев А.А., 96 Демин В.Н., 106 Дроздов А.В., 45 Дубровин В.И., 85 Дудко А.С., 76 Жаканбаев Е.А., 129 Жолдыбаев А.К., 26

СПИСОК АВТОРОВ

Жотабаев Ж.Р., 66 Иманбеков Ж.Ж., 80 Иркимбеков Р.А., 76, 118 Кабдыракова А.М., 33 Кислый Б.И., 26 Корниенко П.А., 66 Котов В.М., 76, 118, 123 Коянбаев Е.Т., 71 Красовицкий П.М., 96 Куликова Г.О., 111 Кульсартов Т.В., 39 Ларина Т.Г., 45 Ларионова Н.В., 33 Лукашенко С.Н., 33, 52 Ляхова О.Н., 52 Магашева Р.Ю., 33 Михайлова Н.Н., 90, 106 Морговская М.К., 106 Мукамбаев А.С., 90

Мунасбаева К.К., 66 Паницкий А.В., 33 Поддубная Е.В., 80 Поляков А.Н., 80 Понкратов Ю.В., 39 Слюсарев А.П., 80 Смирнов А.А., 85 Соколова И.Н., 101 Тулеушев Ю.Ж., 129 Умаров М.А., 52 Уткелбаев Б.Д., 71 Фролов З.Н., 45 Хромушин И.В., 66 Чихрай Е.В., 39 Чулуунбаатар О., 96 Шайторов В.Н., 26 Шелехова О.Х., 59 Ястребкова Н.В., 33

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в виде электронной (на гибком 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 междустрочный 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.

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, города и страны местонахождения организации, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТу 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, *.pcx, *.dxf 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);
- на отдельном листе автор сообщает сведения о себе: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность, кафедра и указывает служебный и домашний телефоны, адрес электронной почты.

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, адрес электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

Ответственный секретарь д.т.н. М.К. Мукушева тел. (722-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин тел. (722-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Тәуелсіздік, 6. http://www.nnc.kz/vestnik

© Редакция сборника «Вестник НЯЦ РК», 2001.

Регистрационное свидетельство №1203-Ж от 15.04.2000г. 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. Ленина, 6.

