ISSN 1729-7516

Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 4(28), ДЕКАБРЬ 2006

Издается с января 2000 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: к.х.н. АРТЕМЬЕВ О.И., 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,**
д.г.-м.н. ЕРГАЛИЕВ Г.Х., к.б.н. КАДЫРОВА Н.Ж., к.ф.-м.н. КЕНЖИН Е.А.,
КОНОВАЛОВ В.Е., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.ф.-м.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. – **заместитель главного редактора**, к.т.н. ТУХВАТУЛИН Ш.Т.

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

4(28) ШЫҒАРЫМ, ЖЕЛТОҚСАН, 2006 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 4(28), DECEMBER 2006

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

ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ОЛОВА **5**
Такибаев Ж.С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ СУСПЕНЗИИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ **7**
Такибаев Ж.С., Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

СОЗДАНИЕ «ЗАПИРАЮЩЕГО» СЛОЯ В МАТРИЦЕ α-Fe ИОНАМИ КИСЛОРОДА, ПРЕПЯТСТВУЮЩЕЙ ДИФФУЗИИ АТОМОВ БЕРИЛЛИЯ И АТОМОВ ЖЕЛЕЗА **16**
Нуркенов С.А., Кислицин С.Б., Антонюк В.И., Горлачев И.Д., Русаков В.С., Кадыржанов К.К.

МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н9, ОБЛУЧЕННОЙ АЛЬФА ЧАСТИЦАМИ **23**
Максимкин О.П., Осипов И.С., Айтхожин Э.С., Бердалиев Д.Т., Рахашев Б.К., Налтаев А.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗ НА ПОВЕРХНОСТИ Fe-Ti СПЛАВА С ТИТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ **28**
Сергеева Л.С., Верещак М.Ф., Манакова И.А., Антонюк В.И., Русаков В.С., Кадыржанов К.К.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ **37**
Полтавцева В.П., Ермаков Е.Л., Кислицин С.Б.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ОТ LiD-КОНВЕРТОРА МЕТОДОМ АКТИВАЦИОННЫХ ИНДИКАТОРОВ **43**
Тажибаева И.Л., Шестаков В.П., Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Кимолаев Ж.Б., Сушков В.А.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИГР: РЕЗУЛЬТАТЫ СРЕДНЕМАСШТАБНОГО ВНУТРИРЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ПРОВЕДЕННОГО В РАМКАХ ПРОЕКТА EAGLE **48**
Васильев Ю.С., Вурим А.Д., Гайдайчук В.А., Колодешников А.А., Пахниц А.В., Пахниц В.А., Маринин А.С., Шаповалов Г.В., Логачев Ю.В., K. Konishi, J.I. Sato, S. Kubo, S. Kotake, K. Koyama

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ КАМЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СЕЧЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ **60**
Буртебаев Н., Сейтимбетов А.М., Зарифов Р.А., Павлова Н.Н., Исабекова Г.С., Керимкулов Ж.К., Кошелов А.М., Сатпаев Н.К., Бажажин А.Г., Корахужаев А.А.

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПРОДОЛЬНОЕ МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ Р – ТИПА НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ МАССАХ ПРИ J ‖ B ‖ [111] **64**
Оразгулыев Б., Таймуратова Л.У.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ И ВЫГОРАЮЩИМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М **71**
Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозоров А.А., Токтаганов М.О., Кимолаев Ж.Б., Сушков В.А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПИИ ПО НАСЫЩЕНИЮ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ n-ТИПА **75**
Оразгулыев Б., Казбекова Б.К.

ЧАСТОТНОМОДУЛИРОВАННЫЙ РАДАР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ **81**
Колтыгин О.В., Логачев Ю.В., Мартынов С.Б., Пономарев В.А.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ИВГ.1М 89
Бакланов В.В., Дерявко И.И., Кукушкин И.М., Малышева Е.В.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНАХ ТЯНЬ-ШАНЯ И ПАМИРА: СВИДЕТЕЛЬСТВА МИГРАЦИИ ЮВЕНИЛЬНЫХ ФЛЮИДОВ 94
Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н.

ВЫДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМЫХ ТРЕЩИННЫХ ЗОН НА УЧАСТКЕ БАЛАПАН ПО ДИСПЕРСИИ НАБЛЮДЕННОГО СИГНАЛА В МЕТОДЕ СРЕДИННОГО ГРАДИЕНТА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ 104
Кабайлов А.Н.

ИЗУЧЕНИЕ ГОРИЗОНТОВ ТРЕЩИННО-ПОРОВЫХ ВОД НА УЧАСТКЕ БАЛАПАН ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 108
Жолдыбаев А.К.

СОСТАВ И РАЗВИТИЕ СООБЩЕСТВА МИКРОРАКООБРАЗНЫХ В ВОДОЕМАХ ЗОНЫ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПО МАТЕРИАЛАМ 2003-2004 гг. 113
Стуге Т.С.

УДК 621.039.522.536

ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ОЛОВА

Такибаев Ж.С.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов

В статье предлагается и обосновывается использование олова и сплавов на его основе в качестве теплоносителя для ядерного реактора на быстрых нейтронах.

Подбор теплоносителя для будущих быстрых ядерных реакторов имеет первостепенное значение. Действительно, в течение почти пятидесяти лет во всем мире в прототипах быстрых реакторов использовался и сейчас используется жидкий натрий. Он оказался удивительно удачным, несмотря на известное всем опасение, что этот теплоноситель будет весьма опасным из-за его несовместимости с водой, а также и из-за непредсказуемого поведения в воздухе, так как он активно реагирует с кислородом. Имеется много и других неудобств в использовании натрия в качестве теплоносителя, например образование радиоактивного изотопа ^{24}Na с $T_{1/2}$ = 15 ч, необходимость создания второго контура и т.д. И, тем не менее, в настоящее время жидкий натрий многими специалистами считается наиболее подходящим первичным теплоносителем для быстрых реакторов будущего. Однако трудно себе представить будущий ядерный пейзаж мира, когда сотни или тысячи больших энергетических реакторов с мощностью порядка 10^3 МВт работают с жидким натриевым теплоносителем. Такой мир представляется небезопасным, скорее, жить в нем будет весьма неудобно из-за постоянной тревоги появления частых взрывов, так как технически трудно полностью изолировать такое большое количество жидкого натрия от соприкосновения с водой и кислородом.

По этой причине многие ученые мира интенсивно изучают другие возможные теплоносители, такие как газовые, солевые расплавы, жидкие металлы и др. Возникли различные проекты быстрых реакторов, в которых предлагают использовать теплоносители из жидких металлов или сплавов - Pb и (Bi + Pb). Недостатки предлагаемых теплоносителей из тяжелых элементов обсуждаются во многих работах [1-3]. К сожалению их, т.е. недостатков, слишком много. Например, в случае использования Pb возникает проблема перекачивания большого количества жидкого свинца через активную зону с использованием особых электрических насосов. А их еще нет.

Для свинцового теплоносителя необходимо создавать дополнительный специальный тепловой котел для расплавления его до температуры плавления свинца 327,4°С. Кроме того, в результате долгого облучения свинца нейтронами образуется целый букет его радиоактивных изотопов, есть много и других неудобств.

Многие возлагают определенные надежды на свинцово-висмутовый сплав. Однако в случае использования этого сплава в качестве теплоносителя в быстрых реакторах возникает проблема ^{210}Po, который образуется согласно реакции

$$^{209}Bi\,(n,\gamma)\,^{210}Bi \xrightarrow{\beta^-} {}^{210}_{5сут.}Po \xrightarrow{\alpha} {}^{206}_{138,4сут.}Pb$$

Активность полония может составлять $(4 \div 40)10^{10}$ Бк/кг, образуются и другие изотопы ^{209}Po ($T_{1/2}$ = 102 г) и ^{208}Po ($T_{1/2}$ = 2,9 г). Существуют различные способы защит [4], что осложняет общую работу по применению этого сплава в виде теплоносителя.

Мы предлагаем провести серию исследований с целью использования в качестве теплоносителя жидкий металл – олово и сплав на его основе (61,9Sn + 38,1 Pb). В таблице приводятся физические свойства этих двух веществ, предлагаемых в качестве кандидатов для использования теплоносителем в быстрых реакторах [5]. При сравнении физических параметров жидкого олова и его сплавов с другими теплоносителями мы выявили некоторые преимущества, и поэтому намерены продолжить исследования возможности использования жидкого олова и его сплава (Sn + Pb) в качестве теплоносителей для быстрых реакторов.

Плотности относительно легкого топлива (USi_3, UAl_2, $PuAi_2$) и среды (сплав из Pb и Sn), в который погружается указанное топливо в виде порошка, почти одинаковы в пределах температуры от 200 до 800^0С, что явствует из графиков, представленных на рисунке. Следовательно, легкое перемешивание обеспечит равномерность распределения порошкового топлива в активной зоне реактора. При этом возможность образования комков и прилипания топлива к стенке контейнера существенно уменьшается.

Весьма сложные вопросы резонансных поглощений нейтронов оловом, самим ураном и другими присутствующими в активной зоне реактора элементами будут обсуждаться в специальной работе, посвященной этой теме.

Таблица. Теплофизические характеристики жидких металлов

Материал	σ_a, тепл., барн	Вязкость, η 10^6, кг сек/м^2 при 4000С	Коэффициент теплопроводности λ, ккал/м ч ^{0}С при 4000С	Плотность ρ, г/см^3	T^0пл/T ^{0}кип
Sn	0,625	1,4	28,9	7,30	231,9/2270
Pb	0,25	2,27	13,0	11,34	327,4/1700
Bi	0,034	1,43	13,4	9,80	271,4/1564
Na	0,49	0,28	59,1	0,97	97,83/882,9
61.9Sn+ 38.1Pb	~0,48	1,73	22,84	8,19	183/ 2053
52.5Bi+32Pb+15.5Sn	~0,19	1,69	15,67	10,20	96/ 1717
45Pb+55Bi	~0,13	1,81	11,8	10,49	123,5/1670

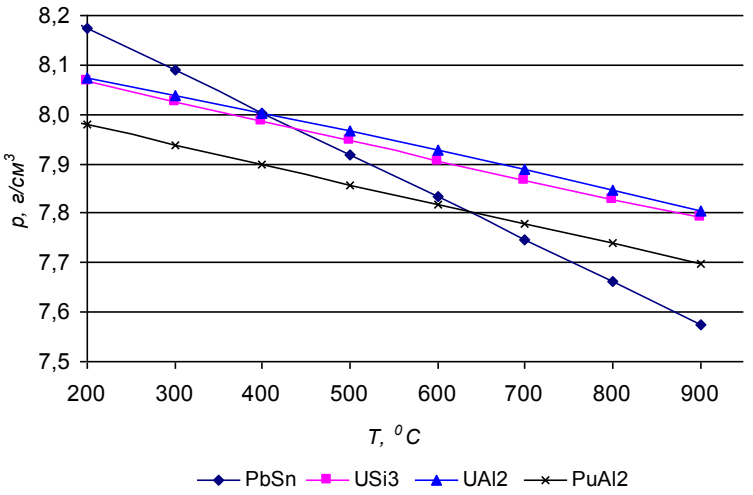


Рисунок. Изменение плотностей легкого топлива (USi_3, UAl_2, $PuAi_2$) и сплава PbSn в зависимости от температуры

Литература

1. Адамов, Е. О. Быстрый реактор естественной безопасности со свинцовым теплоносителем для крупномасштабной энергетики / Под ред. Е. О. Адамов, В. В. Орлов. –М. : 2002.
2. Bull. Res. Lab. Nucl. Reactor / H. Sekimoto, C. Makino, K. Nakamura. – 2002. – №26. – P. 35-36.
3. The First coe-ines International Symposium / INES-I. Tokyo, Japan, Oct. 31. – Nov. 4. – 2004.
4. Анализ полониевой опасности в ядерных энергетических установках со свинцово-висмутовым теплоносителем / Д. В. Панкратов [и др.]. – Атомная энергия. – Т. 97. – вып. 2. – 2004. – С. 125-131.
5. Такибаев, Ж. С. Быстрый гомогенный ядерный реактор / Ж. С. Такибаев. – Атомная энергия. – Т. 100. – вып.2. – 2006. С. 197.

ОЛОВА НЕГІЗІНДЕГІ ЖЫЛУТАСМАЛДАҒЫШ

Тәкібаев Ж.С.

Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы

Статияда жылдам нейтронды реакторда олованы және оның негізіндегі қортпаны жылутасмалдағыш ретінде қолданылуын ұсынады және негізделенеді.

HEAT CARRIER ON THE BASIS OF TIN

Zh.S. Takibayev

National Nuclear Center Republic of Kazakstan

In a paper it is offered and use of tin and alloys on his basis is substantiated as heat carrier for a nuclear reactor on fast neutrons.

УДК 621.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ СУСПЕНЗИИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ГОМОГЕННОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Такибаев Ж.С., Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Алматы

В статье приведены модельные исследования по оценке размножающих свойств топливной суспензии частиц диоксида урана в свинцово-висмутовом сплаве, а также расчет поля нейтронов, которые выполнены с использованием кода статистического моделирования переноса ядерных излучений MCNP в приближениях простых моделей цилиндрической активной зоны с абсолютным (зеркальным) отражателем, без отражателя, с отражателем из свинцово-висмутового сплава и графита при различных размерах активной зоны (АЗ) и параметрах топлива. Представлены расчеты интегрального выхода осколков деления ^{235}U из сферической топливной частицы, а также выхода осколков с заданным массовым числом. Оценено влияние дисперсии начальной кинетической энергии на выход осколков из топливной частицы по результатам статистического моделирования. При анализе возможности реализации гомогенного реактора на быстрых нейтронах с топливной суспензией рассмотрена работа АЗ в режиме псевдоожижения.

ТОПЛИВНАЯ СУСПЕНЗИЯ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Перспективы использования топливных суспензий в гомогенных реакторах оцениваются как благоприятные. Однако существует ряд нерешенных проблем как общих для гомогенных реакторов, так и специфических для реакторов с топливными суспензиями. Одной из таких проблем является возможность неравномерного распределения топлива в потоке суспензии и опасность выпадения топливных частиц из суспензии, например, в результате их гравитационной седиментации. Ранее была предложена возможность обеспечения равномерного распределения топливных частиц в объеме дисперсной системы при их взвешивании в восходящем турбулентном потоке [1]. Поскольку в этом случае материалы дисперсной фазы и дисперсионной среды имеют близкие значения плотности, то топливные частицы небольших размеров могут обладать малой инерционностью; движение таких частиц в значительной мере обусловлено турбулентными флуктуациями и их гравитационное осаждение из турбулентного потока затруднено. При использовании суспензии с более крупными топливными частицами их равномерное распределение в объеме АЗ может быть достигнуто в режиме псевдоожижения. Топливо в этом случае находится в АЗ, а тепло, выделенное в псевдоожиженном слое, отводится потоком дисперсионной среды. Поэтому при анализе возможности реализации гомогенного реактора на быстрых нейтронах с топливной суспензией рассмотрена работа АЗ в режиме псевдоожижения.

Возможность работы реактора с подвижным дисперсным топливом рассматривалась в ряде работ [1-4], прежде всего в связи с проектами хемоядерных реакторов, в которых взвесь топливных частиц в реагенте проходит через некоторый объем, где создаются условия для критического состояния (активная зона хемоядерного реактора). Теплоотвод от активной зоны осуществляется теплоносителем, циркулирующим, как правило, в отдельном контуре. В энергетическом ядерном реакторе на топливной суспензии целесообразно удерживать топливные частицы в пределах АЗ. Теплосъем в таком случае обеспечивается потоком жидкой дисперсионной среды, проходящей через слой частиц и выполняющей функцию теплоносителя.

Такой вариант реактора может быть реализован в режиме псевдоожижения топливных частиц [5]. В псевдоожиженном слое топливные частицы находятся в ограниченном объеме в состоянии хаотического движения. При небольших размерах частиц и достаточной порозности псевдоожиженного слоя может быть обеспечен эффективный отвод тепла при невысоких градиентах температуры в частице и равномерном выгорании топлива.

Режим псевдоожижения обеспечивается в определенном интервале скоростей w_0 жидкости, проходящей через слой частиц. Начало псевдоожижения неподвижного слоя частиц потоком жидкости, проходящей через слой снизу вверх, соответствует равенству гидродинамического сопротивления слоя весу всех частиц и характеризуется скоростью начала псевдоожидения $w_{0пс}$. С увеличением скорости жидкости слой расширяется, увеличивается его порозность ε и высота H. При скорости витания $w_{св}$, равной скорости свободного падения частицы в жидкости, начинается унос частиц с поверхности слоя и псевдоожиженный слой разрушается.

Для неподвижного слоя сферических частиц обычно принимают значение порозности ε = 0,4. Скорости начала псевдоожижения и витания для такого слоя могут быть рассчитаны из следующих соотношений [5]:

$$w_{0nc} = \frac{\mu_1}{\rho_1 d}\mathrm{Re}_{0nc},$$

где ρ_1 и μ_1 - плотность и динамическая вязкость жидкости соответственно; d - диаметр частицы; Re_{0nc} - критерий Рейнольдса в условиях начала псевдоожижения

$$\mathrm{Re}_{0nc} = \frac{\mathrm{Ar}}{1400 + 5,22\sqrt{\mathrm{Ar}}},$$

Ar - критерий Архимеда

$$\mathrm{Ar} = \frac{d^2\rho_1 g}{\mu_1^2}\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1},$$

ρ_2 - плотность материала частицы; g - ускорение свободного падения.

$$w_{св} = \frac{\mu_1}{\rho_1 d}\mathrm{Re}_{св},$$

где $Re_{св}$ - критерий Рейнольдса в условиях витания частицы

$$\mathrm{Re}_{0nc} = \frac{\mathrm{Ar}}{18 + 0,575\sqrt{\mathrm{Ar}}}.$$

На рисунках 1 и 2 показаны результаты расчета скоростей начала псевдоожижения и витания при начальной порозности $\varepsilon_н$ = 0,4 слоя сферических топливных частиц диоксида урана, ожижаемого потоком свинцово-висмутового сплава при различных размерах частиц и температурах суспензии (температура топлива и сплава считались одинаковыми). Значения плотности топлива и сплава, а также динамическая вязкость сплава рассчитывались в соответствии с [6].

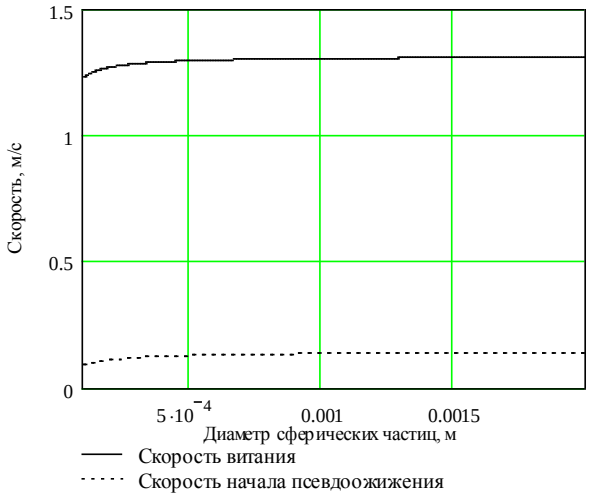


Рисунок 1. Скорости псевдоожижения и витания при различных размерах топливных частиц. Псевдоожижение свинцово-висмутовым сплавом при температуре 400 ^{0}C

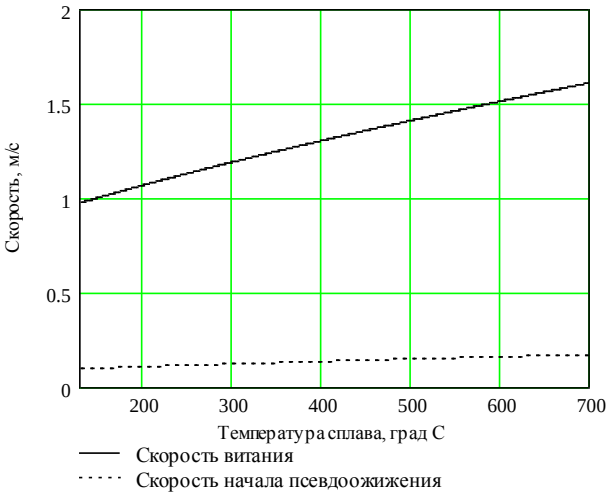


Рисунок 2. Скорости псевдоожижения и витания при различной температуре суспензии. Диаметр топливных частиц 0,001 м

Как видно из рисунков, режим псевдоожижения топливной суспензии поддерживается в достаточно широком диапазоне умеренных значений скорости свинцово-висмутового сплава.

Скорость ожижающей жидкости w_0 определяется как отношение объемного расхода жидкости к площади поперечного сечения слоя (фиктивная скорость [5]). При заданной порозности слоя $0,4 < \varepsilon < 1$ значение w_0 можно рассчитать, используя следующее соотношение для критерия Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_{0nc} = \frac{\mathrm{Ar}\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{\mathrm{Ar}\varepsilon^{4,75}}}.$$

На рисунках 3 и 4 показаны результаты расчета скорости w_0 свинцово-висмутового сплава в зависимости от порозности слоя топливных частиц и их размеров. Высота псевдоожиженного слоя H и первоначальная высота $H_н$ неподвижного слоя связаны соотношением $H_н(1-\varepsilon_н) = H(1-\varepsilon)$.

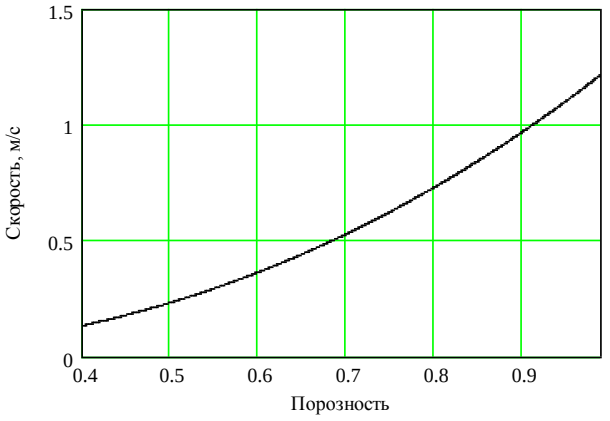


Рисунок 3. Скорость свинцово-висмутового сплава в псевдоожиженом слое с различной порозностью

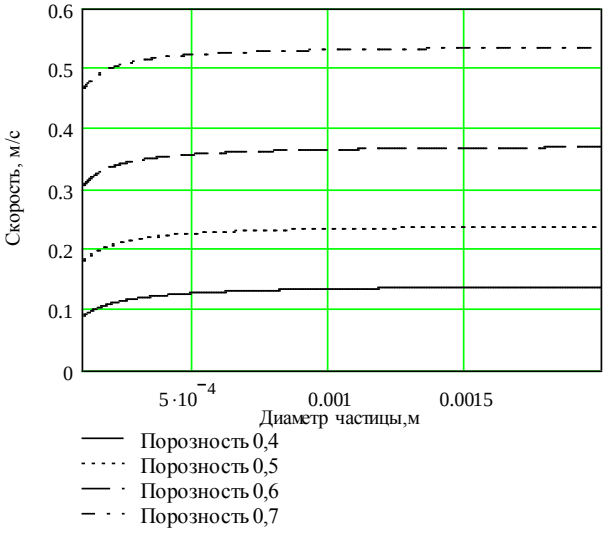


Рисунок 4. Скорость свинцово-висмутового сплава в псевдоожиженом слое при различных размерах топливных частиц

Анализ реализации гомогенного реактора на быстрых нейтронах с топливной суспензией показал возможность применения режима псевдоожижения топливных частиц диоксида урана потоком свинцово-висмутового сплава. Получены оптимальные параметры для скорости расплава в псевдоожиженном слое при различных размерах сферических топливных частиц и различной порозности слоя.

РАЗМНОЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВНОЙ СУСПЕНЗИИ

В разреженном псевдоожиженном слое улучшаются возможности теплоотвода по сравнению с теплоотводом в плотном (неподвижном) слое топливных частиц. Однако, при увеличении порозности слоя следует ожидать возрастания утечки нейтронов и их поглощения в дисперсионной среде топливной суспензии. Для исследования размножающих свойств топливной суспензии проводились расчеты эффективного коэффициента размножения, спектрального и пространственного распределения нейтронов для размножающей среды в форме прямого кругового цилиндра, имитирующей АЗ реактора на топливной суспензии при различном обогащении топлива и различных значениях порозности слоя. Объемная доля топлива в суспензии v связана с порозностью слоя соотношением $v = 1 - \varepsilon$. Начальная порозность слоя принималась равной 0,4 при высоте слоя (активной зоны) 90 см и диаметре основания цилиндра 164,5 см. При обогащении по ^{235}U, равном 0,161, размеры АЗ и параметры топлива соответствуют гетерогенному реактору СВБР-75/100 [7]. Увеличение порозности слоя соответствует увеличению его высоты и снижению объемной доли топлива в суспензии.

Расчеты проводились с использованием программы MCNP [8]. В пространственном отношении активная зона делилась на ячейки системой коаксиальных цилиндрических поверхностей, и в каждой пространственной ячейке оценивалось среднее значение плотности потока нейтронов (управляющая карта F4 программы MCNP) в энергетических группах [9]. Для представления пространственного (радиального) распределения нейтронов в АЗ расчетные данные суммировались по всем энергетическим группам; для представления спектра нейтронов в АЗ суммировались расчетные данные по всем пространственным ячейкам в каждой энергетической группе. На рисунках 5 и 6 приведены спектры нейтронов в слое суспензии при ε = 0,4; H = 90 см и обогащении 0,161 для АЗ с зеркально отражающими внутренними стенками (абсолютный отражатель нейтронов) и с абсолютно поглощающими стенками (АЗ без отражателя).

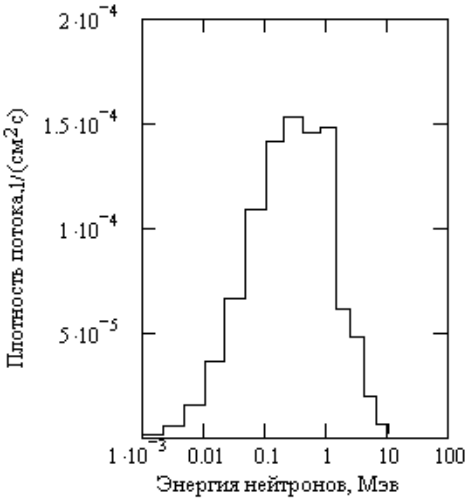


Рисунок 5. Спектр нейтронов в цилиндре с абсолютно отражающими стенками

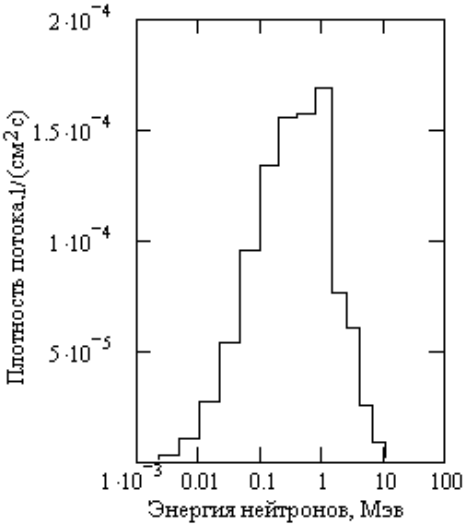


Рисунок 6. Спектр нейтронов в цилиндре с абсолютно поглощающими стенками

Сопоставление спектров, представленных на рисунках 5 и 6 показывает, что спектр нейтронов в АЗ без отражателя несколько более жесткий. Для коэффициентов размножения получены следующие значения: 1,3056 ± 0,0004 для АЗ с абсолютным отражателем и 0,9403 ± 0,0006 для АЗ без отражателя. Таким образом, для принятых размеров АЗ и параметров топлива критическое состояние реактора без отражателя не достигается.

Реально АЗ всегда окружена отражателем. В условиях, например, псевдоожижения топливных частиц свинцово-висмутовым сплавом в качестве верхнего и нижнего торцовых отражателей может рассматриваться этот сплав, свободный от топливных частиц. Поток сплава может также рассматриваться и как боковой отражатель, если по условиям тепловыделения и теплосъема в псевдоожиженном слое необходимо дополнительное охлаждение активной зоны.

На рисунке 7 приведена модель АЗ и отражателей, соответствующая приведенному описанию. Для этой модели выполнялись расчеты при следующих размерах отражателей: толщина бокового отражателя 23 см, толщина каждого из торцовых отражателей 100см.

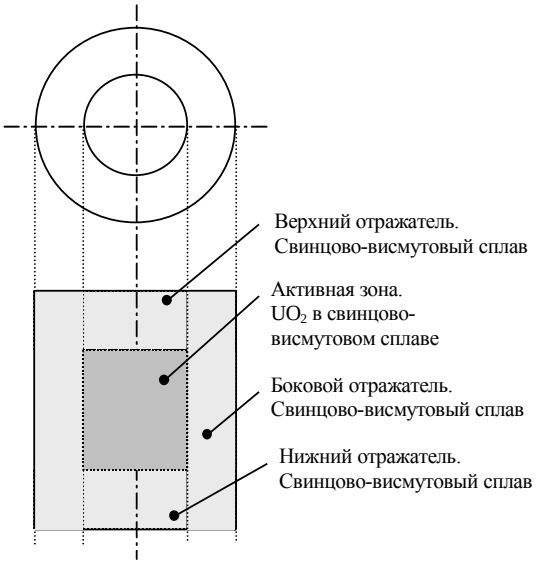


Рисунок 7. Модель цилиндрической активной зоны с отражателями

На рисунке 8 приведены спектры нейтронов в АЗ (высота 90 см) и боковом отражателе при тех же параметрах топлива, что и для АЗ без отражателя (см. выше), а также спектр нейтронов для этой АЗ. Как видно из рисунка, наличие отражателя несколько смягчает спектр нейтронов в АЗ, который, однако, остается достаточно жестким с преобладанием нейтронов с энергией более 1 кэВ. Расчетное значение эффективного коэффициента размножения для этого случая: 1,0785 ± 0,0005.

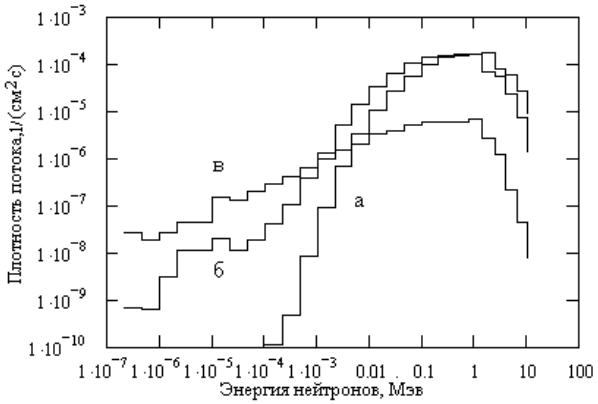


Рисунок 8. Спектры нейтронов в цилиндрической активной зоне без отражателя (а), с отражателем (б); в боковом отражателе (в)

На рисунке 9 приведено радиальное распределение плотности потока нейтронов в сопоставлении с плотностью потока в АЗ без отражателя. Наличие отражателя приводит к некоторому выравниванию потока нейтронов в АЗ. Утечка нейтронов из АЗ через боковой отражатель значительна, некоторая часть нейтронов утечки теряется, уходя из бокового отражателя через его внешнюю поверхность.

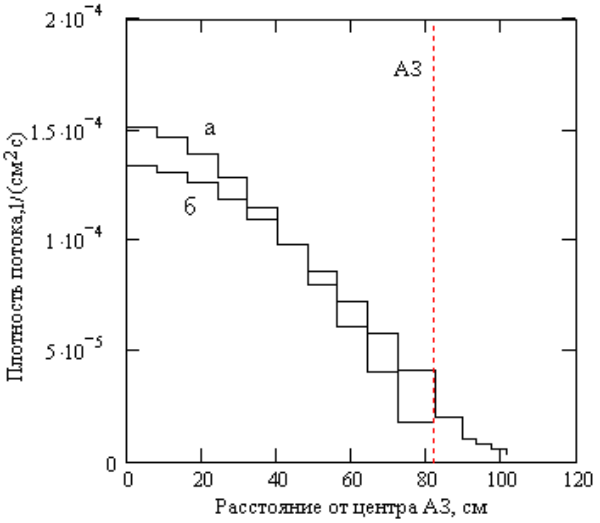


Рисунок 9. Радиальное распределение плотности потока нейтронов в цилиндрической активной зоне без отражателя (а); с отражателем (б)

В таблице 1 представлены результаты расчета эффективного коэффициента размножения при различном обогащении топлива и различной высоте АЗ при сохранении остальных геометрических параметров модели.

Таблица 1. Эффективные коэффициенты размножения для топливной суспензии в цилиндрической АЗ со свинцово-висмутовыми отражателями

Топливо		Высота АЗ, см	$K_{эфф}$	
Обогащение	Объемная доля		Оценка	Средняя квадратичная погрешность
16,1	0,6	90	1,0785	0,0005
16,1	0,55	100	1,0542	0,0005
16,1	0,45	120	0,9945	0,0006
16,5	0,45	120	1,0030	0,0006
17	0,45	120	1,0194	0,0005
18	0,27	200	0,8809	0,0005
	0,3	180	0,9111	0,0005
	0,36	150	0,9649	0,0005
	0,45	120	1,0283	0,0006
	0,55	150	1,0890	0,0005
	0,6	180	1,1133	0,0005
20	0,27	200	0,9306	0,0006
	0,3	180	0,9601	0,0006
	0,36	150	1,0161	0,0005
	0,45	120	1,0890	0,0006
	0,55	150	1,1432	0,0006
	0,6	180	1,1650	0,0005

Приведенные в таблице 1 данные показывают, что при увеличении порозности слоя эффективный коэффициент размножения топливной суспензии существенно снижается.

На рисунке 10 показано сопоставление эффективных коэффициентов размножения для топливной суспензии в активной зоне со свинцово-висмутовом отражателем и с абсолютным отражателем, что соответствует размножающим свойствам бесконечной среды.

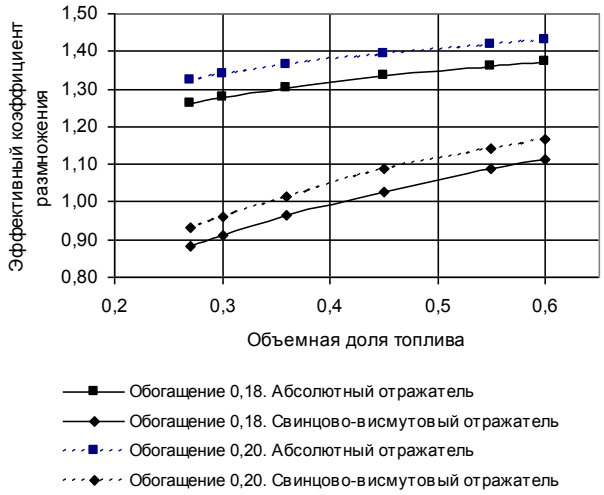


Рисунок 10. Эффективные коэффициенты размножения нейтронов для активной зоны со свинцово-висмутовым отражателем и с абсолютным отражателем

Из сопоставления следует, что утечка нейтронов из активной зоны со свинцово-висмутовым отражателем значительна, что указывает на невысокую эффективность свинцово висмутового сплава, как отражателя нейтронов. Вероятность нейтрону избежать утечки для данного случая показана на рисунке 11.

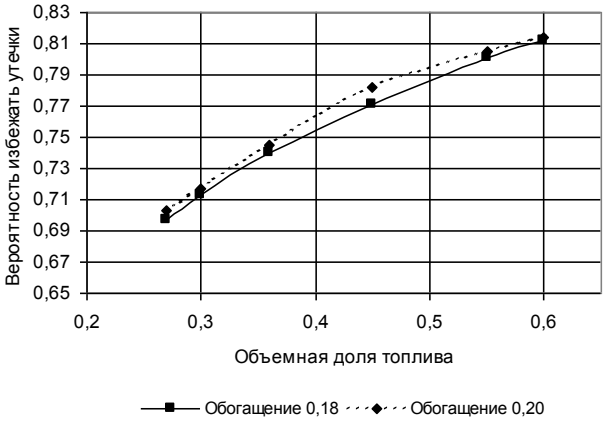


Рисунок 11. Вероятность избежать утечки для АЗ со свинцово-висмутовым отражателем

С увеличением порозности слоя утечка нейтронов из АЗ быстро возрастает, так что при свинцово-висмутовом отражателе критическому состоянию реактора должен соответствовать слой суспензии с минимальной порозностью. Как уже отмечалось, условия для теплоотвода в этом случае хуже, чем в псевдоожиженном слое суспензии. Можно ожидать, что использование для отражателя материала с большим значением коэффициента замедления и альбедо нейтронов, например, графита, позволит улучшить баланс нейтронов в активной зоне. На рисунке 12 показана модель цилиндрической активной зоны с боковым графитовым отражателем.

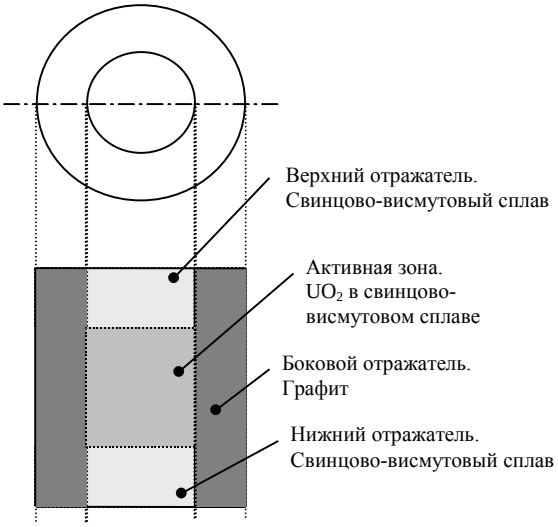


Рисунок 12. Модель цилиндрической активной зоны с боковым графитовым отражателем

Коэффициент размножения и вероятность избежать утечки для этой модели при толщине графитового отражателя 30 см показана на рисунке 13.

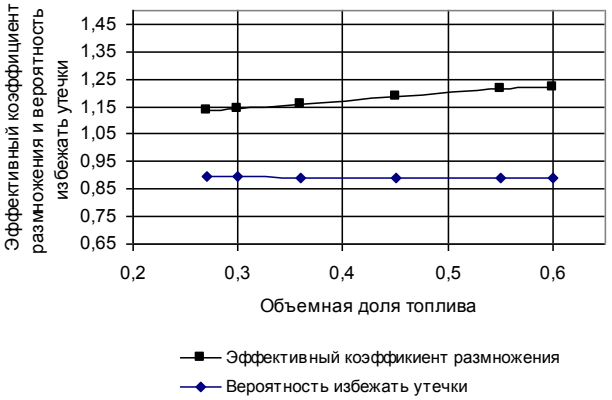


Рисунок 13. Эффективный коэффициент размножения и вероятность избежать утечки для активной зоны с боковым графитовым отражателем

Сопоставление данных, приведенных на рисунках 10 и 13, показывает, что с использованием бокового графитового отражателя критическое состояние может быть достигнуто при существенно большей порозности слоя, чем при свинцово-висмутовом отражателе.

ВЫХОД ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗ ТОПЛИВНОЙ ЧАСТИЦЫ ДИОКСИДА УРАНА

На рисунке 14, поясняющем геометрию расчета, осколок, образованный в точке F, находящейся на расстоянии r_0 от центра частицы, движется в направлении вектора *l*.

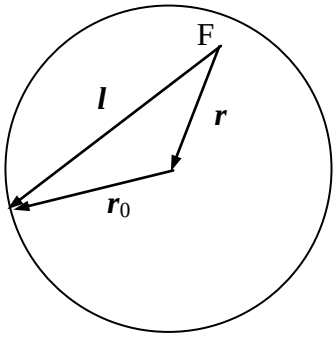


Рисунок 14. К геометрии расчета выхода осколков деления из топливной частицы

Поскольку $r_0 = r + l$, то

$$r_0^2 = r^2 + l^2 + 2rl\cos\theta\,. \qquad (1)$$

Осколок выходит в дисперсионную среду, если его пробег превышает расстояние *l*. Доля таких осколков из числа образованных при делении ядер в частице определяет выход осколков из топливной частицы за счет их кинетической энергии.

Для пробега осколка деления (мг/см^3) в работе [10] предложено соотношение

$$L(E) = (0,0968 + 0,0497 A_s Z_s^{-1/2}) \frac{E^{1/2} A^{1/2}}{Z_0^{2/3}}, \qquad (2)$$

где A_s и Z_s - массовое число и атомный номер тормозящей среды соответственно; Z_0 - средний заряд осколка с массовым числом A; E - начальная кинетическая энергия осколка (Мэв). Для аппроксимации плотности распределения начальной кинетической энергии осколка предложено нормальное распределение со средним E_0, усеченное на интервале $[E_0 - 3\sigma, E_0 + 3\sigma]$, где σ = 5,5 Мэв [10]. Зависимость среднего заряда осколка от его массы практически линейная [11]. В работе [12] она аппроксимирована функцией $Z_0 = 0{,}38A + 1{,}6$. С учетом этого соотношения пробег осколка (мкм) со средней начальной кинетической энергией E_0 рассчитывается по формуле

$$L_0 = \frac{(0,968 + 0,497 A_s Z_s^{-1/2})}{\gamma_s} \frac{E_0^{1/2} A^{1/2}}{(0,38A + 1,6)^{2/3}},$$

где γ_s - плотность тормозящей среды, (г/см^3).

Зависимость средней начальной кинетической энергии осколка деления ^{235}U тепловыми нейтронами [11] показана на рисунке 15.

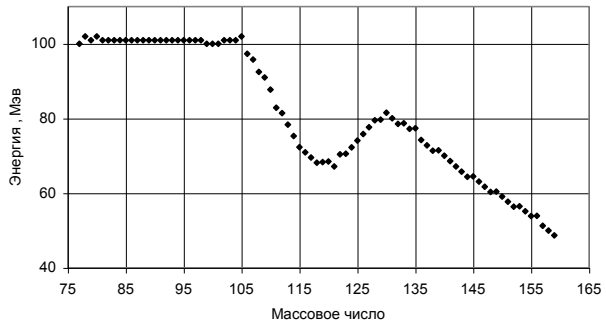


Рисунок 15. Средняя начальная кинетическая энергия осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами

С использованием этой зависимости и аппроксимации для Z_0 в работе [12] проведено усреднение пробегов по спектру масс осколков деления [13]. Для среднего значения фактора

$$\frac{E_0^{1/2}A^{1/2}}{(0,38A+1,6)^{2/3}}$$

получено значение, равное 7,8, что дает для среднего пробега осколка (мкм) выражение

$$L_0 = (7,55+3,88A_s Z_s^{-1/2})\gamma_s^{-1}.$$

Отношение пробегов, табулированное в работе [12], показано на рисунке 16.

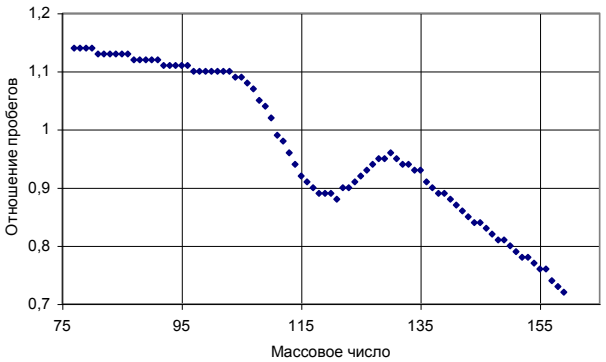


Рисунок 16. Отношение пробега осколка с данным массовым числом к среднему пробегу осколков в материале топливной частицы

Если $p = 2r_0/L$ - приведенный диаметр топливной частицы, то выражение для выхода осколков с пробегом из сферической частицы [12] запишется в виде

$$\mu_0 = \begin{cases} 1,5\dfrac{\delta_0}{p} - 0,5\left(\dfrac{\delta_0}{p}\right)^3, & L_0 \le 2r_0 \\ 1 & L_0 \le 2r_0 \end{cases}.$$

Интегральный выход осколков из топливной частицы можно получить, усредняя μ_0 по спектру масс осколков деления.

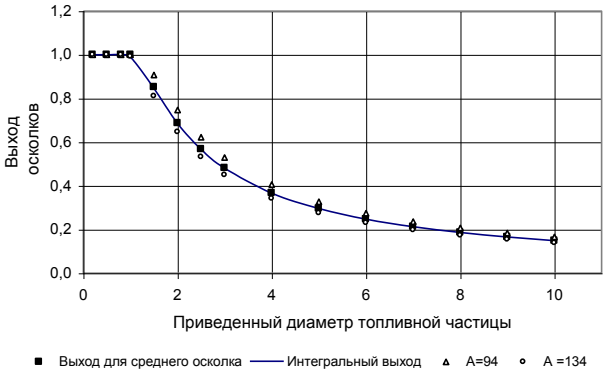


Рисунок 17. Выход осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами из сферической топливной частицы

На рисунке 17 показаны значения интегрального спектра осколков деления в зависимости от приведенного диаметра топливной частицы, а также выходы для осколка с пробегом L (средний осколок) и для осколков с массовыми числами $A = 94$ и $A = 134$. Как видно из рисунка выходы легких и тяжелых осколков могут существенно различаться из-за различия в длине их пробегов. При усреднении по спектру масс осколков эти различия компенсируются, и значение интегрального выхода осколков практически совпадает с выходом, рассчитанным для среднего осколка.

Влияние дисперсии начальной кинетической энергии на выход осколка из топливной частицы может быть учтено с использованием процедуры статистического моделирования. Длина пробега осколка в этом случае определяется из соотношения (2) при розыгрыше начальной кинетической энергии E из усеченного нормального распределения. Координата точки деления в топливной частице разыгрывается из распределения $r^2/(3r_0^3)$, $0 \le r \le r_0$, направление вылета осколка – из распределения $½(\sin\theta)$, $0 \le \theta \le \pi$, после чего из соотношения (1) вычисляется расстояние l и сравнивается с разыгранным значением длины пробега осколка.

На рисунке 18 приведено сопоставление расчетных значений выхода осколков с массовыми числами A= 94 и A = 134 с оценками, полученными по результатам моделирования 40000 делений.

Из рисунка видно, что разброс дли пробегов осколков деления, обусловленный дисперсией значений их начальной кинетической энергии практически не сказывается на величине выхода осколков из сферической топливной частицы.

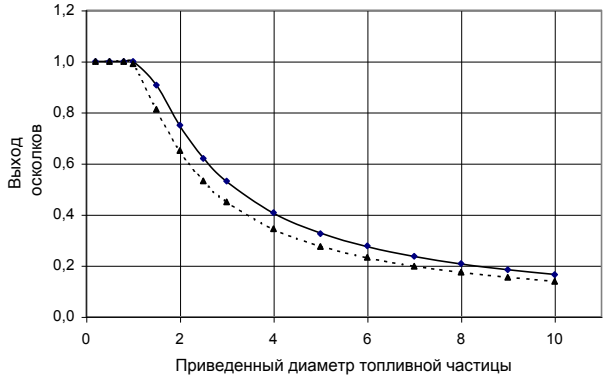


Рисунок 18. Сопоставление расчетных значений выхода осколков деления с атомными массами = 94 (сплошная кривая) и = 134 (пунктир) и результатов статистического моделирования (точки)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность реализации реактора на топливной суспензии в режиме псевдоожижения топливных частиц диоксида урана потоком свинцово-висмутового сплава. Получены оценки скорости сплава в псевдоожиженном слое при различных размерах сферических топливных частиц и различной порозности слоя.

Рассчитаны величины эффективного коэффициента размножения и вероятности избежать утечки нейтронов в цилиндрической активной зоне с абсолютным отражателем, без отражателя, со свинцово-висмутовым отражателем и с графитовым отражателем для различных значений высоты активной зоны, содержания и обогащения топлива. Получены пространственные и энергетические распределения плотности потока нейтронов в активной зоне и в отражателе.

Проведены расчеты интегрального выхода осколков деления ^{235}U тепловыми нейтронами из сферической топливной частицы, а также – выхода осколков с заданным массовым числом. Оценено влияние дисперсии начальной кинетической энергии на выход осколков из топливной частицы по результатам статистического моделирования. Принципы методики расчета выхода осколков деления из топливной частиц предполагается использовать при исследовании пространственного распределения осколков и энерговыделения в топливной частице.

Полученные результаты по исследованию поведения порошковой суспензии в жидкометаллических сплавах рекомендуется применять при разработке гомогенного реактора, в процессе работы которого постоянно корректируется состав топливной композиции, что позволяет осуществлять непрерывное управление ядерно-физическими, химическими и теплофизическими процессами, происходящими в топливе. Знание поведения жидкого топлива в гомогенном реакторе, его размещение в активной зоне – решающий фактор для разработки нового поколения гомогенных реакторов, как наиболее безопасных для ядерной энергетики, а, соответственно, и для перспективы строительства АЭС в Казахстане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Такибаев, Ж.С. Быстрый гомогенный ядерный реактор /Ж.С.Такибаев// Атомная энергия. – 2006. - Т.10, вып.2. - С.157-159
2. Основы радиационно-химического аппаратостроения. /А.Х.Брегер [и др.]. - М.: Атомиздат, 1967. – 498 с.
3. Краух, Г. Ядерно-химические реакторы / Г.Краух // Атомная техника за рубежом. – 1962. - № 2. - С. 9 –13.
4. Steinberg M., Green L., Powell J.R., The Utilization of Fission Fragment Energy for the Fixation of Nitrogen / Steinberg M., Green L., Powell J.R. – New York.: Brookhaven National Laboratory, Upton, 1960. - P. 329 – 335.
5. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г.Касаткин – М.: Химия, 1971. – 784 с.
6. Методика оценки теплофизических свойств многокомпонентных жидкометаллических систем / Ж.С.Такибаев [и др.] // – Вестник НЯЦ РК. – 2004. - Вып.1.- С.127-131
7. Многоцелевой свинцово-висмутовый модульный быстрый реактор малой мощности СВБР-75/100. /А.В. Зародников [и др.]. - IAEA-CN-108-36. - 21 с.
8. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, Manual LA-12625-M, 1997.
9. Групповые константы для расчета ядерных реакторов /Л.П. Абагян [и др.]. – М.: Атомиздат, 1964. – 140 с.
10. Khan, S. Energy Distribution of Fission Fragments from Uranium Dioxide Films.//S.Khan, H.Randall, F.Vernon // Nucl. Sci. Engng. – 1965. - Vol. 23. - P. 8-20.
11. Гангарский, Ю.П. Осколки деления ядер/ Ю.П.Гангарский, Б.Далхсурэн, Б.Н.Марков. – М.: Энергоатомиздат, 1986. - 176 с.
12. Физические основы использования кинетической энергии осколков деления в радиационной химии / В.Т.Казарян [и др.]. - Минск.: Наука и техника, 1972. - 248 с.
13. Зысин, Ю.А. Выходы продуктов деления и их распределение по массам / Ю.А.Зысин, А.А.Лбов, Л.И.Сельченков. – М.: Гостатомиздат, 1963. - 120 с.

ШАПШАҢ НЕЙТРОНДЫ ЦИЛИНДРЛІК ГОМОГЕНДІК РЕАКТОР ҰШІН ОТЫНДЫҚ СУСПЕНЗИЯНЫҢ ОҢТАЙЛЫ НЕЙТРОНДЫҚ - ФИЗИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН МОДЕЛДЕУ

Тәкібаев Ж.С., Потребеников Г.К., Павлова Н.Н., Лотов А.Б.

Қазақстан Республикасының Ұлттық Ядролық Орталығы, Алматы

Мақалада қорғасын-висмут қорытпасындағы уран диоксиді бөлшектерінің отындық суспензиясының көбейтуші қасиеттерін бағалау бойынша моделдік зерттеулер, сондай-ақ нейтрондар өрісінің есептемесі келтірілген, бұлар ядролық сәулелерді тасымалдаудың статистикалық моделдеу кодын MCNP пайдаланып, абсолют (айналық) шағылдырғышы бар, шағылдырғышсыз және қорғасын-висмуттық қорытпадан істелген шағылдырғышы бар цилиндрлік активті аймақтың қарапайым моделдеріне жақындай отырып активті аймақтың (АА) әртүрлі өлшемдері мен отын параметрлері болған кезде орындалған. Сфералық отындық бөлшектен ^{235}U бөлініс жарқыншақтарының интегралдық шығуының, сондай-ақ беріліп қойған массалық саны бар жарқыншақтар шығуының есептемелері ұсынылған. Статистикалық моделдеу нәтижелері бойынша отындық бөлшектен жарқыншақтардың шығуына бастапқы кинетикалық энергия дисперсиясының ықпалы бағаланған. Отындық суспензиясы бар шапшаң нейтронды гомогендік реакторды іске асыру мүмкіншілігін талдаған кезде АА жұмысы жалған сұйылту режімінде қарастырылған.

MODELLING OF OPTIMAL NEUTRON PHYSICAL PARAMETERS OF FUEL SUSPENSION FOR BARREL-TYPE HOMOGENEOUS FAST BREEDER REACTOR

Zh.S. Takibaev, G.K. Potrebenikov, N.N. Pavlova, A.B. Lotov

National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Almaty

The report addresses model studies on evaluation of fuel suspension breeding properties for uranium dioxide particles in lead-bismuth alloy, and calculation of neutron field implemented using MCNP nuclear radiation transfer Monte Carlo modeling code in approximation of simple model of cylindric core with absolute (specular) reflector, without reflector and with reflector of lead-bismuth alloy under various sizes of core and fuel parameters. It provides calculation for ^{235}U fission integrated yield from spherical fuel particle and fission yield with given mass number. Initial kinetic energy dispersion impact to fission yield of fuel particle is estimated upon results of MC modeling. With analysis of possibility to introduce homogeneous fast breeder reactor with fuel suspension, operation of core under pseudo-liquefaction mode is studied.

УДК 539.172:539.2:539.26

СОЗДАНИЕ «ЗАПИРАЮЩЕГО» СЛОЯ В МАТРИЦЕ α-Fe ИОНАМИ КИСЛОРОДА, ПРЕПЯТСТВУЮЩЕЙ ДИФФУЗИИ АТОМОВ БЕРИЛЛИЯ И АТОМОВ ЖЕЛЕЗА

[1)]Нуркенов С.А., [1)]Кислицин С.Б., [1)]Антонюк В.И., [1)]Горлачев И.Д., [2)]Русаков В.С., [1)]Кадыржанов К.К.

[1)]Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан
[2)]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В данной работе методом резерфордовского обратного рассеяния протонов на УКП-2-1, мессбауэровской спектроскопии и рентгенофазового анализа, исследованы термически индуцированные процессы в слоистых системах α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) и α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм), полученных методами магнетронного и термовакуумного распыления атомов Be и атомов Fe, обогащенных ядрами ^{57}Fe. Установлена последовательность фазовых преобразований при последовательном изотермическом отжиге при температуре T = 700^{0}C в интервале времени 0.5-20 часов. Показано, что имплантированный слой ионов кислорода в матрице α-Fe, замедляет взаимную диффузию атомов бериллия и атомов железа. Выявлено, что с увеличением времени изотермического отжига «запирающий» слой частично распределяется по матрице α-Fe, приводя к образованию твердого раствора α-Fe(Be) со стороны железа в системе α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в материаловедении и технике получил широкое распространение метод ионной имплантации. Этот метод позволяет вводить любые атомы в различные твердые тела независимо от термодинамических условий и точно контролировать процентное содержание атомов. Таким образом, можно создавать разнообразные материалы с новыми и подчас уникальными свойствами. Ионную имплантацию применяют также для исследования разнообразных явлений в металлах, включая образование неравновесных сплавов, радиационное повреждение, поверхностные изменения, эрозию, износ, коррозию и т.п. [1, 2]. Для направленной модификации приповерхностных слоев металлических материалов с целью улучшения их поверхностных свойств широко применяются методы ионно-плазменного нанесения покрытий. При магнетронном осаждении бериллия, используется последующая термическая обработка материала, приводящая к улучшению адгезии покрытия с подложкой, образованию и гомогенизации фаз в диффузионной зоне. Исходное неравновесное пространственное распределение атомных компонентов и последующий термический отжиг приводят к пространственной направленности процесса фазообразования и созданию слоистой системы. Для практического применения таких систем необходимо создать термически стабильное неоднородное распределение фаз по глубине образца. Разработка методов получения пространственно неоднородного распределения фаз, стабильного к воздействию температуры, представляет собой важную задачу. В связи с этим необходимо иметь правильное представление об особенностях термически индуцированных процессов, происходящих в слоистой системе [3].

Используя методы мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe, в работе [4, 5] были исследованы процессы фазообразования в слоистой системе Fe–Be и показана возможность получения термически стабильного слоя бериллида железа насыщенной до предельной концентрации бериллия в железной подложке. В работе [6, 7] методами мессбауэровской спектроскопии по конверсионным электронам было исследовано структурно-фазовое состояние поверхности α-Fe, облученной ионами кислорода. Выявлены особенности процесса формирования фаз в имплантационной системе Fe:O^+.

На основе [4-7] следует ожидать, что имплантированный в подложку α-Fe слой кислорода окажет влияние на процессы взаимной диффузии Fe и Be, и будет способствовать более эффективному формированию термически стабильного слоя бериллида железа в слоистой системе Fe–Be.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния «запирающего» слоя, препятствующего диффундированию атомов бериллия и атомов железа с помощью методов резерфордовского обратного рассеяния протонов, мессбауэровской спектроскопии с привлечением рентгенофазового анализа.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения соответствующих исследований были подготовлены фольги α-Fe (99.8% чистоты), толщиной 10 мкм с последующим гомогенизирующим отжигом при температуре T = 850°C в течение 3 ч. Методом ионной имплантации на УКП-2- 1 ИЯФ НЯЦ РК в одну из фольг α-Fe были внедрены ионы O^+ дозой $1{,}15\cdot10^{18}$ ион/см^2 при энергии 1,6 МэВ и плотности тока 2÷3 мкА/см^2. Используя методы магнетронного и термовакуумного распыления атомов Be и атомов Fe, обогащенных ядрами ^{57}Fe, были получены системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) и α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм). Контроль толщины образца осуществлялся как весовым методом, так и с помощью резерфордовского обратного рассеяния протонов. Полученные системы были подвергнуты последовательному изотермическому отжигу в вакууме $5\cdot10^{-6}$ мм. рт. ст., при температуре T = 700°C.

Для исследования термически-индуцированных процессов в вышеуказанных системах использовались метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) протонов, методы мессбауэровской спектроскопии с регистрацией γ-квантов на “пропускание” (TMS) и регистрацией электронов конверсии в геометрии обратного рассеяния (CEMS) с привлечением рентгенофазового анализа. Выбор методик исследования обусловлен следующими факторами: проведение РОР исследований и последующая обработка полученных данных программой RUMP позволяет селективно по глубине, от 0,02÷0,03 до 1,5÷2 мкм, определять элементный состав образца; метод мессбауэровской спектроскопии с регистрацией γ-квантов на “пропускание” дает информацию о фазовом состоянии, усредненную по всей толщине образца; мессбауэровская спектроскопия по конверсионным электронам несет в себе информацию о тонком (~0,1 мкм) приповерхностном слое образца. Мессбауэровские исследования были выполнены на спектрометре MS1104ME в геометрии «на поглощение» при комнатной температуре. Источником γ-квантов служил ^{57}Co в матрице Rh активностью ~5мКи. Калибровка спектрометра осуществлялась с помощью эталонного образца α-Fe. Рентгенофазовый анализ образцов выполнен на дифрактометре D8 ADVANCE на излучении CuK_α. Измерения проводились в геометрии Брэгга-Брентано с обеих сторон образца. Обработка экспериментальных спектров проведена с помощью программного комплекса MSTools [8, 9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения глубины проникновения кислорода в α-Fe и концентрацию кислорода по глубине образца и проведения соответствующих отжигов использовался метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) протонов на ускорительном перезарядном комплексе УКП-2-1 ИЯФ НЯЦ РК.

На рисунке 1 представлены фрагменты РОР – спектров, полученные для системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) при температуре отжига T = 700^{0}C. При дозе Д = $1.15\cdot10^{18}$ ион/см^2, концентрация кислорода на глубине R_p = 0.9 мкм, с шириной страгглинга-0.3мкм, составила 20 ат. %, что соответствует расчетам программы "TRIM".

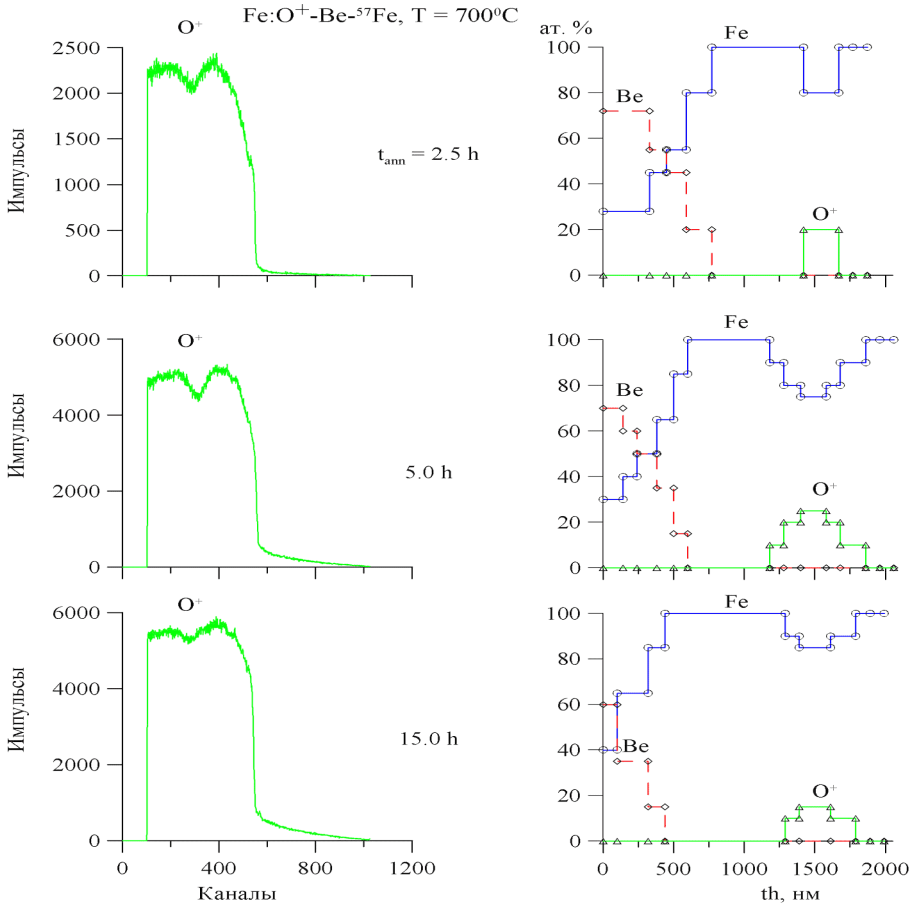


Рисунок 1. Фрагменты РОР – спектров, полученные для системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) при температуре отжига T = 700^{0}C

Из рисунка 1, видно, что при отжиге 2.5 часов, "запирающий" слой ионов кислорода находится без изменения на заданной глубине, однако дополнительный отжиг (+2.5 ч.) привел к небольшому распределению его по матрице α – железа. Последующие отжиги с шагом (+2.5 часа) не привели к заметным изменениям. При суммарном времени отжига 15.0 часов, "запирающий"слой стал распределяться по матрице значительно быстрее, и процентное содержание концентрации ионов кислорода составило 15±2 ат. %, что значительно отразилось на процессы взаимной диффузии в системе α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) (рисунок 6).

На рисунках 2, 3 представлены мессбауэровские спектры ядер ^{57}Fe и результат восстановления функции распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров (А) и (В) полученные после последовательных изотермических отжигов при T = 700°C для слоистых систем α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм)и α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм). Видно, что в общем случае мессбауэровские спектры представляют собой совокупность парциальных спектров магнитоупорядоченного и парамагнитного типа с уширенными резонансными линиями. Каждый из парциальных спектров является суперпозицией большого числа либо зеемановских секстетов, либо квадрупольных дублетов с близкими значениями сверхтонких параметров.

Такие особенности парциальных спектров являются характерными для локально неоднородных систем [9, 10]. В связи с этим обработка и анализ спектров проведен методом восстановления независимых функций распределения сверхтонких параметров, реализованным в программе DISTRI.

На основании анализа литературных данных о сверхтонких параметрах мессбауэровских спектров ядер ^{57}Fe для систем α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) и α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) были восстановлены две независимые функции распределения: (А и В) – сверхтонкого магнитного поля H_n На рисунке 2. представлены мессбауэровские спектры и результат восстановления функции распределения $p(H_n)$, где значения сверхтонких параметров спектров (А) и (В) совпадают с литературными данными представленные в работе [11], и характеризует β-фазу $FeBe_{2+\delta}$ и твердый раствор α-Fe(Be). С увеличением времени изотермического отжига, β-фаза $FeBe_{2+\delta}$ растворяется в α-Fe(Be), увеличивая концентрацию бериллия в растворе. При отжиге 0.5 часов, в системе α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм), было обнаружено появление мессбауэровской линии в центре спектра парамагнитного типа, что привело к использованию CEMS методику в геометрии обратного рассеяния (рисунок 7).

Из рисунка 3, видно, что наблюдается отсутствие парциальных спектров высших бериллидов. Однако, значения сверхтонких полей для меньшего по интенсивности парциального спектра (190 kOe < H_n < 200 kOe) определенно указывает на его принадлежность бериллиду $FeBe_{2+\delta}$, и спектр (В) в диапазоне от (220 kOe < H_n < 360 kOe) относятся к атомам Fe в растворе α-Fe(Be) и наличию атомов Be в ближайшей ее координационной сфере.

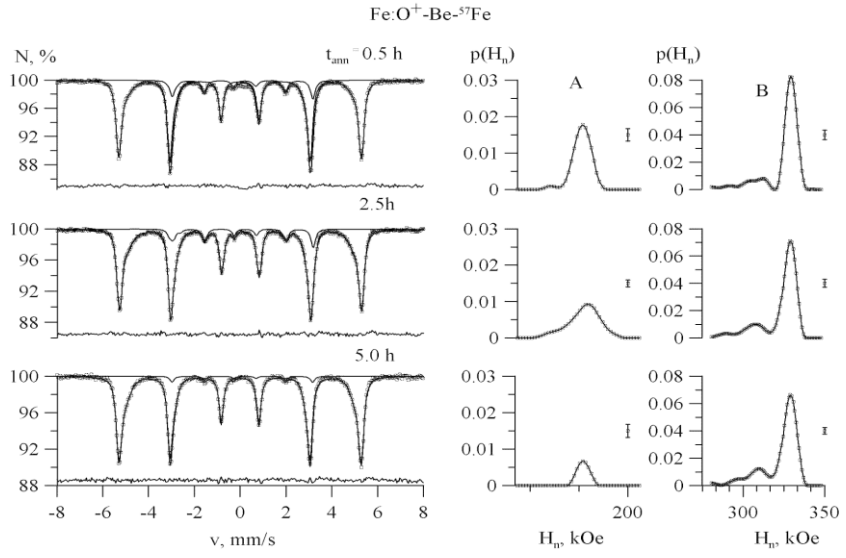


Рисунок 2. Мессбауэровские спектры ядер ^{57}Fe и результат восстановления функции распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров (А) и (В) полученные после последовательных изотермических отжигов при T = 700^{0}C слоистой системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм)

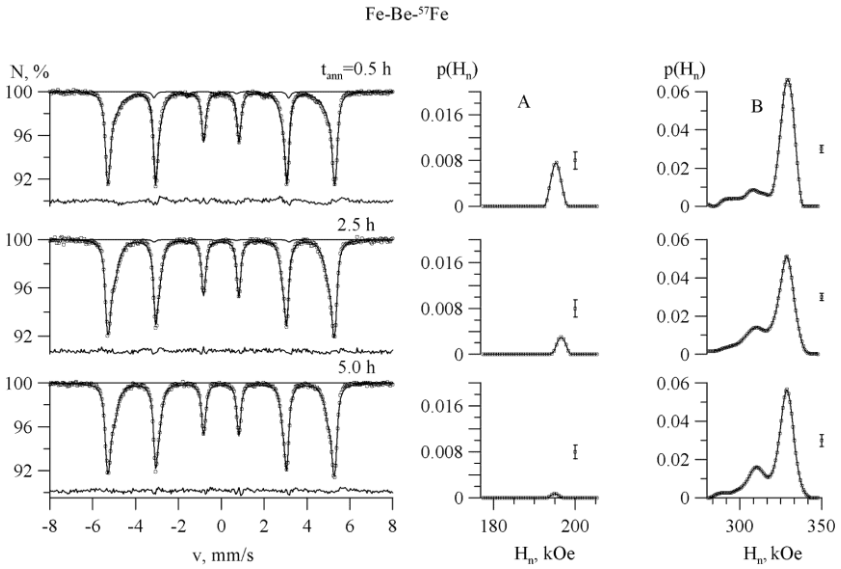


Рисунок 3. Мессбауэровские спектры ядер ^{57}Fe и результат восстановления функции распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров (А) и (В) полученные после последовательных изотермических отжигов при T = 700^{0}C слоистой системы α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм)

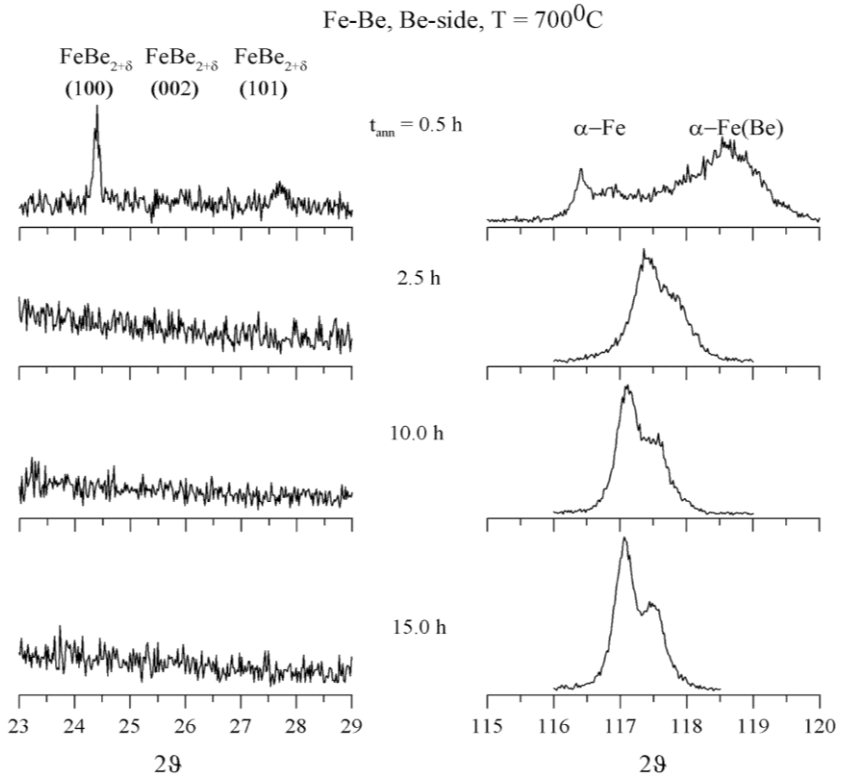


Рисунок 4. Фрагменты дифрактограмм образца слоистой системы α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) после последовательных изотермических отжигов при T = 700^0 C

Для подтверждения растворения β-фазы $FeBe_{2+\delta}$ в растворе α-Fe(Be) в исследуемых слоистых системах (рисунки 4, 5) были проведены рентгенофазовые исследования. На рисунке 4 изображены фрагменты рентгеновских дифрактограмм, полученные со стороны бериллиевого покрытия для системы α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) в зависимости от длительности времени отжига. Видно, что уже при 0,5 часов отжига происходит распад β - фазы $FeBe_{2+\delta}$, что приводит к образованию твердого раствора α-Fe(Be). При дальнейшем увеличении времени отжига, происходит полный распад β - фазы $FeBe_{2+\delta}$ и нарушение структуры α-Fe. Дополнительный отжиг не приводит к заметным изменениям в дифрагтаграммах, т.е., в струк-

туре структуре α-Fe происходит равномерное распределение атомов бериллия по матрице α-Fe.

Из рисунка 5 следует, что в системе α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм), процессы взаимной диффузии атомов бериллия и атомов железа происходят медленно. β - Фаза $FeBe_{2+\delta}$ отчетливо видна еще при 2.5 часах отжига, что вполне отсутвует в системе α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм). Относительная интенсивность рефлексов (1 0 0), (0 0 2) и (1 0 1) для фазы $FeBe_{2+\delta}$ после каждого отжига в обеих системах меньше соответствующей относительной интенсивности парциального CEMS-спектра фазы $FeBe_{2+\delta}$, однако больше чем относительная интенсивность парциального спектра фазы $FeBe_{2+\delta}$ в мессбауэровских исследованиях в геометрии на "поглощение". Это объясняется тем, что глубины, с которых регистрируются рентгеновские лучи больше глубины приповерхностного слоя конверсионной мессбауэровской методики, а так как на глубине меньше бериллия, то, соответственно меньше доля фазы $FeBe_{2+\delta}$ и больше доля твердого раствора Fe(Be).

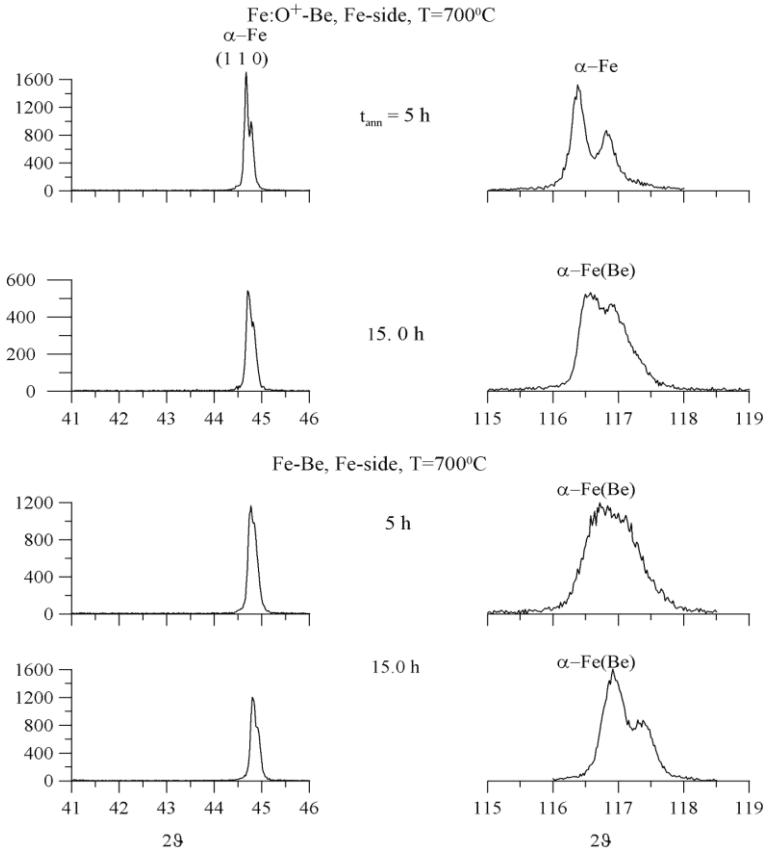


Рисунок 5. Фрагменты дифрактограмм образца слоистой системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) после последовательных изотермических отжигов при T = 700^0 C

На рисунке 6 представлены спектры систем α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) и α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) снятые со стороны железа после последовательного изотермического отжига при T = 700^{0}C. Как видно, из рисунка 6 в системе α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) при 5 часах отжига, произошло полное нарушение структуры α-Fe, тогда как в системе α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм), не наблюдается твердого раствора α-Fe (Be). Представленные экспериментальные данные, свидетельствуют о замедленной миграции атомов бериллия в кислородосодержащей системе и подтверждают идею о влиянии имплантированных ионов кислорода.

CEMS спектры ядер ^{57}Fe слоистой системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) снятые со стороны бериллиевого покрытия после последовательных изотермических отжигов при T = 700°C представлены на рисунке 7. При анализе этих спектров, оказалось, что, как правило, они представляют собой суперпозицию двух парциальных спектров с различной относительной интенсивностью. Исключение составил только спектр, полученный после начального отжига при температуре T = 700^{0}C в течение 0.5 часов, когда наблюдался третий парциальный спектр парамагнитного типа, соответствующий высшему бериллиду $FeBe_5$. При дальнейшем увеличении времени отжига, фазы $FeBe_5$ не обнаружено. В дальнейшем происходит заметное уменьшение концентрации фазы $FeBe_{2+\delta}$, что приводит к увеличению концентрации твердого раствора α- Fe(Be).

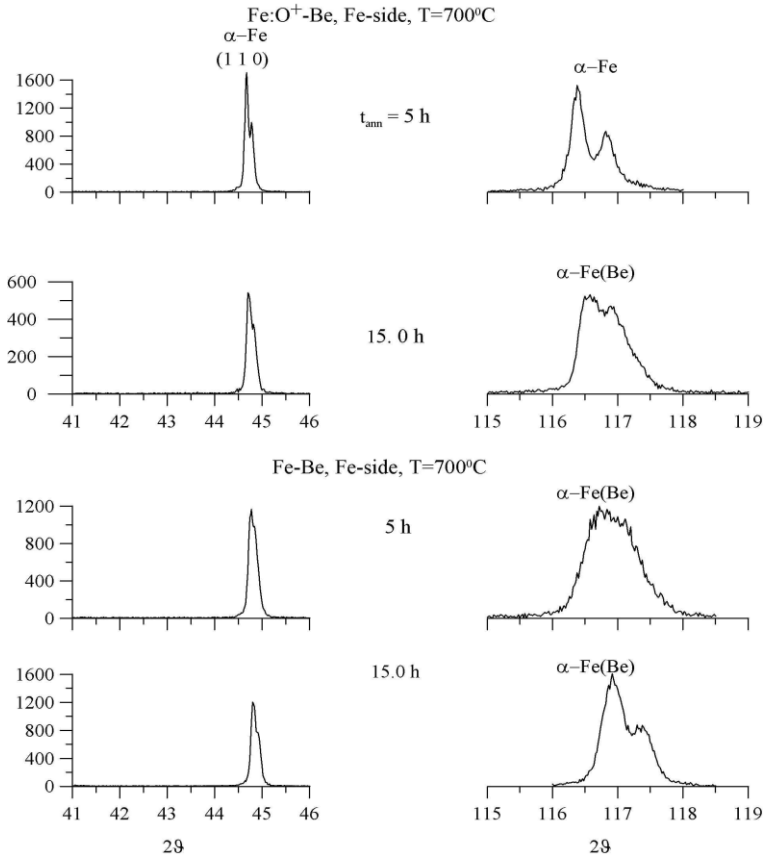


Рисунок 6. Фрагменты дифрактограмм образцов слоистых систем α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) и α-Fe–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) со стороны железа после последовательных изотермических отжигов при T = 700^{0}C.

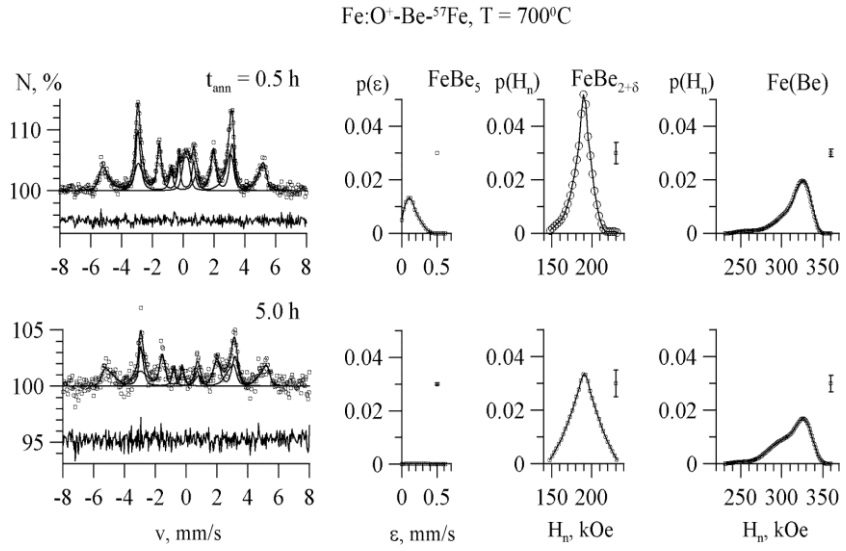


Рисунок 7. CEMS спектры ядер ^{57}Fe слоистой системы α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм) снятые со стороны бериллиевого покрытия после последовательных изотермических отжигов при T = 700^{0}C и результат восстановления функции распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров

Выводы

1. Впервые методами резерфордовского обратного рассеяния протонов, мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe, с привлечением рентгенофазового анализа проведены систематические исследования влияния имплантированных ионов кислорода на термически индуцированные процессы в слоистой системе Fe–Be;
2. Установлена последовательность фазовых превращений в приповерхностных слоях и в объеме образца в процессе изотермического отжига;
3. Показано, что имплантированный слой кислорода в матрице α-Fe замедляет взаимную диффузию атомов бериллия и атомов железа, так как служит барьером, препятствующим диффундированию компонент слоистой системы;
4. Выявлено, что с увеличением времени изотермического отжига «запирающий» слой частично распределяется по матрице α-Fe, приводя к образованию твердого раствора α-Fe(Be) со стороны железа в системе α-Fe:O^+–Be(0,7 мкм)–^{57}Fe(0,1 мкм).

Литература

1. Ионная имплантация / Под ред. Дж. Хирвонена. – М.: Металлургия, 1985. - 9с.
2. Фазовые преобразования в имплантационных системах металл – металлоид / А.К. Жетбаев [и др.]. – Алматы: Гылым, 1995 - 50с.
3. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / К.К.Кадыржанов К.К. – М.: Московский университет, 2005.- С. 639.
4. Diffusion and phase formation in thin two-layer Fe-Be films after subsequent isochronous annealing / K.K.Kadyrzhanov, [et.al] // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. - 2001. - Vol. 174, №4. - P. 463-474.
5. Mössbauer study of thin iron film beryllization / K.K.Kadyrzhanov [et.al] // Hyperfine Interact. – 2002. - Vol. 141/142, № 1-4. - P. 453-457.
6. Mössbauer study of oxygen-implanted iron surface / V.S.Rusakov [et.al] // Surface. - 1995. - №7. - P. 28.
7. Kadyrzhanov, K.K. Phase transformation studies in implantation induced iron-metalloid sistems studied by Mössbauer spectroscopy / K.K.Kadyrzhanov , V.S.Rusakov, T.E.Turkebaev // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. - 2001. - Vol. 170, №1-2. - P. 85-97.
8. Николаев, В.И., Мессбауэровские исследования ферритов / В.И.Николаев, В.С.Русаков. – М.: МГУ, 1985. - 224 с.
9. Русаков, В.С. Мессбауэровская спектроскопия локально-неоднородных систем / В.С.Русаков. –Алматы, 2000. - 430с.
10. Русаков, В.С. Восстановление функции распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров локально неоднородных систем / В.С.Русаков // Известия РАН, Серия физическая. – 1999. - Т.63, №7. - С.1389-1396.
11. Ohta, K., Mössbauer effect and magnetic properties of Iron-Beryllium compounds / K.Ohta // Journal of Applied Physics. – 1968. - Vol.39, №4. - P. 2123-2126.

БЕРИЛЛИЙ ЖӘНЕ ТЕМІР АТОМДАРЫНЫҢ АЛЬФА-FE МАТРИЦАСЫ ҚАБАТЫНА ОТТЕГІ ИОНДАРЫНАН ДИФФУЗИЯЛАНУЫНА БӨГЕТ ЕТЕТІН "БЕКУ" ЖАСАУ

[1)]Нұркенов С.А., [1)]Кислицин С.Б., [1)]Горлачев И.Д., [1)]Антонюк В.И., [2)]Русаков В.С., [1)]Қадыржанов Қ.К.

[1)]ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2)]Ломоносов атындағы Мәскеу Мемлекеттік Университеті, Мәскеу, Ресей

Бұл жұмыста Мессбауэрлік спектроскопия және рентгенфазалық талдау әдістемелерімен, α-Fe:O^+–Be(0.7 мкм)–^{57}Fe(0.1 мкм) және α-Fe–Be(0.7 мкм)–^{57}Fe(0.1 мкм) қабатты жүйелеріндегі термиялық индуцияланған процесстер зерттелінген. Температурасы 700^{0}C, 0,5-20 сағат аралығында, тізбекті изотермиялық жағуда болатын кезекті фазалық өзгерістер тағайындалған.

INVESTIGATION OF IMPACT OF IMPLANTED OXIGEN IONS ON THERMALLY INDUCED PROCESSES IN LAMELLAR SYSTEM IRON-BERILLIUM

[1)]S.A. Nurkenov, [1)]S.B. Kislitsin, [1)]I.D. Gorlachev, [1)]V.I. Antonyuk, [2)]V.S. Rusakov, [1)]К.К. Kadyrzhanov

[1)]Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan
[2)]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

In the performed work the methods of Mössbauer spectroscopy and X-ray analysis there were investigated thermally induced processes in lamellar systems α-Fe:O^+–Be(0.7 mkm)–^{57}Fe(0.1 mkm) and α-Fe–Be(0.7 mkm)–^{57}Fe(0.1 mkm), obtained by methods of magnetron and thermal-vacuum sputtering of Be and Fe atoms enriched by nuclei ^{57}Fe. The sequence of phase transformations at consistent isothermal annealing has been established. It has been shown that implanted oxygen layer in the matrix α-Fe reduces interdiffusion of beryllium and iron atoms.

УДК 539.2:536.42

МАРТЕНСИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н9, ОБЛУЧЕННОЙ АЛЬФА ЧАСТИЦАМИ

[1)]Максимкин О.П., [1)]Осипов И.С., [1)]Айтхожин Э.С., [2)]Бердалиев Д.Т., [2)]Рахашев Б.К., [3)]Налтаев А.

[1)]Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан
[2)]Международный Казахско-Турецкий Университет им. Х.А.Ясави, Чимкент, Казахстан
[3)]ЮКГУ им. М.Ауэзова, Чимкент, Казахстан

В данной работе представлены результаты по изучению прямого и обратного мартенситного превращения в аустенитных нержавеющих сталях , после циклотронного облучения. Установлено, что в процессе растяжения, как необлученной, так и облученной альфа-частицами метастабильных нержавеющих хромоникелевых сталей типа 18-9 и 18-10, мартенситная α'-фаза зарождается и накапливается неравномерно по длине деформируемого образца. Показано, что в процессе изохронных отжигов количество α'-фазы в деформированной образце уменьшается и при температуре 1073 К обратное мартенситное α'→γ превращение завершается.

Введение

Известно, что нержавеющие хромоникелевые стали после отжига при высоких температурах (1300 К) и охлаждения на воздухе сохраняют аустенитную структуру γ (ГЦК-решетка) и только ниже некоторой температуры M_S в стали может спонтанно произойти бездиффузионный фазовый переход аустенита в мартенсит (ОЦК-решетка), широко известный как мартенситное γ→α превращение [1]. Выше температуры M_S аустенитная структура остается в устойчивом метастабильном состоянии, однако под действием пластического деформирования в аустените также бездиффузионно может образоваться, так называемый, α′-мартенсит деформации [3]. Выше температуры M_d аустенит остается стабильным, так что мартенсит деформации может быть инициирован только в интервале температур $M_S<T<M_d$, который для нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т составляет 148 К (-125°С) – 373 К (100° С). Показано также [4], что высокотемпературный (870-1070 К) нагрев деформированной аустенитной стали приводит к уменьшению и/или полному отжигу индуцированного деформацией ферромагнитного мартенсита в результате обратного α→γ перехода.

Исследования прямого и обратного мартенситного превращения в сплавах на основе железа имеют важное значение для выяснения механизмов формирования физико-механических свойств при термомеханической обработке промышленных сплавов. Мартенситное превращение прямое (в деформируемых) и обратное (в отжигаемых деформированных) необлученных сталях изучено достаточно полно (см. например [4,5]). В то же время известно сравнительно мало исследований, посвященных $\gamma \leftrightarrows \alpha'$ переходам в аустенитных сталях, подвергнутых облучению нейтронами и заряженными частицами [6,7]. Между тем актуальность этих работ для реакторного материаловедения несомненна, поскольку нержавеющие стали являются основными конструкционными материалами для быстрых реакторов и термоядерных установок.

В настоящей работе представлены результаты по изучению прямого и обратного мартенситного превращения в близких по составу аустенитных нержавеющих сталях с содержанием никеля 9 и 10%, после циклотронного облучения.

Методика эксперимента

Исследовали две аустенитные нержавеющие стали следующего состава (вес %): 0,1%C, 1,67%Mn, 0,34%Si, 0,032%P, 0,013%S, 17,00%Cr, 9-10,66 % Ni, 0,5% Ti – остальное Fe, несколько различающиеся содержанием никеля. Из стальных заготовок, имеющих форму пластин толщиной 0,25-0,35 мм, с помощью специально разработанного штампа были изготовлены образцы для механических испытаний в виде двойной лопатки с размерами рабочей части 10×3,5 мм и толщиной 0,25-0,30 мм. Образцы отжигали при температуре 1323К (30 мин.) и закаливали в воду. Часть термообработанных образцов была облучена на изохронном циклотроне У-150 ИЯФ НЯЦ РК альфа – частицами с энергией 50 МэВ «на прострел» флюенсом $2\cdot10^{17}$ част/см^2, другая часть проб была равномерно по объему имплантирована гелием до концентрации 10^{-3} ат.%.

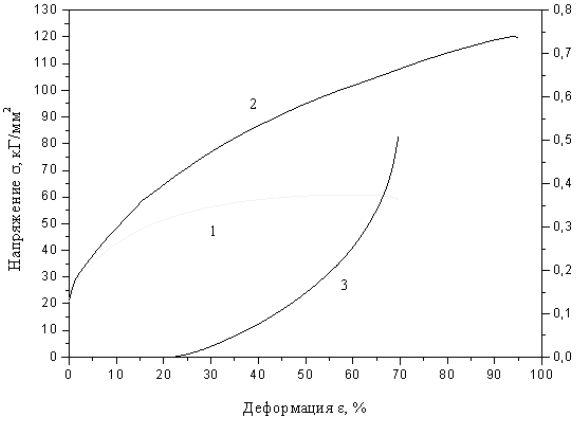
Необлученные и облученные стальные образцы испытывали на растяжение со скоростью 0,5 мм/мин на универсальной испытательной машине «Инстрон-1195» при комнатной температуре. В процессе деформирования регистрировали инженерную диаграмму в координатах «нагрузка – удлинение», а также кривую «количество ферромагнитной фазы – удлинение», для построения которой использовали ферритоскоп Fischer MP-30. При этом содержание α′-фазы определяли как в шейке деформируемого образца, так в участках, далеко отстоящих от нее.

С целью определения локальных «истинных» напряжений и деформаций был использован разработанный нами метод цифровой оптической экстензометрии [9], наиболее успешно используемый для радиоактивных образцов. В этом методе на каждом

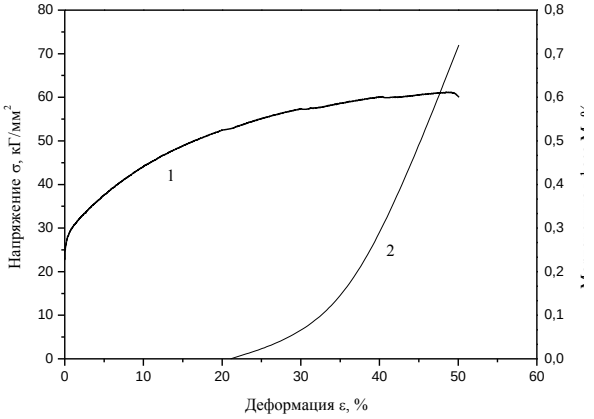
шаге деформации с помощью системы технического зрения и специально созданных компьютерных программ анализируется распределение расстояний между отметками, нанесенными на поверхность образца, а также изменение формы отметок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1а приведены машинная диаграмма растяжения необлученного образца стали 12Х18Н10Т и кривая накопления в нем α′-мартенсита деформации в области шейки на образце. Из рисунка 1а видно, что α′-фаза начинает образовываться при деформации ~25%.



а



б

Рисунок 1. Инженерная (1) и «истинная» (2) кривые растяжения образцов нержавеющей стали 12Х18Н10Т (а) и облученной альфа-частицами «на прострел» стали Х18Н9 (б). Кривые накопления мартенситной фазы при деформации необлученной стали 12Х18Н10Т (3) и легированной гелием (10^{-3} ат%) (4)

На рисунке 1б представлена первичная кривая растяжения образца стали Х18Н9, облученного «на прострел» альфа-частицами. Из рисунка 1б следует, что прочностные характеристики облученной хромоникелевой стали типа 18-9 больше, чем у необлученной типа 18-10 в то время как пластичность, характеризуемая величиной относительного удлинения, осталась практически на том же уровне. На рисунке 1а для сравнения приведены инженерная (машинная) и «истинная» диаграмма растяжения необлученной стали 12Х18Н10Т. Последняя кривая была построена с учетом изменения площади сечения образца вследствие его удлинения. В результате анализа «истинных» кривых деформационного упрочнения стальных образцов установлено, что «истинные» критические напряжения образования мартенситной α′-фазы в необлученной стали 12Х18Н10Т оказались равными 620 МПа, тогда как для облученной «на прострел» стали Х18Н9 они составили 650 МПа.

Обращает на себя внимание тот факт, что в необлученном образце стали Х18Н9, имевшем сравнительно небольшую толщину (0,25 мм) и деформированном при комнатной температуре, α′-мартенсит образовывался только на заключительной стадии разрушения, а не во время растяжения. Оценки «истинных» значений напряжения разрушения σ_p показали, что в этом случае σ_p <600 МПа, т.е. не достигали уровня напряжений, при которых возможно образование α′-фазы – 620-650 МПа.

На рисунке 1 приведены также кривые накопления мартенситной α′-фазы, индуцированной деформацией. Они показывают как в процессе растяжения изменяется количество α′-фазы в шейках деформируемых образцов. Видно, что кинетика накопления мартенсита различна в различных образцах. Из рисунка 1б также следует, что к моменту, когда образец растянулся на 40%, в шейке облученной стали типа 18-9 образовалось мартенситной α′-фазы в два раза больше, чем в необлученной.

Измерения содержания ферромагнитной α´-фазы в стальном деформированном образце показали, что на начальных стадиях растяжения распределение α′-фазы однородно по всей его рабочей длине. Однако, с началом локализации деформации, скорость образования и накопления α′-фазы в области будущей стационарной шейки становится значительно больше, чем в других частях образца. Типичная кривая распределения ферромагнитной α′-фазы по длине деформированного образца приведена на рисунке 2. Здесь же показано, как распределены по рабочей длине значения «истинных» напряжений, найденные с использованием метода цифровой оптической экстензометрии. Видно, что обе кривые имеют максимум в области шейки, которая в данном случае образовалась на расстоянии 12 мм от неподвижного захвата. В этой области выпало максимальное количество (0,25 %) мартенситной α´- фазы при напряжении 1180 МПа. Обращает на себя внимание тот факт, что образование мартенсита деформации в

образце стали Х18Н9, облученной альфа-частицами «на прострел», было также неоднородным на стадии локализации пластического течения (рисунок 3).

Деформированные необлученный и облученный «на прострел» стальные образцы подвергали изохронным (30 мин.) отжигам в интервале температур 670 К – 1073 К с шагом 25 К. После медленного охлаждения до комнатной температуры с помощью феррозонда Fischer MP-30 определяли распределение мартенситной α′- фазы по длине образца. В результате этих экспериментов можно было изучать кинетику отжига α′- фазы в любой точке по рабочей длине образца и в том числе в шейке (рисунок 4).

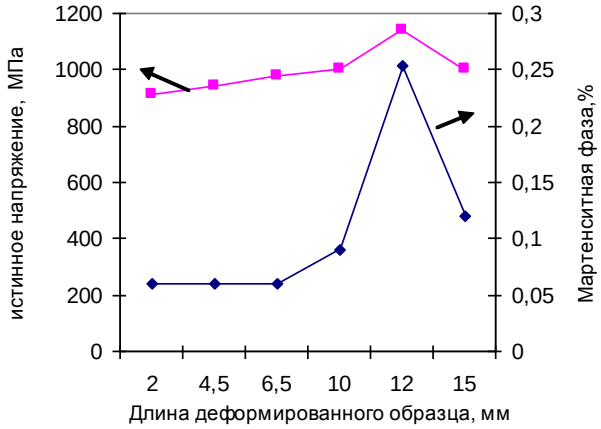
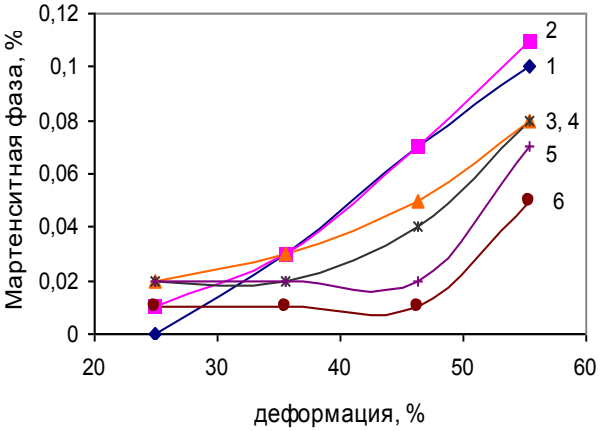


Рисунок 2. Распределение мартенситной α′- фазы (1) и «истинных» напряжений (2) по длине деформированного образца стали 12Х18Н10Т



1,2 - шейка, ,3,4 – участки на образце, далеко отстоящие от шейки

Рисунок 3. Кинетические кривые образования мартенситной α′- фазы в различных участках деформируемого образца стали Х18Н9, облученной альфа-частицами «на прострел»

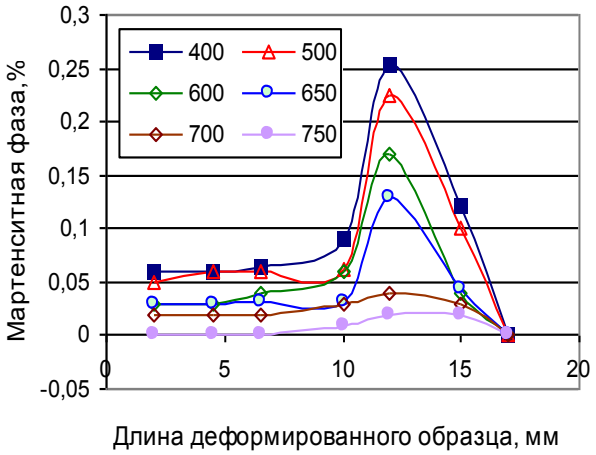


Рисунок 4. Количество мартенситной α′-фазы в выбранных точках рабочей части деформированного образца стали 12Х18Н10Т при различных температурах отжига

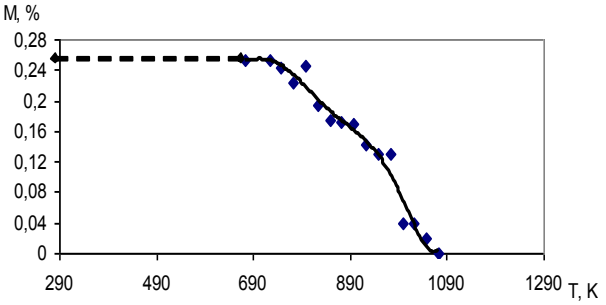


Рисунок 5. Изменение количества α′-фазы в шейке деформированного образца стали 12Х18Н10Т в зависимости от температуры отжига

На графике изменения количества мартенситной α′-фазы в зависимости от температуры отжига деформированного образца в шейке (рисунок 5) можно выделить четыре области, характеризующиеся различной скоростью уменьшения α′-фазы.

В интервале температур отжига 290-723 К количество мартенсита остается практически неизменным. При температуре выше 720 К начинается процесс отжига α′-фазы. В интервале 723-853 К α′→γ превращение протекает со сравнительно небольшой скоростью, тогда как в области 853-943 К скорость α′→γ превращения еще меньше, чем в области 723-853 К. Четвертая температурная область (943-1073 К) характеризуется наиболее интенсивным уменьшением количества мартенситной фазы. Аналогичная 4-х областная зависимость скорости уменьшения α′-фазы от температуры отжига наблюдается и для остальных точек деформированного образца (рисунок 6).

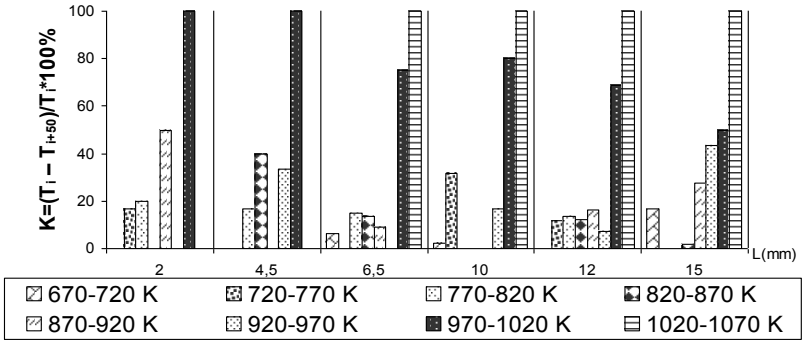


Рисунок 6. Зависимость скорости спада количества α′- фазы от температуры отжига образца стали 12Х18Н10Т

Из анализа рисунка 5 следует, что в области равномерного распределения деформации на расстоянии 4,5 мм от левого захвата в интервале 820-970 К наблюдается уменьшение скорости $\alpha' \rightarrow \gamma$ превращения, а на расстоянии 6,5 мм от левого захвата уменьшение скорости $\alpha' \rightarrow \gamma$ превращения наблюдается в интервале 770-970 К. В интервале 970-1070 К для остальных точек деформированного образца характерно интенсивное уменьшение количества мартенситной α′-фазы. При температурах, больших, чем 1073 К, мартенситной α′- фазы в стали после 30 мин. отжига зарегистрировано не было.

Отметим, что в работе [6] при исследовании влияния отжигов на обратное мартенситное превращение в стали 12Х18Н10Т выделено три, а не четыре как в данной работе, области, характеризующихся различной скоростью уменьшения α′-фазы при отжиге. Возможно, это связано с тем, что в работе [6] исследовали образцы цилиндрической формы и использовали иную скорость растяжения (0,1 мм/мин.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в процессе растяжения, как необлученной, так и облученной альфа-частицами метастабильных нержавеющих хромоникелевых сталей типа 18-9 и 18-10, мартенситная α′-фаза зарождается и накапливается неравномерно по длине деформируемого образца, причем протекает интенсивнее в шейке, чем вдали от нее. В результате в области шейки выпадает максимальное количество мартенситной α′-фазы.

Изотермический отжиг образцов нержавеющих хромоникелевых сталей, деформированных при комнатной температуре, показал, что независимо от исходной величины магнитной α′-фазы ее относительное количество одинаковым образом уменьшается после отжига в интервале 290-1073 К, и при температуре 1073 К обратное мартенситное $\alpha' \rightarrow \gamma$ превращение завершается. Для температурного изменения количества мартенситной фазы характерно наличие 4-х температурных областей, в которых α′-фаза уменьшается с различной скоростью.

Облучение нержавеющей стали 12Х18Н9 альфа-частицами с энергией 50 МэВ «на прострел» ($2 \cdot 10^{17}$ част/см^2, $T_{обл}$ <100°С) привело к увеличению интенсивности прямого мартенситного превращения при деформации и практически не повлияло на закономерности обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения при отжиге деформированных облученных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курдюмов, Г.В. Превращения в железе и стали/ Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. - М.: Наука, 1977.
2. Пикеринг, Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Ф.Б.Пикеринг. - Металлургия, 1982. – 182 с.
3. Фазовый наклеп аустенитных сплавов на железо-никелевой основе / К. Малышев [и др.]. - М.: Наука, 1982. - 260 с.
4. Петров, Ю.Н. Дефекты и бездиффузионное превращение в стали / Ю.Н.Петров. – Киев: Наук. думка, 1972. – 150 с.
5. Гойхенберг, Ю.Н. Мартенситные превращения при пластической деформации и их влияние на механические свойства. / Ю.Н. Гойхенберг [и др.] // Вопросы производства и обработки стали. – 1972. - № 107.
6. Максимкин, О.П. Влияние скорости деформации на мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение и механические свойства стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами / О.П.Максимкин, Д.Х.Садвакасов // ФММ. – 1991. - № 9. - С. 202-205.
7. Максимкин, О.П., Влияние температуры деформации и отжига на мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение и механические свойства стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами / О.П.Максимкин, Д.Х. Садвакасов // ФММ. – 1992. - №5. С. 147-150.
8. Maksimkin, O.P. Deformation Induced Martensitic Transformation in Cr-Ni Stainless Steel Irradiated by Neutrons / O.P.Maksimkin // Physical status solidy (b). – 1997. - Vol.163. - P.R7-R8.
9. Максимкин, О.П. Деформационная экстензометрия при механических испытаниях высокорадиоактивных образцов металлов и сплавов / О.П.Максимкин, М.Н.Гусев, И.С.Осипов // Вестник НЯЦ РК. – 2005. - Вып.1. - С.46-52.

АЛЬФА БӨЛШЕКТЕРМЕН СӘУЛЕНЕНГЕН ТОТ БАСПАЙТЫН 12Х18Н9 АУСТЕНИТТІ БОЛАТТАҒЫ МАРТЕНСИТТІК ТҮРЛЕНУЛЕР

[1)]Максимкин О.П., [1)]Осипов И.С., [1)]Айтхожин Э.С., [2)]Бердалиев Д.Т. [2)]Рахашев Б.К. [3)]Налтаев А.

[1)]ҚР ҮЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2)]Қ.А. Ясауи атындағы Халықаралық Қазақ-Түрік университеті, Шымкент, Қазақстан
[3)]М.Әуезов атындағы ОҚМУ, Шымкент, Қазақстан

Бұл жұмыста тот баспайтын аустенитті болаттардағы циклотрондық сәулелеуден кейінгі тура және кері мартенситік түрленулерді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Сәулеленбеген және альфа-бөлшектермен сәулеленген метастабильді тот баспайтын хромникельді 18-9 және 18-10 типті болаттарды созу процесінде мартенситтік α′-фаза деформацияланған үлгінің бойында біркелкі емес пайда болатыны және жинақталатыны анықталды. Деформацияланған үлгіні изохрондық күйдірулер процесінде α′-фазаның мөлшері азаятыны және 1073 К температурада кері мартенситік $\alpha' \rightarrow \gamma$ түрлену аяқталатыны көрсетілді.

MARTENSITIC TRANSFORMATION IN 12CR18NI9 AUSTENITIC STAINLESS STEEL IRRADIATED BY ALPHA-PARTICLE

[1)]O.P. Maksimkin, [1)]I.S. Osipov, [1)]E.S. Aitkhogin, [2)]D.T. Berdalyev, [2)]B.K. Rakhashev, [3)]A. Naltaev

[1)]Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
[2)]International Kazakh-Turkish University, Chimkent, Kazakhstan
[3)]South Kazakh State University, Chimkent, Kazakhstan

This work presents the results on study of direct and back martensitic transformation in austenitic stainless steel after cyclotron irradiation. It was determined that during the tension of metastable stainless chromium-nickel steel of a type 18-9 and 18-10 by both non-irradiated and irradiated with alpha–particles the martensitic α'-phase is generated and accumulated irregularly along a deformable sample.

It is shown that during the isochronous annealing the quantity of α'-phase in the deformable sample decreases and at the temperature of 1073K the back martensitic $\alpha' \rightarrow \gamma$ transformation is completed.

УДК 539.21:539.12.04

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАЗ НА ПОВЕРХНОСТИ Fe-Ti СПЛАВА С ТИТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

[1)]Сергеева Л.С., [1)]Верещак М.Ф., [1)]Манакова И.А., [1)]Антонюк В.И., [2)]Русаков В.С., [1)]Кадыржанов К.К.

[1)]Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан
[2)]МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Методами мессбауэровской спектроскопии и рентгенофазового анализа исследована слоистая система $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,8 мкм) в процессе изотермического отжига при T = 650°C. Установлена последовательность и кинетика фазовых превращений. При временах отжига $t_{отж} \geq 50$ ч наблюдается термическая стабилизация неоднородного по глубине структурно-фазового состояния исследованной системы. Показано, что в процессе отжига концентрация титана в твердом растворе α-Fe(Ti) остается постоянной по всему образцу, в том числе и в области фазовых превращений. Получены зависимости относительных интенсивностей парциальных мессбауэровских спектров и рентгеновских дифракционных линий образующихся фаз, а также концентрации титана в объеме и приповерхностном слое образца от продолжительности отжига.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием ионных и ионно-плазменных методов обработки поверхности материалов возникает необходимость в исследованиях фазовых превращений в модифицированных слоях. Знание кинетики этих превращений позволят сознательно управлять структурой, а, следовательно, и свойствами материалов.

Сплавы Fe-Ti представляют особый интерес как материалы, обладающие повышенной удельной прочностью, коррозионной стойкостью, износостойкостью, жаропрочностью и другими положительными свойствами [1]. Эти сплавы поглощают водород в относительно больших количествах и освобождают его при нагреве, они обладают высоким удельным сопротивлением, не окисляясь при температурах до 500°C. Все это позволяет использовать их в различных областях техники. В частности, железо-титановые сплавы являются перспективными материалами для создания водородных накопителей, магнитов и пленочных резисторов [2].

Титан имеет две полиморфные модификации: α-Ti с гексагональной плотно упакованной решеткой и высокотемпературную β-модификацию с кубической объемно-центрированной решеткой. При этом температура полиморфного превращения составляет 882°C. При охлаждении β-Ti в присутствии β-стабилизатора претерпевает эвтектоидное превращение, температура которого зависит от концентрации стабилизатора и может понизится до 590°C и ниже [3].

Железо относится к эвтектоидным β-стабилизаторам титана, образующим интерметаллиды и твердые растворы. Полиморфное β↔α превращение может проходить двумя путями. При медленном охлаждении оно происходит по обычному диффузионному механизму с образованием структуры твердого раствора α-Ti(Fe). Растворимость железа в α-Ti очень низка и при 550°C составляет ~0,34 ат.% [4]. Увеличение содержания железа в сплаве вызывает выделение второй фазы FeTi, количество которой растет с повышением содержания легирующего элемента. При быстром охлаждении β→α-превращение происходит по бездиффузионному механизму с образованием мартенситных структур. При старении из мартенсита выделяется β- или интерметаллидная фаза [5].

В соответствии с литературными данными в системе Fe-Ti существуют в той или иной степени стабильные при комнатной температуре следующие фазы.

1. Твердый раствор железа в α-Ti, находящийся в равновесии с интерметаллидом FeTi. Соединение FeTi имеет кубическую структуру типа CsCl. Область гомогенности этого интерметаллида 52-54 ат.% Fe и с понижением температуры не изменяется [6, 7].
2. В богатых титаном сплавах возможно существование трех метастабильных фаз: α', α", и ϖ. Все эти фазы являются мартенситными и образуются из β-фазы при закалке [8].
3. Твердый раствор титана в железе. Растворимость титана в α-Fe при температурах 1200, 1100, 1000, 900, 800 и 500°C определена равной 12,0; 8,5; 7,5; 5,0; 4,0 и 2,5% соответственно. Растворимость Ti в α-Fe при комнатной температуре составляет 0,03 ат.% [9].
4. Интерметаллид Fe_2Ti – наиболее богатое железом соединение, находящееся в равновесии с твердым раствором титана в α-железе или интерметаллидом FeTi. Соединение Fe_2Ti имеет широкую область гомогенности (~8÷10 ат.%) и гексагональную структуру типа $MgZn_2$ [9].
5. Интерметаллид $FeTi_2$ образуется в богатых титаном сплавах по перитектоидной реакции (β-Ti + FeTi ↔ $FeTi_2$). По данным работы [5] в присутствии таких элементов, как Mo, V, Al и O, реакция образования соединения $FeTi_2$, идущая в двойных сплавах чрезвычайно медленно, ускоряется.

Все перечисленные выше фазы хорошо идентифицируются с помощью мессбауэровской спектроскопии на ядрах ^{57}Fe [2, 10, 11, 12].

В литературе практически отсутствуют экспериментальные данные, в которых бы исследовалась кинетика фазовых превращений в слоистых системах Fe-Ti при термических воздействиях. Отметим лишь одну работу [13], где были представлены результаты мессбауэровских исследований сплавов Fe-Ti, образованных на поверхностях между тонкими пленками Fe и Ti после тепловой обработки. В этой работе было проведено исследование двух серий образцов: на фольги Fe(10 мкм) и Ti(50 мкм) осаждали Ti(30 мкм) и Fe(10 мкм), соответственно. Полученные образцы подвергали отжигу при температурах 700÷1000°C. Мессбауэровские спектры состояли из синглета от FeTi, дублета от Fe_2Ti и секстета от α-Fe. На основе анализа относительных вкладов в суммарные спектры от FeTi и Fe_2Ti сделано предположение, что атомы Fe диффундируют в слои Ti в пленках Fe-Ti, в то время как атомы Ti проникают в слои Fe в пленках Ti-Fe во время отжига. Авторы не комментируют обнаруженную направленность диффузионных потоков. Нам кажется, что неизбежное различие в структурах подложек и осажденных слоев существенно влияет на кинетику и направленность роста диффузионного слоя, а также количественные соотношения между отдельными фазами.

В работах [14, 15, 16] сформулировано и экспериментально проверено необходимое условие создания термически стабильных поверхностных слоев, содержащих заданную фазу. На примере слоистой системы Fe-Be показано, что если концентрация примеси в твердом растворе α-Fe достигает предела растворимости ($C_{пр}$) при данной температуре отжига ($T_{отж}$), при котором диффузионный поток компонентов между двухфазной областью и областью твердого раствора становится равным нулю, то данная слоистая система будет термически стабильной при этой $T_{отж}$. Таким образом, на поверхности слоистой системы [15, 16] удалось сформировать бериллид β-$FeBe_2$, а в объеме – насыщенный раствор α-Fe(Be). Длительный отжиг образца при температуре 720°C не привел к изменению фазового состава в приповерхностном слое образца, не изменилась и концентрация бериллия в твердом растворе.

В работе [17] методами мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифракции нами исследованы фольги железа (10 мкм) с титановым покрытием (1 мкм), подвергнутые двухчасовому последовательному отжигу до 750°C с шагом 50°C в вакууме. Установлены последовательность и характерные температуры фазовых превращений в контактном слое и объеме образцов. Показано, что процесс взаимодействия титана с железом начинается при 550°C с формирования интерметалидов FeTi и Fe_2Ti. Увеличение температуры отжига приводит к растворению титана в матрице железа с образованием твердого раствора α-Fe(Ti).

Целью настоящей работы является исследование кинетики формирования фаз и получение термически стабильного неоднородного по глубине структурно-фазового состояния в бинарной (Fe-Ti) слоистой системе с использованием в качестве подложки раствора с предельной концентрацией Ti в α-Fe.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сплав $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$ был получен путем сплавления шихты из α-Fe (99,8%) и Ti (99,8%) заданного состава в индукционной печи. Для предотвращения окисления, газонасыщения и испарения титана, его предварительно завальцовывали в железную фольгу и помещали в вакуумированную кварцевую ампулу. Такая процедура упаковки титана позволила сохранить лигатуру сплава и исходный вес образца после переплава. В результате анализа мессбауэровских спектров по методике, изложенной в [17, 18], была оценена концентрация титана в сплаве, которая составила $C_{Ti} \cong 3{,}4$ ат.%

Полученный слиток раскатывали в фольгу до толщины 13 мкм и подвергали гомогенизирующему отжигу при температуре 950°C в вакууме $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Далее, на гомогенную фольгу ионно-плазменным методом наносили покрытие из титана толщиной 1 мкм. В отличие от предыдущих наших исследований [18], на титановое покрытие дополнительно был напылен слой ^{57}Fe толщиной 0,08 мкм термовакуумным методом.

Полученная таким образом слоистая система $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,8 мкм) была подвергнута последовательным изотермическим отжигам при температуре 650°C в вакуумной печи при остаточном давлении $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Скорость нагрева и охлаждения образца поддерживалась равной 10° в минуту.

После каждого отжига проводились исследования образцов методами мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии. Измерения мессбауэровских спектров осуществлялись на спектрометре MS-1104Em при комнатной температуре путем регистрации γ-квантов в геометрии на пропускание (МС) и конверсионных электронов в геометрии обратного рассеяния (КЭМС). Источником γ-квантов служил ^{57}Co в матрице Rh. Обработка мессбауэровских спектров была выполнена с помощью программного комплекса MSTools методом восстановления функций распределения сверхтонких параметров парциальных спектров [19, 20]. Рентгеновский анализ образцов проводился на дифрактометре BRUKER D8 на Cu-K_α излучении. Дифрактограммы снимались в интервале углов 2θ от 30° до 120° с шагом 0,01°. Идентификация фаз осуществлялась по данным ASTM.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что в зависимости от содержания компонент в системе Fe-Ti образуются эвтектики: α-Ti(Fe)–FeTi, FeTi–Fe_2Ti и Fe_2Ti–α-Fe(Ti) [9]. В настоящей работе количество титана закладывалось в шихту в пропорции, соответствующей насыщенному твердому раствору α-Fe(Ti). С учетом титанового покрытия при температурах, меньших температуры полиморфного превращения (882°C), система попадает в двухфазную область α-Fe(Ti)–Fe_2Ti. Нанесение дополнительного покрытия из ^{57}Fe было осуществлено нами с целью повышения эффективности применения методов мессбауэровской спектроскопии путем использования регистрации не только γ-квантов в геометрии на пропускание, которая дает информацию о состоянии мессбауэровских ядер во всем образце, но и регистрации конверсионных электронов в геометрии обратного рассеяния, которая позволяет получить информацию о поверхностном слое образца.

Характерные мессбауэровские спектры, отражающие кинетику фазообразования в исследуемых образцах приведены на рисунке 1. Вверху слева представлен мессбауэровский спектр сплава $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$ (подложка), прокатанного до толщины 13 мкм и подвергнутого гомогенезирующему отжигу; в центре приведены результаты обработки этого спектра методом восстановления функции распределения сверхтонких магнитных полей $p(H_n)$. Видно, что распределение магнитных полей $p(H_n)$ имеет трехмодальный вид, характерный для спектров твердых растворов замещения железа 3d-переходными металлами.

Спектр исходного образца хорошо описывается тремя зеемановскими секстетами, подобными спектру чистого железа, но отличающимися значениями эффективного магнитного поля. Как следует из литературных данных, например [21], секстет с максимальным значением поля H_o отвечает атомам железа, в первой координационной сфере которых нет атомов примеси. Спектры с H_1 и H_2 соответствуют атомам Fe, у которых среди ближайших соседей присутствуют, соответственно, один и два атома титана. Высокое качество спектра и его тщательная обработка позволили получить магнитные поля на ядрах железа с большой точностью: H_o = 331,4±0,2 кЭ, H_1 = 305,8±0,2 кЭ и H_2 = 274,4±1,7 кЭ. Следует заметить, что полученные нами значения магнитных полей заметно отличаются от полученных ранее в работах [21, 22].

После напыления титана по данным рентгенофазового анализа со стороны покрытия в образце присутствуют две фазы: твердый раствор на основе железа с постоянной решетки a = 2,8649±0,0008 Å и титан с параметрами решетки a = 2,9615±0,006 Å и c = 4,7031±0,005 Å. С обратной стороны образец представлен одной фазой твердого раствора замещения α-Fe(Ti).

Отжиг образца в течение 0,5 часа приводит к появлению на фоне секстетов от твердого раствора титана в железе интенсивной одиночной линии, которая с увеличением продолжительности отжига трансформируется в квадрупольный дублет. Изомерный сдвиг синглета относительно α-Fe отрицательный и не меняется во всем временном диапазоне отжигов.

Спектр конверсионных электронов на ранних стадиях отжига состоит лишь из одиночной линии с мессбауэровскими параметрами, как и в спектре на пропускание. Отсутствие в КЭМС-спектре секстета от α-Fe и присутствие одиночной линии указывает на то, что уже при 0,5 ч отжига все железо, находящееся на поверхности титанового покрытия, вступило в реакцию с титаном. В приповерхностном слое покрытия образовалась фаза с кубической симметрией, мессбауэровский спектр которой имеет изомерный сдвиг относительно α-Fe равный – 0,142±0,001 мм/с, что соответствует интерметаллиду FeTi. Образование соединения FeTi уверенно идентифицируется и с помощью рентгенофазового анализа (рисунок 2). Рентгеновские данные со стороны покрытия показывают, что образец содержит три фазы: твердый раствор на основе железа с параметром решетки, как и в исходном образце, интерметаллид FeTi и в малом количестве Fe_2Ti. Зарождение на ранних стадиях отжига интерметаллида, обогащенного титаном, на наш взгляд, возможно в том случае, когда диффузия атомов железа в слой покрытия осуществляется значительно быстрее и намного легче, чем диффузия титана в железо.

При изотермической диффузии между металлами и сплавами образуются, как правило, все промежуточные сплавы в той же последовательности, в какой они существуют на соответствующей диаграмме состояния при данной температуре. Важно, чтобы температура диффузии была достаточно высокой, а время – длительным, что должно обеспечить зарождение всех термодинамически устойчивых фаз на поверхности раздела слоистой системы.

Нам представляется следующая картина фазообразования в контактном слое и объеме слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,8 мкм) при термическом воздействии. В процессе отжига атомы Fe диффундируют в приповерхностную область чистого титана. Там, где их концентрация оказывается достаточной, образуется фаза FeTi, идентифицированная как мессбауэровской спектроскопией, так и рентгеновской дифрактометрией. Увеличение относительного содержания интерметаллидов при последующем отжиге (1,5 ч) указывает на то, что диффузионный поток идет в сторону покрытия и со стороны подложки. При увеличении времени отжига процесс диффузии продолжается (диффундируют атомы, не входящие в состав образовавшейся фазы). Учитывая то, что атомы железа слабо диффундирует в FeTi,

$D = 3{,}78 \cdot 10^{-16}$ см^2·с [23] (для сравнения: коэффициент взаимной диффузии Fe↔Ti $D = 1{,}54 \cdot 10^{-13}$ см^2·с [24]), на поверхности первичной фазы набирается достаточное количество атомов Fe, что приводит к преобразованию ее в более железообогащенную фазу – Fe_2Ti.

На месбауэровских спектрах (рисунок 1) и рентгенограммах (рисунок 2) отчетливо прослеживается кинетика зарождения и роста интерметаллоидных фаз. На рисунках 3 и 4 изображены зависимости относительных интенсивностей парциальных МС- и КЭМС-спектров для слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) от времени изотермического отжига. В предположении о близости значений вероятностей эффекта Мессбауэра на ядрах ^{57}Fe в α-Fe(Ti) и образующихся интерметаллидах эти относительные интенсивности равны относительному содержанию фаз в атомных единицах железа, а, следовательно, отражают зависимости от времени отжига фазового состава в объеме (МС-спектры) и в приповерхностном слое (КЭМС-спектры) слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм).

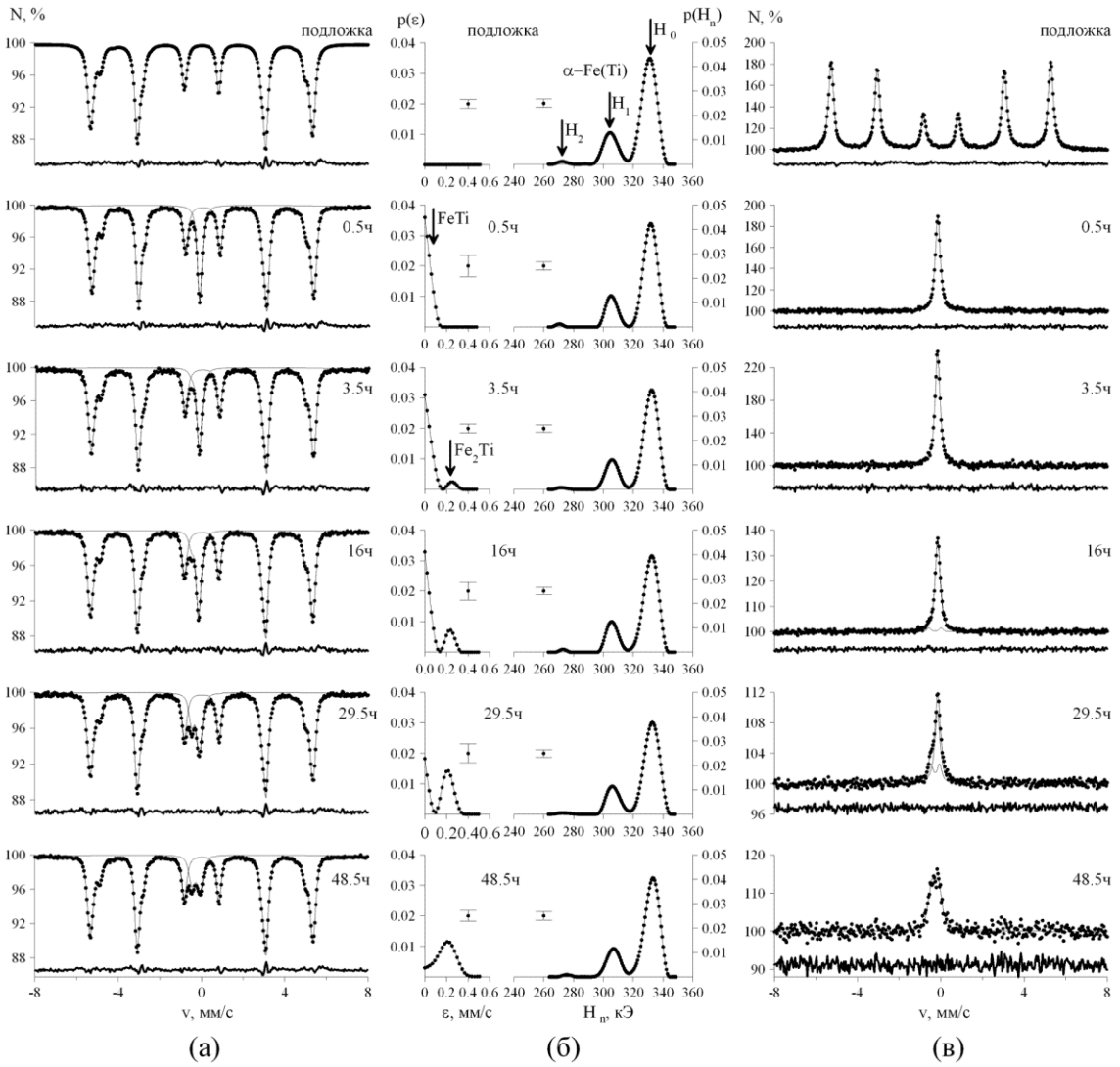


Рисунок 1. МС-спектры (а), функции распределения квадрупольного смещения $p(\varepsilon)$ и эффективного магнитного поля $p(H_n)$ для них (б) и КЭМС-спектры со стороны покрытия (в) слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) после изотермического отжига при T = 650°C

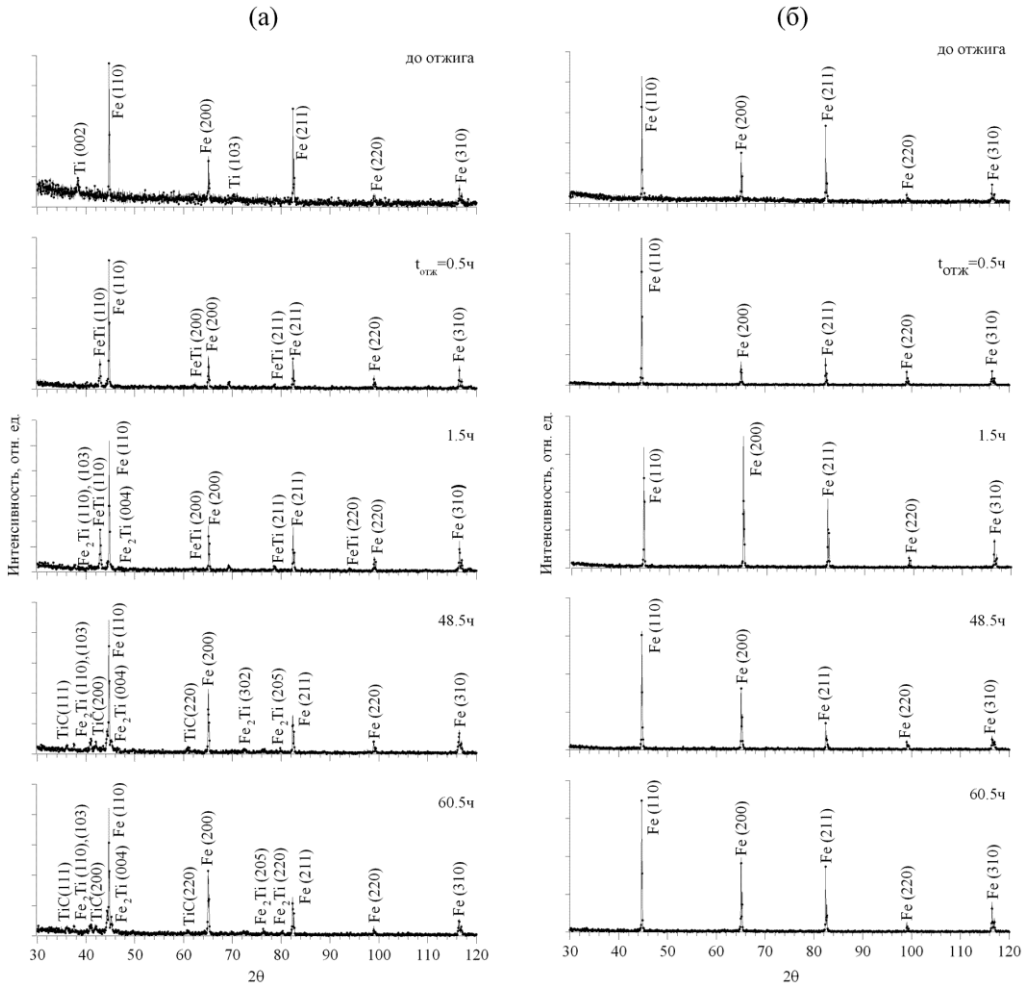


Рисунок 2. Рентгеновские дифрактограммы слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) после термического отжига при T = 650°C со стороны покрытия (а) и со стороны подложки (б)

На рисунках отчетливо видно, что состав интерметаллидных фаз в глубине образца существенно отличается от фазового состава приповерхностного слоя. Эти отличия могут служить индикатором физических процессов, происходящих в модифицированных слоях слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)- -Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм). На рисунке 3 видно, что зарождение интерметаллидной фазы Fe_2Ti в объеме образца начинается при 1,5 ч отжига и модифицированная область представлена двумя фазами: FeTi и Fe_2Ti. Однако конверсионный спектр вплоть до 7,5 ч отжига показывает наличие лишь интерметаллида FeTi. Из этого следует, что образование интерметаллида, обогащенного железом, связано с взаимной диффузией Fe↔Ti в контактном слое подложка-покрытие.

Известно, что диаграмма состояния системы Ti-Fe характеризуется значительной предельной растворимостью железа в β-Ti [3]. При температуре изотермического отжига T = 650°C, которая соответствует области эвтектоидного превращения, растворимость составляет ~16,6 ат.% Fe. При остывании образца до комнатной температуры образовавшаяся при температуре отжига метастабильная фаза β-Ti(Fe) эвтектоидно распадается на α-Fe(Ti) и интерметаллид Fe_2Ti. Зарождение интерметаллида Fe_2Ti в приповерхностном слое по данным КЭМС (рисунок 4) наблюдается при времени отжига $t_{отж}$ = 16 ч. Это указывает на то, что диффузионный поток со стороны подложки достигает приповерхностного слоя покрытия, и с этого момента начинается резкое изменение относительных содержаний интерметаллидных фаз в приповерхностных слоях покрытия. В двухфазных областях системы величина диффузии резко уменьшается (коэффициент диффузии Fe→Fe_2Ti равен $1{,}98\cdot10^{-17}$ см^2·с [23]), а энергия активации возрастает с увеличением содержания фазы Fe_2Ti. Процесс фазообразования практически прекращается.

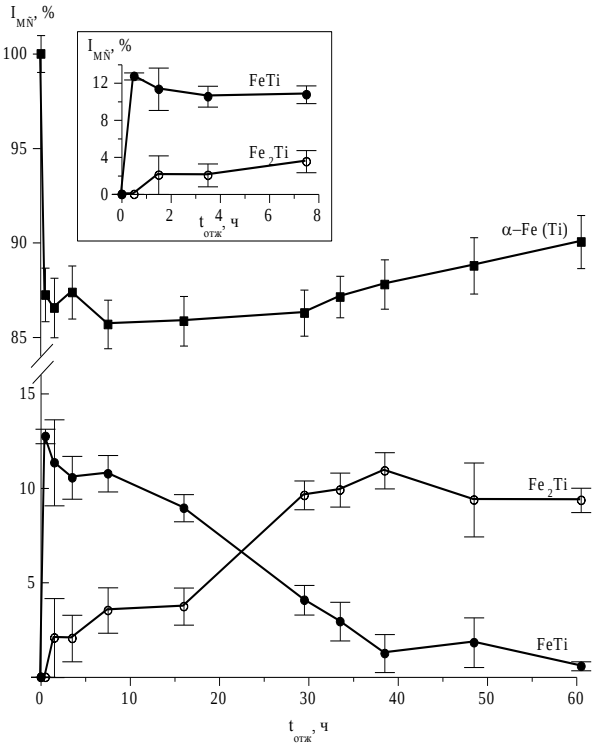


Рисунок 3. Зависимости относительных интенсивностей парциальных МС-спектров для слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) от времени изотермического отжига

На рисунке 2(б) приведены рентгеновские дифрактограммы образца со стороны подложки. Видно, что как до, так и после отжигов образец представлен твердым раствором α-Fe(Ti) с параметром решетки a = 2,8647±0,0003 Å. Следовательно, элементный и химический состав подложки во всем диапазоне отжигов (по крайней мере, на глубину анализа 4-5 мкм) остается постоянным. Концентрация титана в сплаве (рисунок 5) не меняется.

На рисунке 6 приведены относительные интенсивности дифракционных рефлексов образующихся фаз в слоистой системе $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) в зависимости от времени изотермического отжига. Видно, что при времени отжига $t_{отж}$ = 0,5 ч рентгеновская дифрактометрия обнаруживает наличие в небольшом количестве твердого раствора на основе титана α-Ti(Fe). Это находится в соответствии с диаграммой состояния системы Fe-Ti, согласно которой, в богатом титаном сплаве образуется эвтектика FeTi–α-Ti(Fe). Увеличение времени отжига до 30 ч приводит к уменьшению относительного содержания FeTi и к полному распаду α-Ti(Fe).

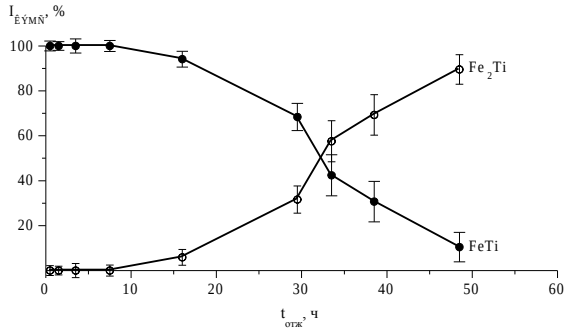


Рисунок 4. Зависимости относительных интенсивностей парциальных КЭМС-спектров для слоистой системы $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) от времени изотермического отжига

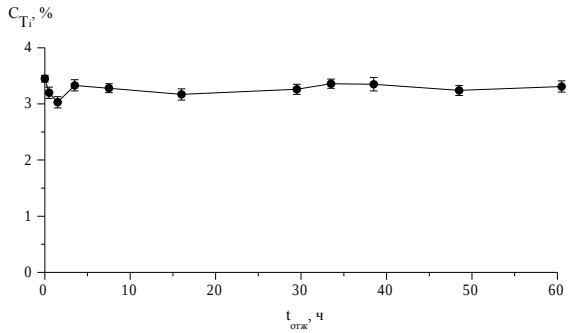


Рисунок 5. Зависимость концентрации титана в растворе α-Fe(Ti) от времени изотермического отжига по данным по данным мессбауэровской спектроскопии

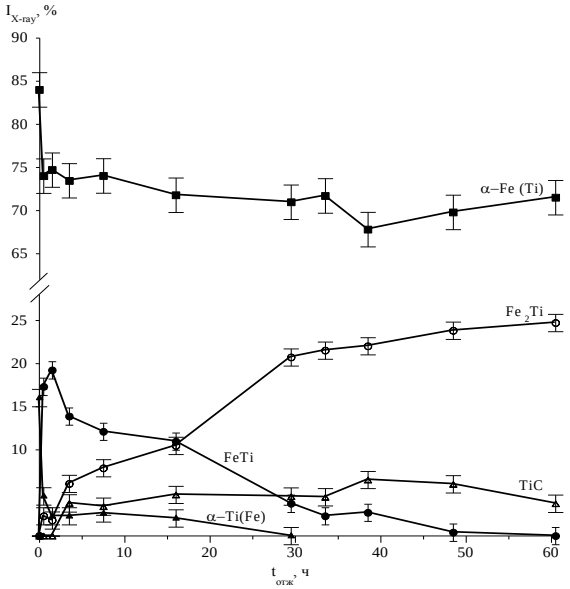


Рисунок 6. Относительные интенсивности дифракционных рефлексов образующихся фаз в системе $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) в зависимости от времени изотермического отжига

На дифрактограммах обращает на себя внимание наличие и устойчивое сохранение во всем временном диапазоне отжигов рефлексов от карбида титана. Известно, что титан при взаимодействии с углеродом образует тугоплавкое и устойчивое соединение – карбид титана TiC [1]. Учитывая то, что в вакуумной системе присутствует давление остаточных газов, а титан является хорошим геттером и сильным карбидообразователем, на начальных стадиях отжига происходит образование термически стабильной карбидной пленки TiC на поверхности образца. При дальнейшем отжиге скорость потока углерода ослабевает, что связано с затруднением диффузии углерода через образовавшийся слой, а относительное содержание карбидной фазы остается практически постоянным.

На последнем этапе отжигов ($t_{отж}$ = 60,5 ч) как мессбауэровская спектроскопия, так и рентгеновская дифрактометрия уверенно обнаруживают интерметаллид Fe_2Ti и твердый раствор α-Fe(Ti). Приповерхностный слой образца со стороны покрытия представлен лишь интерметаллидом, а со стороны подложки – твердым раствором α-Fe(Ti) (рисунок 7).

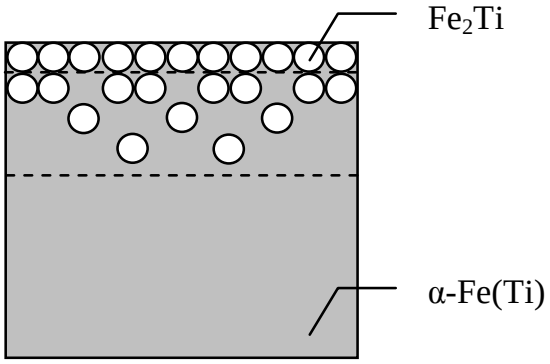


Рисунок 7. Схематическое изображение распределения фаз по глубине образца в слоистой системе $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) после отжига в течение 60,5 ч при T = 650 °C

Выводы

1. Методами мессбауэровской спектроскопии и рентгенофазового анализа установлены относительное содержание образующихся фаз и последовательность фазовых превращений в системе $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,08 мкм) после изотермического отжига при T = 650°C.
2. Отжиг образца в течение 0,5 ч приводит к полному растворению напыленного слоя железа в титановом покрытии с образованием интерметаллида FeTi. Увеличение времени отжига приводит к образованию на границе сплава с покрытием интерметаллида Fe_2Ti, относительное содержание которого постепенно увеличивается, продвигаясь к поверхностному слою образца. При времени отжига $t_{отж} \geq 50$ ч наблюдается термическая стабилизация неоднородного по глубине структурно-фазового состояния исследованной слоистой системы. При этом образец со стороны покрытия представлен в основном интерметаллидом Fe_2Ti, а со стороны подложки раствором α-Fe(Ti) с предельной концентрацией Ti.
3. Установлено, что концентрация титана в твердом растворе α-Fe(Ti) остается постоянной по всему образцу, в том числе и в области фазовых превращений, во всем интервале изотермического отжига.
4. Установлено, что появление одного атома титана в ближайшем окружении атома железа уменьшает эффективное магнитное поле в области расположения ядра ^{57}Fe на ~24 кЭ.

Работа выполнена при частичной поддержке МНТЦ (проект № К-1198).

Литература

1. Корнилов, И. И. Титан / И.И. Корнилов. - М.: Наука, 1975. - 310 с.
2. Khatamian, D. Mössbauer Spectroscopy of activated FeTi / D. Khatamian, F. D. Manchester // Surface Sci. - 1985. - Vol. 159. - P. 2-3, 381-392.
3. Вол, А. Е. Строение и свойства двойных металлических систем / А. Е. Вол. - М.: Госиздат физ.-мат. литературы, 1962. - Т.2, 984 с.
4. Титановые сплавы: сб. ст. / Отв. ред. Б. А. Галицкий. – М.: Наука, 1968. – 340 с.
5. Баулин, Л. В. Особенности фазовой перекристаллизации титана и его сплавов при скоростном нагреве / Л. В. Баулин, А. М. Смирнов // МиТОМ, 1993. - №2. - С. 33-36.
6. Хансен, М. Структура двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. - М.: Металлургиздат, 1962. - Т. 1, 608 с.
7. Борискина, Н. Г. Изучение растворимости Fe, Mn и Cu в α-Ti / Н. Г. Борискина, К. П. Мясникова // Титан и его сплавы. АН СССР. - 1962. - Вып.7. - С. 61-67.
8. Коллингз, Е. В. Физическое металловедение титановых сплавов / Е. В. Коллингз. - М.: Металлургия, 1988. - 222 с.
9. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник / Отв. ред. Н. П. Лякишев. - М.: Машиностроение, 1997. - Т.2, 569 с.
10. Wertheim, G. Model for the composition-dependent ferromagnetic to antiferromagnetic transition in Fe_2Ti / G. Wertheim, J.Wernick, R Sherwood // J. Appl. Phys. - 1970. - Vol.41, №3. - P. 1325-1326.

11. Sumiyama, K. Metastable $Fe_{1-x}Ti_x$ alloys produced by vapor quenching / K. Sumiyama, H. Ezava, Y. Nakamura // Phys. Stat. Sol. (a). - 1986. - Vol. 93, №1. - P. 81-86.
12. Stupel, M. Formation of the ω-phase during the aging of βTi (7.1 wt pct Fe) – Mossbauer study / M. Stupel, M. Ron, Z. Weiss // Metallurgical Transactions A. - 1978. - Vol. 9A. - P. 249-252
13. Harada, H. Mossbauer study of Fe-Ti alloys formed at interfaces between Fe and Ti thin films / H. Harada, S. Ishibe, R. Konishi, H. Sasakura // Jap. J. of Appl. Phys. - 1985. - Vol. 24, №9. - P. 1141-1144.
14. Фазовые превращения в имплантированных системах металл-металлоид / А. К. Жетбаев, К. К. Кадыржанов, Т. Э. Туркебаев, В. С. Русаков, М. Ш. Айманов. - Алматы: Гылым, 1995. - 178 с.
15. Mossbauer study of thin iron film beryllization / K. K. Kadyrzhanov, V. S. Rusakov, T. E. Turkebaev, M. F. Vereshchak, E. A. Kerimov, D. A. Plaksin // Hyperfine Interactions.- 2002. - №00. - P. 1-5.
16. Кадыржанов К.К. Мёссбауэровские исследования фазообразования в слоистых системах железо-бериллий / К.К. Кадыржанов, Э.А. Керимов, Д.А. Плаксин, В.С. Русаков, Т.Э. Туркебаев // Поверхность, 2003. - №8. - С.74-78.
17. Исследование взаимодействия титана с железом при последовательных изохронных отжигах / К.К. Кадыржанов, М. Ф. Верещак, И. А. Манакова, В. С. Русаков, Л. С. Сергеева, Т. Э. Туркебаев, В. И. Яскевич // Материалы 4-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 15—17 сентября 2003. - Казахстан, Алматы, 2003. - Т. 2. - С. 182-189.
18. Исследование термически индуцированных процессов в слоистых системах на основе железа и титана / И. А. Манакова, Л. С. Сергеева, М. Ф. Верещак, В. С. Русаков, В. И. Антонюк, В. Н. Лисицин, К. К. Кадыржанов // Тезисы докладов IX Международной конференции “Мессбауэровская спектроскопия и ее применения” (21-25 июня 2004г., Екатеринбург). - Екатеринбург, 2004. - С.66.
19. Русаков, В.С. Мёссбауэровская спектроскопия локально неоднородных систем / В. С. Русаков. - Алматы, 2000. - 431 с. - ISBN 9965-9111-2-6.
20. Русаков, В.С. Восстановление функций распределения сверхтонких параметров мессбауэровских спектров локально неоднородных систем / В.С. Русаков // Известия РАН. Серия физическая. - 1999. - Т. 63, №7. - С. 1389-1396.
21. Vincze, I. Mossbauer measurements in iron based alloys with transition metals / I. Vincze, A. Campbell // J. Phys. F: Metall Phys. - 1973. - Vol. 3. - P. 647-663.
22. Литвинов, В. С. Ядерная гамма-резонансная спектроскопия / В. С. Литвинов, С. Д. Каракишев, В. В. Овчинников. - М.: Металлургия, 1982. - 144 с.
23. Шиняев, А. Я. Диффузия железа в сплавах системы Fe-Ti / А. Я. Шиняев // Известия АН СССР, Металлы. - 1971. - .№4. - С. 263-267.
24. Ефименко, Л. П. Кинетика взаимодействия в системе Fe-Ti при температурах 1050-1250°С / Л. П. Ефименко, Л. П. Петрова, И. Г. Полякова // Известия АН СССР, Металлы. - 1997. - №4. - С. 168-173.

ТИТАН ЖАБЫНДЫЛЫ FE-TI ҚОРЫТПА БЕТІНДЕГІ ФАЗАЛАР ҚАЛЫПТАСУ КИНЕТИКАСЫН ЗЕРТТЕУ

[1)]Сергеева Л.С., [1)]Верещак М.Ф., [1)]Манакова И.А., [1)]Антонюк В.И., [2)]Русаков В.С., [1)]Қадыржанов Қ.К.

[1)]ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2)]М.В. Ломоносов атындағы ММУ, Мәскеу, Ресей

Мессбауэрлік спектроскопия және рентгендік талдау әдістерімен $T=650^0$ С – да изотермдік күйдіруден кейінгі қабатты $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1 мкм)-^{57}Fe(0,8 мкм) жүйесі зерттелген. Зерттелген жүйеде фазалық түрленулер тізбегі анықталған. $t \geq 50$ сағат күйдіру кезінде $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 мкм)-Ti(1мкм)-^{57}Fe(0,8 мкм) жүйесінің тереңдігі бойынша біркелкі емес құрылым-фазалық күйінің термиялық тұрақталуы байқалады. α-Fe (Ti) қатты ертіндісінде барлық үлгілер бойынша, оған қоса және фазалық түрленулер аймағында, барлық изотермдік күйдіру аралығында титан концентрациясының тұрақты болып қалатыны көрсетілген. Пайда болған фазалар мен үлгінің көлемі мен бетке жақын қабатындағы титан концентрациясының салыстырмалы қарқындылығының күйдіру ұзақтығынан тәуелділігі алынған.

STUDY OF KINETICS FOR PHASE FORMATION ON THE SURFACE OF FE-TI ALLOY WITH TITANIUM COATING

[1)]L.S. Sergeyeva, M.F. [1)]Vereshchak, [1)]I.A. Manakova, [1)]V.I. Antonyuk, [2)]V.S. Rusakov, [1)]К.К. Kadyrzhanov

[1)]Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan
[2)]M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

Lamellar system $Fe_{0,966}Ti_{0,034}$(13 mkm)-Ti(1 mkm)-^{57}Fe(0,8 mkm) after isothermal annealing at T = 650°C was investigated by method of Mossbauer spectroscopy and X-ray phase analysis. The sequence of phase transformations and kinetics were determined. The thermal stabilization of spatially heterogeneous phase-structural state of the lamellar systems at annealing time $t_{ann} \geq 50$ h exists. The dependences of relative intensities of Mossbauer subspectra and X-ray diffraction lines for formed phases, as well as titanium concentration in volume and near-surface layer of the sample from duration of the annealing were obtained.

УДК 669.715:620.18:539.2:621.385.833

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Полтавцева В.П., Ермаков Е.Л., Кислицин С.Б.

Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Методами оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа выявлена роль температуры и напряжений в изменении структурно-фазового состояния алюминиевого сплава Д16, испытанного на одноосное растяжение при 110, 150 и 170^{0}С до стадии разрушения.

ВВЕДЕНИЕ

В результате фрактографических исследований изломов конструкционных материалов обнаружено изменение характера разрушения от вязкого к хрупко-вязкому или хрупкому [1]. Установлено, что смена механизма разрушения существенно зависит от структурно-фазового состояния сталей и сплавов. В этой связи алюминиевый сплав Д16 является хорошим модельным материалом, так как его структурно-фазовое состояние кардинально изменяется в зависимости от условий предварительной термомеханической обработки.

Механические свойства алюминиевого сплава Д16 в значительной степени изменяются при термической обработке, благодаря склонности к распаду пересыщенного твердого раствора и выделению упрочняющих фаз – зон Гинье – Престона и Al_2CuMg (S) [2-4]. Под действием приложенного напряжения происходит зарождение зон Гинье – Престона на дислокациях, что приводит к дополнительному увеличению прочностных свойств [5]. Однако эти процессы способны внести дополнительный вклад в общее снижение пластичности при эксплуатации при комнатной температуре в условиях интенсивных динамических нагрузок [6]. Высокий уровень прочностных и коррозионных свойств также достигается в условиях циклических теплосмен, когда реализуется зонная стадия распада твердого раствора сплава Д16 и одновременно изменяется дислокационная структура [7,8], закалки и старения при нагреве до температур, при которых образуется основная упрочняющая S-фаза [9,10], комбинации механико-термической обработки и закалки [11], различных внешних воздействий [12].

В отношении микроструктуры сплав Д16 характеризуется сложным фазовым составом из-за содержания железа и кремния, сопутствующими алюминию, и введения марганца для нейтрализации вредного влияния железа и повышения прочности и коррозионных свойств[4]. Эти примеси существенно не влияют на ход фазовых превращений, и структура описывается тройной диаграммой системы Al – Cu – Mg. Установлено [13], что причиной разрушения сплава Д16 при высоких температурах в подавляющем большинстве случаев является образование трещин на границах зерен или на стыке трех зерен, где присутствуют хрупкие фазы типа Al – Fe – Si или Al – Fe - Mn. Введение никеля позволяет в некоторой степени нейтрализовать вредное воздействие Fe – Si за счет образования растворимой никельсодержащей фазы и повысить жаропрочность сплава.

Анализ крайне ограниченного количества литературных источников показал, что практически не изучены многие аспекты распада твердого раствора алюминиевого сплава Д16, в частности одновременного влияния температуры и напряжений, длительности их воздействия, влияние выделений упрочняющих и нерастворимых фаз на структуру вблизи зоны разрушения и т.д. В настоящей работе представлены результаты исследований структурно-фазовых изменений после различных обработок с целью выявления влияния ТМО на процессы разрушения в условиях кратковременных механических испытаний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследований изготавливали в виде лопаточек с размерами рабочей части 20×4,5×1 мм^3 из лент промышленного алюминиевого сплава Д16. По данным РФА состав сплава Д16, в вес.%: Al – 92,51; Cu – 4,67; Mg – 1,51; Mn – 0,42; Fe – 0,33; Si – 0,56. Перед исследованиями образцы обрабатывали на гомогенный твердый раствор при 500^{0}С в течение 1 ч с последующей закалкой в воде комнатной температуры. Шлифы для структурных исследований приготавливали по стандартной технологии с помощью механической шлифовки и полировки на шкурках с различным размером зерна и сукне с добавкой пасты ГОИ. Для выявления структуры сплава Д16 использовали травитель следующего состава: плавиковая кислота 10 мл, соляная кислота 15 мл, дистиллированная вода 90 мл. Время травления при комнатной температуре 1-3 с.

Кратковременные механические испытания на одноосное растяжение закаленных образцов сплава Д16 проводили при температурах 110, 150 и 170°С до стадии разрушения. Выбор температур испытания определялся следующими соображениями: 110°С из интервала температур, когда могут появиться структуры, характерные для естественного и искусственного ста-

рения [3]; 150°С – минимальная температурная граница искусственного старения [3]; 170°С – температура режима старения на максимальную прочность [14]. Сразу после окончания испытаний охлаждение образцов протекало на воздухе комнатной температуры. Структуру испытанных при различных температурах образцов исследовали методами оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа с использованием микроскопов Olympus GX-71 и JEOL SUPERPROBE 733 и дифрактометра D8 ADVANCE на трех участках образца: в области захвата, для которого характерно наличие концентраторов напряжения, между захватом и разрушением, где действуют растягивающие напряжения, и вблизи зоны разрушения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние температуры на структуру сплава Д16

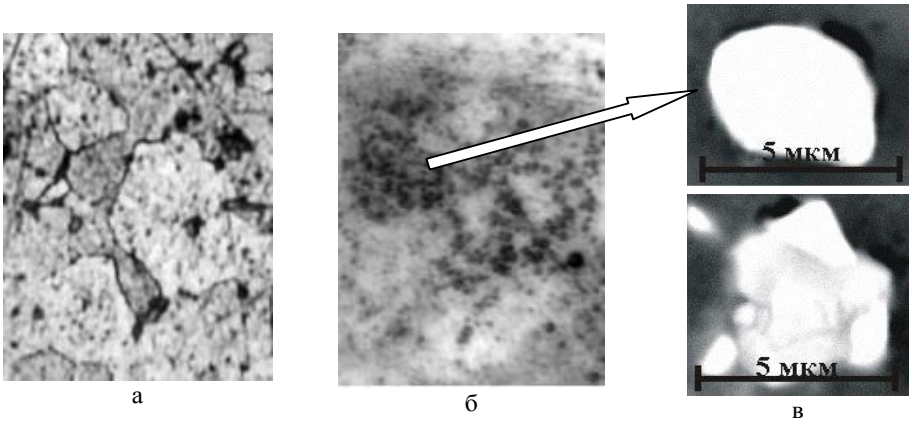
Для микроструктуры закаленного сплава Д16, приведенной на рисунке 1,а, характерна полиэдрическая структура твердого раствора с избирательным окрашиванием зерен и темными включениями в виде мелких точек, более крупных точек или прослоек на стыках границ зерен. Обнаруженный эффект избирательного окрашивания зерен, как известно [4], является металлографическим признаком естественного старения, т.е. свидетельствует о протекании в твердом растворе сплава Д16 во время закалки/выдержки при комнатной температуре диффузионных процессов, сопровождающихся образованием зон, обогащенных атомами меди и магния (зон Гинье-Престона).

Проведенные рентгеноструктурные исследования закаленного образца сплава Д16 подтвердили присутствие твердого раствора на основе алюминия с текстурой по плоскости (200) и очень малого, чуть выше порога чувствительности метода, количества соединения, состав которого близок к $Al_7(Fe,Mn)Cu_2$ с тетрагональной кристаллической решеткой. Наличие текстуры, согласно [4], является рентгеноструктурным признаком повышенной концентрации атомов меди и магния в плоскости (200). Следовательно, на основе полученных обоими методами результатов можно сделать вывод о том, что исследуемый образец промышленного алюминиевого сплава Д16 после термообработки и последующей закалки находится в частично естественно состаренном состоянии и состоит, по крайней мере, из трех фаз: твердый раствор с ГЦК решеткой, соединение $Al_7(Fe,Mn)Cu_2$ и зоны Гинье-Престона.

С целью выявления влияния температуры на структурно-фазовое состояние алюминиевого сплава Д16 были проведены исследования естественно состаренного образца после отжига при 110°С в течение 10 мин. Микроструктура данного образца приведена на рисунке 1,б. Характерной особенностью микроструктуры отожженного образца сплава Д16 является появление большого количества мелких (≤ 7 мкм) бело-серых выделений, окруженных темными прослойками. При больших увеличениях, достижимых в растровом электронном микроскопе, эти выделения, как видно из рисунка 1,в, представляют собой либо отдельные светлые частицы размером от 0,3 до 6 мкм, либо скопления из нескольких светлых частиц, разделенных серо-черными прослойками. По данным микрорентгеноспектрального анализа, элементный состав (вес.%) в области крупного светлого выделения соответствует Al - 25,5Cu – 0,3Mg – 7,8Fe – 1,5Mn – 0,6Ni, скопления светлых частиц – Al - 6,9Cu – 13,4Fe – 7,9Mn – 4,7Si, твердого раствора – Al – 3,6Cu – 1,0Mg – 0,2Mn.

На основе полученных с помощью микроскопии результатов можно сделать вывод, что зарождение выделений происходит вблизи выделений темной фазы в процессе нагрева до 110^0С естественно состаренного алюминиевого сплава Д16. Состав светлых выделений состоит, по-видимому, из двух соединений, близких к $Cu(Fe,Mn)Al_2$ и $Cu(Fe,Mn)Al_2Mg$, тогда как находящихся в комплексе – из $Al_2(Fe,Mn,Si)Cu$, т.е. θ – и S – фаз, обогащенных атомами примесей.

В количественном отношении концентрация выделившихся в результате отжига при 110^0С выделений не превышает порога чувствительности рентгеноструктурного анализа. Следует подчеркнуть также, что после отжига на соответствующей дифрактограмме отсутствуют обнаруженные ранее для естественно состаренного сплава Д16 слабые рентгеновские линии отражения, принадлежащие соединению, близкому по составу к $Al_7(Fe,Mn)Cu_2$. Однако текстура по плоскости (200) твердого раствора отожженного сплава Д16 возрастает: степень текстурированности, определенная как отношение интенсивностей рентгеновских линий с индексами (200) и (111), увеличивается в ~1,6 раз. При этом также увеличиваются параметр решетки (с 0,40464 до 0,40494 нм) и незначительно размер кристаллитов (с 11,6 до 13,8 мкм). Отмеченные факты хорошо коррелируют с выше приведенными металлографическими данными.



а б в

Увеличение х 480 (а) и х 2660 (б)

Рисунок 1. Микроструктура алюминиевого сплава Д16: а–после закалки. б – после закалки и отжига при 110℃. в – РЭМ – снимки выделений в виде отдельной или скопления нескольких светлых частиц

Влияние напряжений на структуру сплава Д16

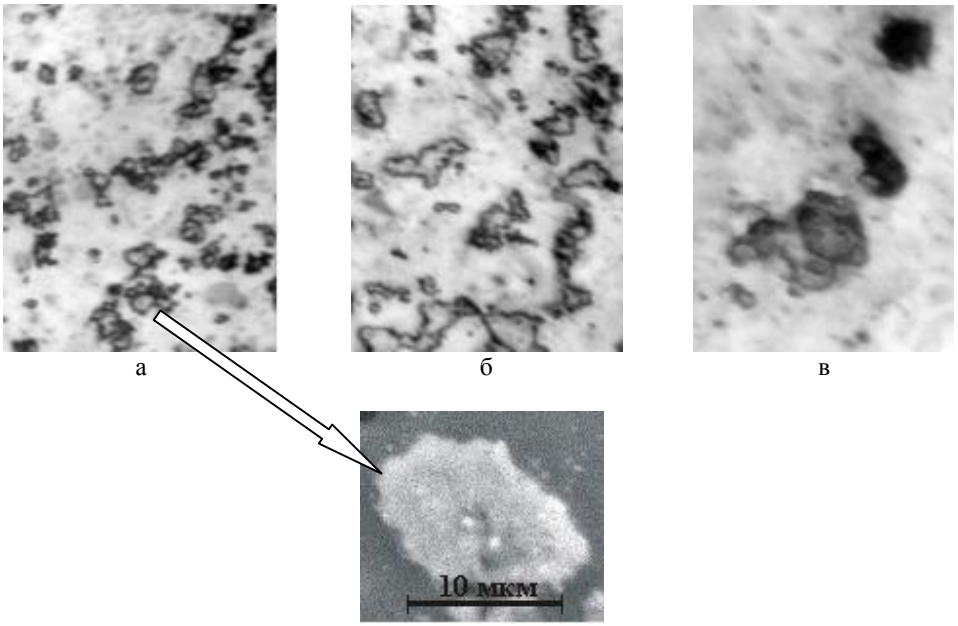
Температура испытания 110℃

Результаты исследования микроструктуры естественно состаренного сплава Д16 после механических испытаний при 110°С приведены на рисунке 2. Как и в случае отжига при 110°С, в микроструктуре всех участков образца видны светло-серые выделения. Однако их размер существенно больше, а количество меньше. Причем эти параметры в значительной степени зависят от области исследования вдоль направления приложения внешнего напряжения.

Так, в области действия концентраторов напряжений скопления светло-серых выделений размером от 1,5 до 8,5 мкм с максимумом при 2-3 мкм и плотностью 0,09 част./м^2 наблюдаются в основном в виде цепочек длиной 25-45 и около 100 мкм, которые не имеют преимущественного направления, реже отдельных более крупных частиц (рисунок 2,а). Выделения темного цвета значительно мельче по сравнению со светло-серыми выделениями, и их гораздо меньше. Они расположены в основном в виде точечных цепочек, а также более крупных частичек или прослоек вблизи цепочек светло-серых выделений. Тогда как в микроструктуре сплава Д16 в области действия растягивающих напряжений превалирует приблизительно равномерное распределение округлых светло-серых выделений в виде цепочек длиной в среднем 35 мкм или состоящих из 2-3 частиц (рисунок 2,б). В отличие от микроструктуры области действия концентраторов напряжений плотность светло-серых выделений в ~2 раза меньше, при этом количество частиц размером ≥8,5 мкм больше также в ~2 раза. Что касается области образца вблизи зоны разрушения, то в результате кратковременных испытаний при 110°С до стадии разрушения в микроструктуре на фоне отдельных темных точек и точечных цепочек видны скопления мелких (3,5-5 мкм) светло-серых выделений или состоящих из двух-трех разделенных темной фазой выделений большого размера общей плотностью 0,006 част./м^2 (рисунок 2,в).

РЭМ - исследование испытанного при 110°С образца естественно состаренного сплава Д16 показало, что в отличие от отожженного при 110°С в результате совместного действия температуры и концентраторов напряжения, во-первых, происходит измельчение (≤1 мкм) светлых частичек и соответственно увеличение их количества (рисунок 2,г). Во-вторых, светлые выделения наблюдаются в виде вкраплений в крупных (~10 мкм) серых выделениях. Элементный состав данных выделений близок к составу светло-серых выделений, наблюдаемых в микроструктуре естественно состаренного сплава Д16 после нагрева до 110°С, но обеднен атомами железа и особенно атомами марганца и кремния. При этом элементный состав твердого раствора практически не изменяется.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, после механических испытаний при 110°С фазовый состав сплава Д16 не изменяется: – на дифрактограмме наблюдаются рентгеновские линии отражения, принадлежащие твердому раствору на основе алюминия. При этом, однако, действие концентраторов напряжений приводит к уменьшению параметра решетки (с 0,40494 до 0,40475 нм), степени текстурированности (в 1,3 раза) и особенно размера кристаллитов (в 2,3 раза). Действие растягивающих напряжений также приводит к уменьшению параметра решетки и размера кристаллитов, но в большей степени, чем концентраторы напряжений, и незначительному увеличению степени текстурированности. Полученные с помощью рентгеноструктурного анализа результаты косвенно подтверждают обнаруженные с помощью оптического и растрового электронного микроскопов факты измельчения и изменения состава выделений. Увеличение степени текстурированности в результате действия растягивающих напряжений, по-видимому, связано с ростом доли выделений с большим размером, чем в случае действия концентраторов напряжений.



а, б, в - увеличение х 588

Рисунок 2. Микроструктура алюминиевого сплава Д16 после испытаний при 110℃: а–область действия концентраторов напряжений. б –область действия растягивающих напряжений. в – область вблизи зоны разрушения. г - РЭМ – снимок светло-серого выделения

Температура испытания 150℃

С повышением температуры кратковременных механических испытаний до 150°С в микроструктуре области действия концентраторов напряжений плотность светло-серых более крупных (от 5 до 15 мкм) выделений уменьшается в ~30 раз. Плотность темных выделений также значительно меньше, а их размер больше – встречаются отдельные частички размером 3-12 мкм. В случае же действия растягивающих напряжений наблюдаются в основном скопления мелких (~3 мкм) светло-серых частиц, окруженных прослойками темных выделений, и редкие отдельные светло-серые частицы размером от 6 до 10 мкм. Темные выделения в виде точек или отдельных частичек размером от 1,5 до 5 мкм. Тогда как для области вблизи зоны разрушения характерно больше отдельных мелких светло-серых и темных выделений, реже в виде двух крупных светло-серых частиц, разделенных темной фазой. Следует отметить незначительное увеличение количества темной фазы по сравнению с областями действия концентраторов напряжения и растягивающих напряжений, а также зоной разрушения после более низкотемпературного испытания.

Повышение температуры испытаний до 150°С, согласно данным рентгеноструктурного анализа, проявляется в области действия концентраторов напряжений в наибольшем обогащении атомами меди и магния по плоскости (200), наличии крупных кристаллитов, как и после отжига при 110°С, и низком значении параметра решетки, характерном для естественно состаренного сплава Д16. Уменьшение степени текстурированности и размера кристаллитов и соответственно увеличение параметра решетки для области действия растягивающих напряжений по сравнению с действием концентраторов напряжений являются отражением отмеченного выше процесса измельчения наблюдаемых в оптический микроскоп выделений.

Температура испытания 170℃

Металлографические исследования сплава Д16 в области действия концентратов напряжения показали, что при самой высокой температуре механических испытаний происходит процесс измельчения светло-серых выделений до размеров, характерных для самой низкой температуры испытаний, и соответственно возрастает (в 6 раз) их плотность. В микроструктуре области действия растягивающих напряжений после испытаний при данной температуре обнаружено проявление зеренной структуры с избирательным окрашиванием зерен, как и для естественно состаренного сплава Д16, но в меньшей степени. Плотность светло-серых выделений выше в ~6 раз, чем в области действия концентраторов напряжений, тогда как диапазон размеров расширяется (от 3,5 до 7 мкм). Доля темной фазы наоборот, меньше, и она располагается в основном около светло-серых выделений или в виде редких отдельных частичек. Вблизи зоны разрушения размер светло-серых и темных выделений значительно меньше, а их плотность соответственно выше по сравнению с низкими температурами.

Согласно рентгеноструктурным исследованиям, обогащение атомами меди и магния по плоскости

(200) после испытаний при 170^0С слегка выше в области действия концентраторов напряжений и значительно ниже в области действия растягивающих напряжений, чем для естественно состаренного сплава Д16, в микроструктуре которого, напомним, отсутствуют светло-серые выделения. Значения размера кристаллитов и параметра решетки хорошо коррелируют с полученными металлографически размерами выделений обеих фаз и их плотностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения методами оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа исследований структурно-фазовых изменений в частично состаренном алюминиевом сплаве Д16 после механических испытаний на одноосное растяжение до стадии разрушения при различных температурах установлено, что:

- образование светлых ($Cu(Fe,Mn)Al_2$) и серых ($Al_2(Fe,Mn,Si)Cu$) выделений происходит в результате нагрева естественно состаренного промышленного сплава Д16 до температуры 110°С;
- действие концентраторов напряжений при 110°С приводит к измельчению светлых выделений и обеднению светло-серых выделений атомами железа и особенно атомами марганца и кремния;
- размер и количество светло-серых выделений существенно зависит от вида создаваемых при испытании на одноосное растяжение напряжений вдоль направления приложенного напряжения и температуры испытания. Отмечено повышение количества темной фазы вблизи зоны разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков, Е. Л. Изучение поверхности разрушения конструкционных облученных аустенитных сталей / Е. Л. Ермаков, С. Б. Кислицин, О. В. Тиванова // Радиационная физика твердого тела: докл. XVI Междунар. совещ., Севастополь, Украина, 3 - 8 июля 2006. – М: ГНУ «НИИ ПМТ», 2006. – С. 75 - 83.
2. Чуистов, К. В. Старение металлических сплавов / К. В. Чуистов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 232 с.
3. Лившиц, Б. Г. Металлография. / Б. Г. Лившиц. – М: Металлургия, 1990. - 236 с.
4. Мальцев, М. В. Металлография цветных металлов и сплавов. / М. В. Мальцев, Т. А. Барсукова, Ф. А. Борин. – М: ГНТИ Черная и цветная металлургия, 1960. - 372 с.
5. Гайдученя, В. Ф. Поведение сплавов Д16 и В95 при динамическом старении / В. Ф. Гайдученя, А. М. Шнеберг // Металлы. - 1991. - № 6. – С. 107 – 111.
6. Аржавин, В.М. Временные эффекты внутреннего трения в дуралюмине Д16АТ / В. М. Аржавин // Физика и хим. обраб. матер. - 2006. - № 4. – С. 73 - 76.
7. Тофпенец, Р.Л. Старение сплава Д16 в условиях циклических теплосмен / Р. Л. Тофпенец, А. Г. Анисимович // Весці АН БССР. Сер. Фіз.-тэхн. н. - 1990. - № 3. - С. 12 - 14.
8. Муратова, В.С. Прогрессивные режимы термической обработки алюминиевых сплавов / В. С. Муратова // Обработка и применение новых конструкционных материалов: сб. ст. – Куйбышев, 1987. – С. 31 - 35.
9. А.С. 1463798 СССР “МКИ” С 22 F 1/057. Способ термической обработки алюминиевых сплавов системы алюминий - медь – магний – марганец / Р. Л. Тофпенец [и др.] (СССР). - №4253060/31-02; заявлено 06.04.87; опубл. 07.03.89; Бюл. №9 – 2 с.
10. Stippel, Susana. Mikroharte als Untersuchungsmethode von Auslagerungszuständen in Duraluminium / Susana Stippel, Viktor Gröger, Ferdinand Stangler. // Frakt. Metallogr. - 1989. – Vol. 26, – № 5. – P. 241-247.
11. Крючков, Н.К. Упрочнение дуралюмина путем поверхностной многократной механико-термической обработки / Н. К. Крючков // Обработка и применение новых конструкционных материалов: сб. ст. – Куйбышев, 1987. – С. 35 - 39.
12. Смыслов, Е.Ф. Структура и твердость алюминиевого сплава Д16АТ при взрывном и лазерном воздействии / Е. Ф Смыслов, Е. П. Смыслова // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: тез. докл. конф., Куйбышев, 27 - 29 июня 1989 г. - Куйбышев, 1989. – С. 287 - 288.
13. Жуков, В.Д. Механизм влияния никеля на жаропрочность алюминиевых сплавов / В. Д. Жуков, С. В. Жуков // Физика прочности и пластичности металлов и сплавов: тез. докл. конф., Куйбышев, 27 - 29 июня 1989 г. – Куйбышев, 1989. – С. 349 - 350.
14. Эскин, Д.Г. Влияние состава пересыщенного твердого раствора на структуру и дисперсионное твердение сплавов Al – Cu – Mg – Si / Д. Г. Эскин [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. Металлы. - 1989. - № 2. – С. 114 - 118.

Д16 АЛЮМИНИЙ ҚОРЫТПАСЫНЫҢ ӘРТҮРЛІ ТЕМПЕРАТУРАДАҒЫ МЕХАНИКАЛЫҚ СЫНАҚТАДАН КЕЙІНГІ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ФАЗАЛЫҚ КҮЙІКЕ ЗЕТТЕУЛЕР ЖУРГІЗУ

Полтавцева В.П., Ермаков Е.Л., Кислицин С.Б.

ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

Оптикалық металлография, растрлы электрондық микроскопия, рентгенқұрылымдық пен микрорентгенспектрлік талдау әдістері арқылы, 110, 150 және 170°С кезінде бұзылу сатысына дейін бірөстік созылуға сыналған, Д16 шышықтыр-ылған алюминий қорытпасының құрылымдық-фазалық күйсінің өзгеруіне температура кернеулердің рөлі айқындалған.

INVESTIGATION OF STRUCTURE-PHASE CHANGES IN ALUMINIUM ALLOY D16 AFTER THE MECHANICAL TESTS AT DIFFERENT TEMPERATURES

V.P. Poltavtseva, Ye.L. Yermakov, S.B. Kislitsin

Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan

By means of optical metallography, scanning electron microscopy, X-raying and X-ray microspectral analysis the effect of temperature and stress on structure-phase changes in aluminium alloy D16 after uni-axial strain at 110, 150 and 170°C.

УДК: 621.039.61:58.34.03

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ОТ LiD-КОНВЕРТОРА МЕТОДОМ АКТИВАЦИОННЫХ ИНДИКАТОРОВ

[1)]Тажибаева И.Л., [2)]Шестаков В.П., [1)]Алейников Ю.В., [1)]Попов Ю.А., [1)]Кимолаев Ж.Б., [1)]Сушков В.А.

[1)]Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[2)]НИИЭТФ Казахского Национального Университета им. Аль-Фараби, Казахстан

Представлены результаты определения потока быстрых нейтронов от *LiD*-конвертора тепловых нейтронов в быстрые нейтроны (*T*,*n*)-реакции на дейтерии *D* и литии ^{6}Li в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М.

Показано, что экспериментальное устройство с *LiD*-конвертором в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М является доступным источником быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ. Возможные области применения такого источника - радиационное материаловедение ТЯР, производство радиоизотопов, образующихся в пороговых реакциях на быстрых нейтронах, нейтронно-активационный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения полномасштабных исследований по радиационному материаловедению в интересах ТЯР необходимы источники нейтронов с энергией 14 МэВ, образующихся в результате термоядерных реакций. Для создания таких источников в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М были проведены эксперименты с *LiD* конвертором. Реактор ИВГ.1М - исследовательский водо-водяной гетерогенный корпусной ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем и бериллиевым отражателем нейтронов. Проведение физических исследований с целью количественной оценки плотности потока конвертерных нейтронов необходимо для оценки эффективности использования твердотельного литий – дейтериевого конвертера в качестве источника нейтронов с энергией 14 МэВ [1].

Источником конвертерных нейтронов в экспериментальном канале (ФКЭ) реактора ИВГ.1М являлся твердотельный *LiD* конвертер (преобразователь) тепловых нейтронов в быстрые нейтроны с энергией $E \approx 14$ МэВ [1]. Нейтроны с энергией $E \approx 14$ МэВ образуются в результате экзотермических реакций синтеза ядер дейтерия *D* и лития ^{6}Li с быстрыми ядрами трития *T* [1]:

$$D + T \rightarrow {}^{4}He + n \quad (q = 17{,}58\text{МэВ}), \qquad (1)$$

$$^{6}Li + T \rightarrow {}^{4}Be + n \quad (q = 16{,}02\text{МэВ}). \qquad (2)$$

Источником быстрых ядер трития (с энергией ε_0 = 2,74 МэВ) для конвертера служит (n,α)-реакция на ядрах ^{6}Li:

$$^{6}Li + n \rightarrow T + {}^{4}He \quad (q = 4{,}79 \text{ МэВ};\ \sigma^{T} = 950 \text{ б [1]}), \qquad (3)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Целью физических исследований являлось количественная оценка плотности потока конверторных нейтронов в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М.

Для измерения потока нейтронов с энергией $E \approx$ 14 МэВ в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М с *LiD* конвертером в составе экспериментального устройства (ЭУ) был использован активационный метод, основанный на применении активационных индикаторов (АИ) с энергией порога реакций активации $E_{пор} \geq 12$ МэВ. Исходя из этого условия, для регистрации 14 МэВ нейтронов в ЭУ была выбрана реакция активации индикатора из циркония и никеля:

$$^{90}Zr + n \rightarrow {}^{89}Zr + 2n \qquad (E_{пор} \approx 12{,}2 \text{ МэВ}). \qquad (4)$$

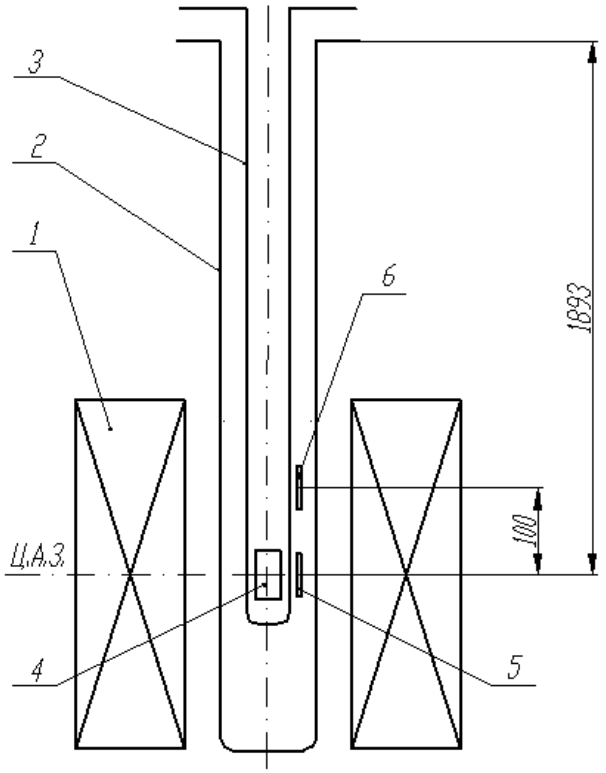
$$^{58}Ni + n \rightarrow {}^{57}Ni + 2n \qquad (E_{пор} \approx 12{,}6 \text{ МэВ}). \qquad (5)$$

Для мониторирования уровней мощности реактора, осуществленных в разных экспериментах, выбрана реакция:

$$^{58}Ni + n \rightarrow {}^{58}Co + p \qquad (E_{пор} \approx 2{,}6 \text{ МэВ}). \qquad (6)$$

Эксперименты по облучению твердотельного *LiD* конвертера проводились в экспериментальном канале реактора ИВГ.1М с использованием ампульного устройства (АУ) «ИНЕШ». Экспериментальное устройство представляет собой ампулу с закрепленными на ней АИ. Проведена серия из четырех экспериментов. В двух экспериментах ЭУ снаряжалось образцом из *LiD*. В двух других для сравнительной оценки потока реакторных нейтронов с энергией свыше ~12,2 МэВ в ФКЭ было установлено АУ без образца из *LiD*.

В эксперименте №1 предварительно в АУ был получен образец дейтерида лития *LiD*, путём насыщения металлического лития в среде газообразного дейтерия при температуре лития около 400°С. Образец дейтерида лития *LiD* представляет собой цилиндр высотой 15 и диаметром 8 мм. Для эксперимента был использован литий с естественным изотопным составом. Масса облучаемого образца составила 0,463 г. АУ «ИНЕШ» с образцом *LiD* было размещено в алюминиевом чехле охлаждения, установленном в ФКЭ таким образом, что образец находился во время облучения на уровне центра активной зоны. Полость АУ была заполнена газообразным дейтерием под давлением 640 торр. Схема размещения АУ «ИНЕШ» в ФКЭ представлена на рисунке 1.



1 – активная зона; 2 – экспериментальный канал;
3 – ампульное устройство; 4 – конвертор;
5 – измерительная кассета; 6 – фоновая кассета

Рисунок 1. Схема экспериментального устройства

В экспериментах №2 и №3 в ФКЭ было установлено АУ без образца из *LiD*. В эксперименте №2 в полости АУ находился воздух при атмосферном давлении, а в эксперименте №3 – полость АУ была заполнена газообразным водородом под давлением 40 торр. В отличие от экспериментов №1 и №2 на наружной поверхности АУ в нижней его части (между АУ и кожухом охлаждения) был установлен омический нагреватель. Схема размещения АУ в ФКЭ была одинаковой во всех пусках.

Эксперимент №4 был проведен с образцом дейтерида лития *LiD* обогащенным по ^{6}Li. Образец дейтерида лития был получен таким же образом, как и в эксперименте №1, и представлял собой цилиндр высотой 20 и диаметром 7,7 мм массой 0,365 г по ^{6}Li. Давление газообразного дейтерия в полости АУ составило 130 торр. Условия облучения были такими же, как и на пуске №1. Предполагалось, что поток быстрых нейтронов увеличится за счет реакции (2) в обогащенном литии.

ИЗМЕРЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

АИ быстрых нейтронов были установлены снаружи ампульного устройства. В качестве АИ использованы индикаторы в виде фольги из элементов с естественным изотопным составом размером 5×5 мм из: циркония и никеля (эксперименты №1, №2 и №3) и циркония (№4). АИ размещались в двух кассетах: измерительной – К1 и фоновой – К2. Фоновая кассета К2 была установлена с целью определения потока реакторных нейтронов. Кассета К1 была размещена на уровне центра активной зоны реактора. Фоновая кассета была размещена на расстоянии 100 мм выше центральной части кассеты К1 (рисунок 1).

В таблице 1 приведены ядерно-физические характеристики используемых АИ [2,3].

Перед облучением в реакторе индикаторы взвешивались, определялась их толщина. Основные физические характеристики индикаторов, установленных в кассетах К1 и К2 приведены в таблице 2.

Измерения активностей продуктов реакции (4) – (6) проводились с помощью спектрометрического комплекса «Canberra-InSpector» с полупроводниковым детектором из особо чистого германия [4]. Условия гамма-спектрометрических измерений выбирались в зависимости от активности индикаторов и фоновых условий.

Таблица 1. Характеристики активационных пороговых индикаторов

Реакция	Содержание изотопа в естественной смеси η, %	Период полураспада $T_{1/2}$, ч	Порог реакции $E_{эфф}$, МэВ	Сечение реакции $\sigma_{эфф}$, мб	Энергия гамма-квантов $E\gamma$, кэВ	Выход гамма-квантов на распад p, %
$^{90}Zr(n,2n)^{89}Zr$	51,50	78,4	12,2	790	909,2	99,87
$^{58}Ni\ (n,2n)^{57}Ni$	67,76	36,2	12,6	30	1377,6	80
$^{58}Ni(n,p)^{58}Co$	67,76	1694,9	2,6	335	810,8	99,5

Таблица 2. Основные физические характеристики АИ

Состав АИ	Толщина, г/см^2	Масса индикатора, мг							
		Эксперимент №1		Эксперимент №2		Эксперимент №3		Эксперимент №4	
		К1	К2	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Цирконий	0,0667	0,131	0,112	0,065	0,064	0,042	–	0,182	0,195
Никель	0,167	0,131	–	0,131	0,131	0,131	–	–	–

Измерения активности АИ проводились в низкофоновой защите после выдержки 20 – 50 часов с момента окончания облучения. Время экспозиции выбиралось в зависимости от заданной статистической погрешности при определении площади пика полного поглощения, и составило от 26000 до 30600 с. Расстояние от АИ до крышки полупроводникового детектора составило для всех измерений 50 мм. Перед измерением активности АИ была выполнена калибровка γ-спектрометра по γ-излучению эталонных источников из комплекта образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ) и определена эффективность регистрации гамма-квантов с энергией E_γ = 909,2 кэВ.

Спектры гамма-излучения АИ из никеля и циркония в интересующей области энергий приведены на рисунках 2, 3.

В ходе выполнения физических исследований по оценке плотности потока конвертерных нейтронов получены экспериментальные значения удельной активности в АИ *A,* приведенные на момент окончания облучения, соответствующие им значения скорости реакции *R* и плотности потока нейтронов $\varphi(E_{эфф})$ с энергией $E > E_{эфф}$. Результаты исследований, приведенные к одинаковым условиям облучения, представлены в таблице 3.

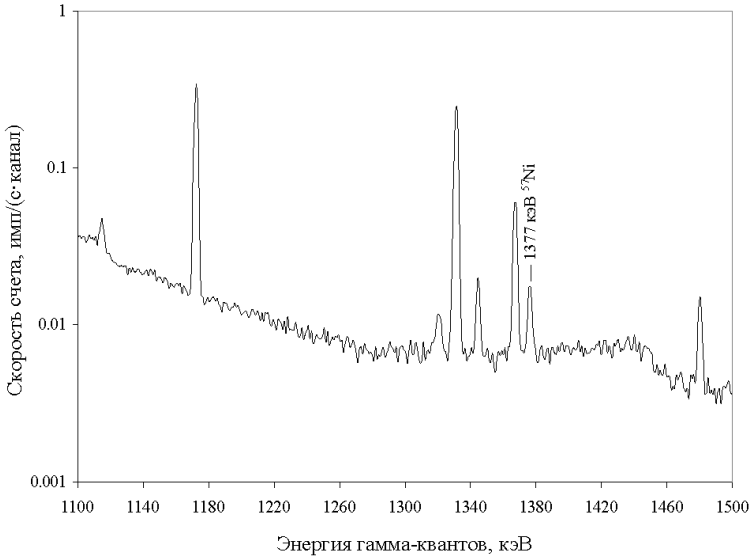


Рисунок 2. Спектр гамма-излучения АИ из никеля в области энергий 1100 – 1500 кэВ

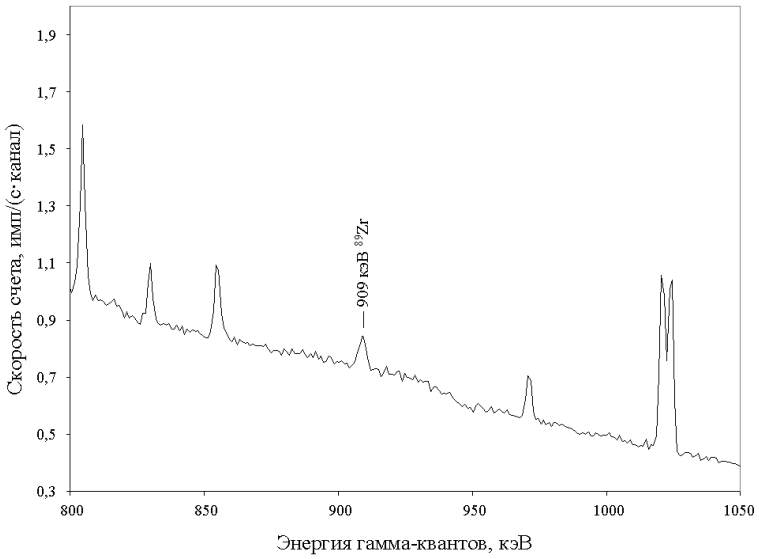


Рисунок 3. Спектр гамма-излучения АИ из циркония в области энергий 800 – 1050 кэВ

Таблица 3. Экспериментальные значения удельной активности A активационных индикаторов на момент облучения, скорость реакции R и плотность потока нейтронов φ ($E_{эфф}$) с энергией $E > E_{эфф}$ в измерительной (К1) и фоновой кассетах (К2)

Реакция	A, $\times 10^5$ Бк/г		R, $\times 10^{-14}$ $с^{-1}$		φ, $\times 10^{10}$ н/($см^2$ с)	
	К1	К2	К1	К2	К1	К2
Эксперимент №1						
^{90}Zr (n, 2n) ^{89}Zr	0,990	0,878	0,224	0,198	0,286	0,248
^{58}Ni (n, 2n) ^{57}Ni	0,145	-	0,007	-	0,248	-
^{58}Ni (n, p) ^{58}Co	49,0	-	115,2	-	343,8	-
Эксперимент №2						
^{90}Zr (n, 2n) ^{89}Zr	7,182	7,063	0,157	0,155	0,199	0,195
^{58}Ni (n, 2n) ^{57}Ni	1,251	1,044	0,006	0,005	0,207	0,177
^{58}Ni (n, p) ^{58}Co	506,4	480,7	115,3	109,3	343,8	327,1
Эксперимент №3						
^{90}Zr (n, 2n) ^{89}Zr	18,537	-	0,155	-	0,197	-
^{58}Ni (n, 2n) ^{57}Ni	2,972	-	0,006	-	0,186	-
^{58}Ni (n, p) ^{58}Co	1325,5	-	114,9	-	343,8	-
Эксперимент №4						
^{90}Zr(n, 2n)^{89}Zr	0,804	0,669	0,179	0,149	0,227	0,189

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены физические исследования с применением активационных индикаторов, выполнена количественная оценка плотности потока конвертерных нейтронов.

По результатам физических исследований были сделаны следующие выводы:

1. Использование *LiD* конвертера в качестве источника быстрых нейтронов возможно и подтверждено настоящими исследованиями. Плотность потока конвертерных нейтронов составила $0{,}9\times10^9$ н/($см^2$ ×с) при этом интегральная плотность потока быстрых нейтронов с энергией свыше 12,5 МэВ – $0{,}29\times10^{10}$ н/($см^2$× с) при уровне мощности реактора 6,0 МВт.

2. Значения скорости реакции, определённые для АИ из циркония и никеля в экспериментах №2 и №3 в отсутствии *LiD* конвертера совпадают в пределах погрешности, что говорит о сходимости результатов измерения плотности потока быстрых нейтронов.

3. Чувствительность активационного метода измерения плотности потока быстрых нейтронов с энергией свыше 12,5 МэВ с помощью индикаторов из циркония достаточна для детектирования быстрых нейтронов в экспериментальном канале реакторе ИВГ.1М при выбранном режиме облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Реферат]//Атомная техника за рубежом. – 1986. – №1, 4С. – С.22. – Реф.ст: Точенный, Л.В. Конвертирование тепловых нейтронов в быстрые энергией 14,1 МэВ / Л.В. Точенный, М.И. Рождественский, Л.М. Чупова.
2. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами. Справочник. / В. М. Бычков [и др.] – М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Овечкин, В. В. Уточнение сечений реакций быстрых нейтронов на ^{90}Zr и ^{91}Zr с образованием нуклидов в изомерном состоянии / В. В. Овечкин, А. Е. Хохлов // Атомная энергия – 1986. – Т. 60, вып. 2. – С. 143 – 144.
4. Ломакин, С. С. Радиометрия нейтронов активационным методом / С. С. Ломакин, В. И. Петров, П. С. Самойлов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.

LiD - КОНВЕРТОРЫНЫҢ ЖЫЛДАМ НЕЙТРОНДАРЫНЫҢ АҒЫНЫН АКТИВАЦИЯЛЫҚ КӨРСЕТКІШ ӘДІСІМЕН АНЫҚТАУ

[1)]Тажибаева И.Л., [2)]Шестаков В.П., [1)]Алейников Ю.В., [1)]Попов Ю.А., [1)]Кимолаев Ж.Б., [1)]Сушков В.А.

[1)]ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан
[2)]Аль-Фараби атындағы Қазақстан Ұлттық Университетінің ҒЗИЭТФ, Қазақстан

ИВГ.1М реакторының экспериментальдық каналындағы жылдам нейтрондардың ағындарының LiD-конверторынан жылу нейтрондардың D дейтрии және Li литии[6] (Т,п)- жылдам нейтрондарының реакциясына әсерін анықтау нәтижелері ұсынылады. ИВГ.1М реакторының экспериментальдық каналындағы LiD-конверторы эксперименталдық құрылғысы 14 МэВ қуатты жылдам нейтрондардың жақындатушы көзі болып табылатыны көрсетілді. Осындай көздерді қолдану аумақтары - ТЯР радиациялық заттану, жылдам нейтрондар реакциясы табалдырығында пайда болатын радиоизотоптарды өндіру, нейтрондық-активтенуді талдау.

DETERMINATION OF THE FAST NEUTRONS FLUX FROM THE LiD-CONVERTER BY THE ACTIVATION INDICATORS METHOD

[1)]I.L. Tazhibaeva, [2)]V.P. Shestakov, [1)]Yu.V. Aleinikov, [1)]Yu.A. Popov, [1)]Zh.B. Kimolaev, [1)]V.A. Sushkov

[1)]Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[2)]NIIETF of the Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan

Results of definition of fast neurons from *LiD* – slow neutrons convertor in fast neutrons (*T*,*n*)- response to deuterium *D* and lithium ^{6}Li in reactor IVG 1M experimental channel are presented.

The experimental device with *LiD* – convertor in reactor IVG 1M experimental channel is available source of fast neutrons with energy in 14 MeV is presented. There potential field of application such source are radiation materials science of thermonuclear reactors, radioisotopes production which are resulting in fast neutrons threshold reaction, neutron- activation analysis.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИГР: РЕЗУЛЬТАТЫ СРЕДНЕМАСШТАБНОГО ВНУТРИРЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ПРОВЕДЕННОГО В РАМКАХ ПРОЕКТА EAGLE

[1)]Васильев Ю.С., [1)]Вурим А.Д., [2)]Гайдайчук В.А., [2)]Колодешников А.А., [2)]Пахниц А.В., [2)]Пахниц В.А., [2)]Маринин А.С., [2)]Шаповалов Г.В., [2)]Логачев Ю.В., [3)]K. Konishi, [3)]J.I. Sato, [4)]S. Kubo, [4)]S. Kotake, [5)]K. Koyama

[1)]Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов
[2)]Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[3)]JAEA, O-arai, Япония
[4)]JAPC, Япония
[5)]ARTECH, Япония

На реакторе ИГР (Импульсный графитовый реактор) НЯЦ РК был успешно проведен эксперимент по разрушению стенки в рамках программы EAGLE, в котором ТВС с массой около 2 кг диоксида урана была расплавлена ядерным нагревом. В этом эксперименте, 3-х миллиметровая стенка из нержавеющей стали была расположена между ТВС и 10-и миллиметровым каналом с натриевым теплоносителем (натриевый зазор). В течение переходного процесса твэлы ТВС были нагреты до образования смешанного топливно-стального бассейна расплава.

В условиях ядерного нагрева стенка из нержавеющей стали была сильно разогрета бассейном расплава, что привело к проплавлению стенки. Время, необходимое для проникновения топлива в натриевый зазор, было очень мало (менее чем одна секунда после образования бассейна расплава). Результаты дают возможность полагать, что расплавленные материалы активной зоны реактора, образованные в результате гипотетической аварии с плавлением активной зоны реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, имеют определенный потенциал для разрушения границ стенки из нержавеющей стали на ранней стадии аварии, что ведет к направленному выводу топлива из области активной зоны реактора. Раннее образование таких путей вывода топлива рассматривается в качестве предпочтительного и исключает возможность случаев повторной критичности. В данной статье представлены предварительные оценки результатов эксперимента по разрушению стенки.

Введение

Накопленный опыт исследований и экспериментальные результаты по различным аспектам поведения элементов и материалов реакторной техники являются итогом длительного использования реактора ИГР, который, будучи введенным эксплуатацию в 1961 году, остается одним из лучших импульсных исследовательских реакторов в мире с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $0{,}7\times10^{17}$ см$^{-2}$ с$^{-1}$ и с максимальным флюенсом нейтронов $3{,}7\times10^{17}$ см$^{-2}$.

К наиболее значительным экспериментальным работам, выполненным на реакторе ИГР за годы его эксплуатации, относятся исследования в области обоснования безопасности ядерных реакторов различного назначения - космического, транспортного, энергетического и исследовательского.

В рамках этих исследований были реализованы:

- реакторные испытания модельных твэлов и ТВС реакторов типа ВВЭР;
- реакторные испытания ТВС реактора ИВВ-2М;
- реакторные испытания модельных твэлов и ТВС реакторов транспортного назначения;
- реакторные эксперименты с плавлением модельных твэлов реакторов типа ВВЭР;
- реакторные испытания модельных твэлов реактора типа БН-800;
- реакторные испытания керметных модельных твэлов для реакторов типа ВВЭР.

Эти исследования позволили накопить методический и технологический опыт и сформировать основу для реализации экспериментальной программы в обоснование конструкции перспективного реактора типа LMFBR, выполняемой Национальным ядерным центром Республики Казахстан в кооперации с Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

До последнего времени реализация повторно критической конфигурации в активной зоне реактора LMFBR изучалась как постулированное событие для аварии с разрушением активной зоны (CDA). При таком подходе конструкция реактора разрабатывалась с таким запасом, чтобы вся энергия, выделившаяся в результате этого события, была локализована в границах первого контура.

Однако такой подход при проведении оценок безопасности основан на весьма консервативных предположениях, что связано, в первую очередь, с отсутствием экспериментальных данных, которые позволили бы выполнить анализ более реалистичным способом. Использование реалистичного способа оценки последствий CDA позволит показать, что

проблема повторной критичности (т.е., проблемы сохранения целостности границ первого контура или проблемы выделения большого количества энергии как следствия повторной критичности) перестает существовать, если использовать комбинацию конструктивных решений, исключающих повторную критичность. При этом, эффективность такой концепции должна быть надежно обоснована экспериментально. Кроме того, такое решение проблемы повторной критичности позволит улучшить публичное восприятие уровня безопасности LMFBR [1-3]

Устранение проблемы повторной критичности может быть достигнуто путем установления ясной логики, основанной на экспериментальных доказательствах, которые показывают, что активная зона реактора имеет внутренне присущие свойства, исключающие возможность возникновения повторной критичности в условиях разрушения активной зоны. Если предположить, что расплавленное топливо не выводится из активной зоны, в ее объеме может быть сформирован большой бассейн расплава, который периодически будет достигать состояния повторной критичности. В противоположность этому, если обеспечить раннее выведение топлива из активной зоны, она становится свободной от такого недостатка как возможность возникновения повторной критичности. Расплавленное топливо с накопленной в нем энергией могло бы быть удалено из активной зоны в процессе ее плавления через специальные каналы выведения расплава, вид которых зависит от конструкции реактора. В качестве варианта решения задачи выведения расплавленного топлива из активной зоны рассматривается концепция FAIDUS (Fuel Assembly with Inner Duct Structure) и некоторые другие конструкции [4, 5]. Фундаментальный механизм выведения топлива должен быть подтвержден результатами проекта EAGLE (Experimental Acquisition of Generalized Logic to Eliminate re-criticalities), направленного на демонстрацию эффективности концепции FAIDUS.

Экспериментальная программа EAGLE [6-8] выполняется с использованием экспериментальных установок Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК), предназначенных для исследований проблем безопасности ядерной энергетики. Целью этой программы является получение экспериментальных доказательств исключения самой возможности повторной критичности в перспективных реакторах на быстрых нейтронах, охлаждаемых натрием. Для этих целей используются как внереакторные, так и внутриреакторные экспериментальные устройства, которые должны продемонстрировать, что расплавленное топливо может быть выведено из активной зоны, когда происходит ее плавление.



Рисунок 1. ИГР (импульсный графитовый реактор)

Матрица внутриреакторных экспериментов, проводимых на реакторе ИГР (рисунок 1), показана на рисунке 2. В качестве заключительного этапа выполняются три полномасштабных эксперимента с ~8 кг UO_2. Целью первого полномасштабного эксперимента без натрия является отработка технологии проведения двух последующих экспериментов с натрием, количество которого в каждом из двух завершающих экспериментов составляет ~9 кг. С другой стороны, первый полномасштабный эксперимент (FD: Fuel Discharge) должен дать основные данные по ключевым феноменам сценария вывода топлива. Целью заключительных полномасштабных экспериментов ID1 и ID2 (ID: Integral Demonstration) является получение информации о выведении топлива из активной зоны, которая может быть использована для разработки реакторов, будучи объединенной с информацией, полученной во внереакторных экспериментах.

Возможно, что начало выведения топлива будет совпадать с разрушением нержавеющей стальной стенки на границе между расплавленным топливом и каналом выведения, первоначально заполненным жидким натрием. Чтобы исследовать разрушение нержавеющей стальной стенки, контактирующей с жидким натрием, на подготовительной стадии программы был проведен эксперимент WF, который расценивается как эксперимент среднего масштаба в рамках программы EAGLE. Условия проведения эксперимента WF описываются в разделе 1, результаты и их интерпретация показаны в разделе 2, последовательность реализации событий в процессе эксперимента обсуждена в разделе 3.

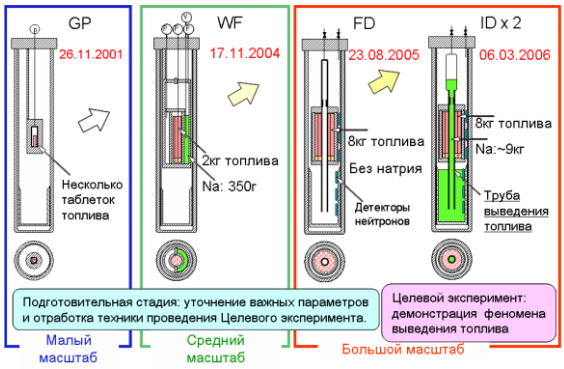


Рисунок 2. План внутриреакторных экспериментов по программе EAGLE

1. Условия эксперимента WF

1.1 Экспериментальное устройство WF

Схема экспериментального устройства WF показана на рисунке 3. Внутри трубы из нержавеющей стали с внешним диаметром 54 мм и толщиной стенки 3 мм, была установлена ТВС из 12 твэлов. Каждый твэл был изготовлен из топливных таблеток типа ВВЭР-1000 (наружный диаметр 7.55 мм, диаметр центрально отверстия 1.5 мм), помещенных в оболочку из нержавеющей стали с наружным диаметром 9.0 мм и толщиной стенки 0.5 мм. В активной части твэла (400 мм) были установлены топливные таблетки с обогащением 4.4 %, в бланкете (в нижней части твэла на длине около 50 мм) были установлены топливные таблетки с естественным обогащением диоксида урана. Полная масса UO_2 составляла 2.311 кг (топливо - 2.07 кг, бланкет - 0.241 кг). Внешняя поверхность трубы из нержавеющей стали была разделена на два одинаковых участка по окружности, при этом газовый зазор толщиной 3 мм, заполненный аргоном, с одной стороны, и зазор толщиной 10 мм, заполненный натрием, с другой стороны окружали трубу. Такая конструкция позволяла создать одни и те же условия теплового взаимодействия расплавленного топлива одновременно с двумя стенками, неохлаждаемой и охлаждаемой натрием, соответственно. Этот подход позволял оценить эффект присутствия натрия за стенкой.

Экспериментальная секция, описанная выше, была установлена в силовой корпус, и ввод энергии, превышающей энергию, необходимую для плавления UO_2 был обеспечен за счет мощного нейтронного импульса в центральном экспериментальном канале реактора ИГР (перед нейтронным импульсом вся экспериментальная секция была разогрета встроенными электрическими нагревателями до температуры около 400°C).

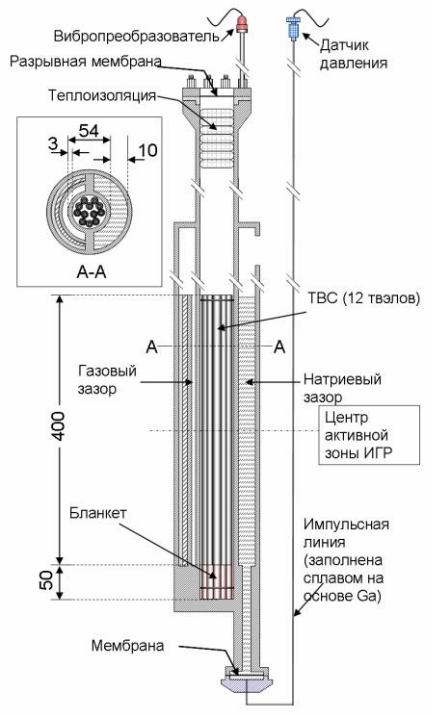


Рисунок 3. Экспериментальная секция WF

1.2 Система измерения параметров

Одной из целей эксперимента WF являлась проверка функциональной эффективности всех измерительных устройств, которые предполагалось использовать в будущих полномасштабных экспериментах. В экспериментальном устройстве WF было установлено большое количество средств измерения, включая хромель-алюмелевые (ХА) и вольфрам-рениевые термопары (ВР), датчики давления в газе и в натрии, вибропреобразователь и датчики пустот (рисунок 4). Термопары были установлены с целью определения теплового состояния экспериментальной секции, включая состояние топлива. Датчики давления и вибропреобразователь использовались для измерения давления и акустических событий, которые являлись следствием разрушения стенки. Датчики пустот использовались для измерения параметров натрия в процессе его кипения и образования пустот в его объеме, что, как предполагалось, будет происходить в процессе разрушения стенки.

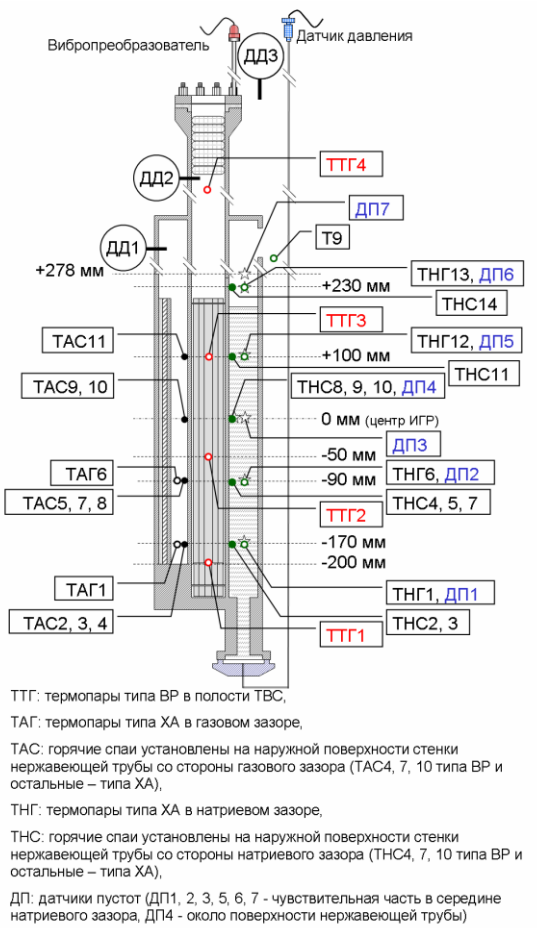


Рисунок 4. Измерения в эксперименте WF

Четыре термопары типа ВР были установлены по оси ТВС (ТТГ1-4). Девять термопар (7 типа ХА и 2 типа ВР: ТАС1, 2, 4, 5 и 7-11) были установлены на стенке нержавеющей трубы, обращенной к газовому зазору, и десять термопар (8 типа ХА и 2 типа ВР: ТНС2-5, 7-11 и 14) были установлены на стенке, обращенной к натриевому зазору. Горячие спаи термопар были установлены как с использованием бандажей (пластин специальной формы из нержавеющей стали толщиной 0.1 мм), так и с использованием пайки медно-цинковым припоем (температура плавления ~800°C). Пайка была принята с целью улучшения теплового контакта горячего спая термопар с поверхностью стенки и измерения температуры поверхности стенки с максимально возможной точностью. В центре каждой из ячеек, в зазорах, были установлены термопары типа ХА (ТАГ3 и 6 в газовом зазоре и ТНГ1, 6, 12 и 13 в натриевом зазоре).

Давление в полости ТВС, в газовом и в натриевом зазорах измерялось датчиками давления, расположенными вне активной зоны с целью исключения влияния на них реакторного излучения. С датчиками каждая из полостей была соединена импульсной линией с внутренним диаметром 0.96 мм и длиной около 3 м.

Импульсная линия (длинной около 5 м), заполненная сплавом на основе галлия, использовалась для измерения давления в жидком натрии, которое, как предполагалось, будет генерироваться, когда расплавленное топливо при высокой температуре смешается с натрием (такое смешение означает, что расплавленное топливо разрушило стенку из нержавеющей стали) и произойдет взаимодействие топлива и теплоносителя (FCI). Тонкая разделительная мембрана была установлена между натрием и галлиевым сплавом в самой нижней точке натриевой ячейки. В качестве датчика давления использовался тензометрический преобразователь давления серии LHP.

Вибропреобразователь пъезоэлектрического типа с широкой частотой пропускания сигнала (0.1-25000 Гц) был установлен на верхнем фланце нержавеющей трубы с целью измерения акустических сигналов в процессе кипения натрия и/или взаимодействия FCI. Вибропреобразователь был закреплен на фланце с использованием стержня-волновода, что позволило исключить тепловое воздействие на пъезоэлектрический датчик.

Датчики пустот Чен-типа (Chen-type) [9, 10] были установлены в натриевой ячейке. Шесть датчиков пустот (ДП1-3 и ДП5-7) были установлены в середине объема натрия (в 5 мм от наружной поверхности нержавеющей трубы) и один датчик (ДП4) был установлен в 2 мм от наружной поверхности нержавеющей трубы. Во время переходного процесса измерялись не только изменения напряжения датчиков пустот, но также значения стабилизированных токов питания, что позволило контролировать целостность их электрических цепей в ходе эксперимента.

Период опроса составлял 0.04 мс для системы измерения давления в натрии и для вибропреобразователя, 0.5 мс для датчиков пустот и 36 мс и 2 мс для термопар (для термопар использовались две независимых системы регистрации).

2. Результаты

2.1 Реализованная диаграмма мощности

Диаграмма изменения мощности ректора ИГР при проведении эксперимента WF показана на рисунке 5. На этапе планирования эксперимента WF были проведены предварительные расчеты для ожидаемых начальных и граничных условий с использованием расчетных кодов SIMMER-III и -IV [11, 12, 13]. В соответствии с результатами предварительных расчетов была выбрана такая диаграмма изменения мощности, чтобы бассейн расплава топлива с температурой 3100-3200°C был бы сформирован в течение ~5 с после начала ее реализации [14]. На рисунке 6 приведено сравнение заданной и реализованной величины энерговыделения.

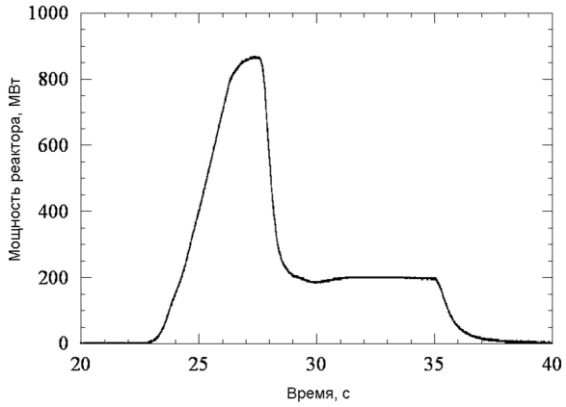


Рисунок 5. Диаграмма изменения мощности реактора ИГР в эксперименте WF

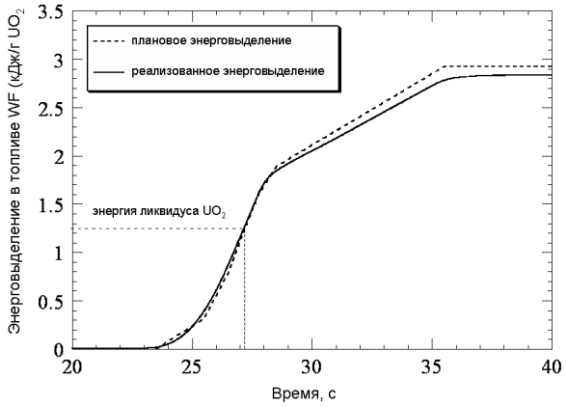


Рисунок 6. Плановое и реализованное энерговыделение в топливе экспериментального устройства WF

Энерговыделение в топливе экспериментального устройства WF (рисунок 6) было определено по величине энерговыделения в реакторе ИГР с использованием коэффициента связи

$$КС = \frac{энерговыделение\ в\ топливе\ (Дж / г\ UO_2)}{энерговыделение\ в\ ИГР\ (Дж\ ИГР)}$$

Значение коэффициента связи было определено на основе следующей информации:

- результатов измерений, выполненных в процессе проведения физических исследований на полномасштабном физическом макете экспериментального устройства WF (с энерговыделением в реакторе 15 МДж). Энерговыделение в измерительных твэлах ТВС и в мониторе энерговыделения (топливной таблетке с обогащением 0.72 % по ^{235}U) было определено спектрометрическим методом по интенсивности излучения ^{140}La (гамма-линия 1596 кэВ);
- результатов измерений энерговыделения в мониторах в калибровочных экспериментах (с энерговыделением в реакторе 300 МДж), выполненных с использованием экспериментального устройства WF;
- результатов нейтронно-физических расчетов, выполненных с использованием кода MCNP [15].

Как видно из рисунка 6, энерговыделение в топливе экспериментального устройства WF, реализованное в эксперименте, удовлетворительно совпадает с заданным значением. Следует отметить, что величина энерговыделения в топливе определена с некоторой неопределенностью, обусловленной изменением температуры активной зоны реактора в процессе пуска, изменением конфигурации топлива ТВС в процессе его плавления, зависимостью показаний штатных ионизационных камер системы СУЗ реактора от положения стержней регулирования, и т.д. Поэтому, значение энерговыделения будет уточнено в процессе детального постэкспериментального анализа в будущем.

2.2. Распределение материалов перед и после эксперимента

Перед проведением эксперимента и после него было выполнено рентгеновское просвечивание экспериментального устройства. Полное изображение экспериментального устройства в рентгеновских лучах было скомпоновано из нескольких мелких фрагментов (рисунок 7).

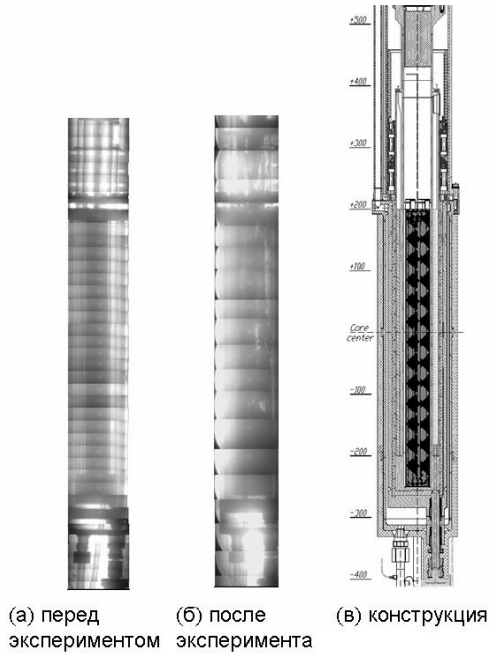


Рисунок 7. Результаты рентгеновского просвечивания экспериментального устройства

При сравнении изображений видно, что первоначально неповрежденная ТВС, разрушилась в ходе эксперимента, и составляющие ее материалы переместились, главным образом, в нижнюю область экспериментальной секции. Кроме этого, видно, что определенное количество затвердевшего топлива (или нержавеющей стали) находится на стенке стальной трубы и в каждой из ячеек. ТВС была полностью расплавлена в ходе эксперимента и расплав материалов

ТВС разрушил стенку трубы и проник в газовый и в натриевый зазоры. Небольшое количество затвердевшего расплава находится снаружи натриевого зазора, за окном, которое было устроено в наружной стенке натриевой ячейки. В настоящее время проводится детальное исследование материалов и их распределения в объеме экспериментальной секции.

2.3. Интерпретация последовательности событий

2.3.1 Формирование бассейна расплава

Зная массу твэлов ТВС, можно предположить, что уровень расплава полностью переплавленного топлива и оболочек твэлов находился на отметке приблизительно -50 мм относительно центра активной зоны реактора ИГР, если принять, что объеме расплава отсутствуют пустоты. Показания термопар в трубе ТВС приведены на рисунке 8 (сигналы термопар после их очевидного выхода из строя на графике не показаны).

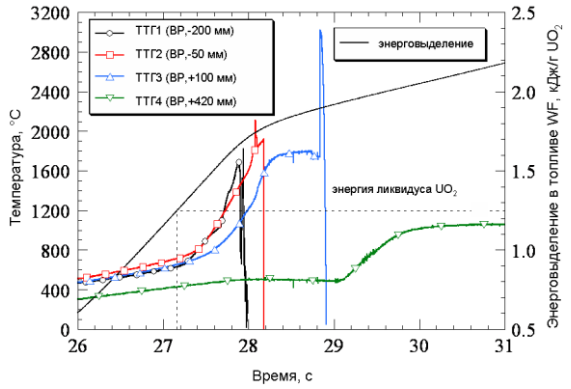


Рисунок 8. Показания термопар в полости ТВС

Начальное увеличение температуры со скоростью 100-160°C/с (до момента времени 27.2 с) объясняется, главным образом, эффектом гамма-разогрева самих термопар (это предположение было подтверждено в предварительных калибровочных экспериментах на низких уровнях мощности). В период 27.2 - 28.2 с скорость увеличения температуры по показаниям термопар ТТГ1, ТТГ2 и ТТГ3 возрастает, при этом термопары ТТГ1 и ТТГ2 теряют работоспособность. Выход из строя этих двух термопар является совершенно естественным событием, поскольку горячие спаи этих термопар находились ниже отметки -50 мм, то есть ниже ожидаемого уровня расплава (все термопары были введены в ТВС сверху). По видимому, термопара ТТГ3 сохранила работоспособность вплоть до момента времени 28.9 с потому что ее горячий спай находился вне расплава. Что касается термопары ТТГ4, она была расположена вверху над ТВС и сохранила работоспособность после 29 с (см. раздел 2.3.3). В целом, показания термопар ТТГ могут быть интерпретированы как свидетельство образования бассейна расплава в период 27.2 - 28.2 с. Энерговыделение в топливе к моменту времени 28.2 с уже превышало величину, необходимую для плавления UO_2.

2.3.2. Разрушение стенки со стороны газового зазора

Измерения давления для каждой отдельной полости (полость ТВС, газовый зазор и натриевый зазор) осуществлялись с целью определения моментов времени разрушения стенок (рисунок 9). Очевидно, что разрушение стенок, разделяющих полости, приведет к выравниванию давления в них. Хотя предполагалось, что разрушение стенок в эксперименте WF будет происходить в две стадии (стенки со стороны газового зазора и стенки со стороны натриевого зазора), эффект выравнивания давления наблюдался только один раз (выравнивание давления между газовым зазором и натриевым зазором к моменту времени 34 с). Выравнивание давления в полости ТВС и в газовом зазоре не было зафиксировано. Импульсная линия системы измерения давления в полости ТВС могла быть заблокирована, хотя пока этому нет доказательств.

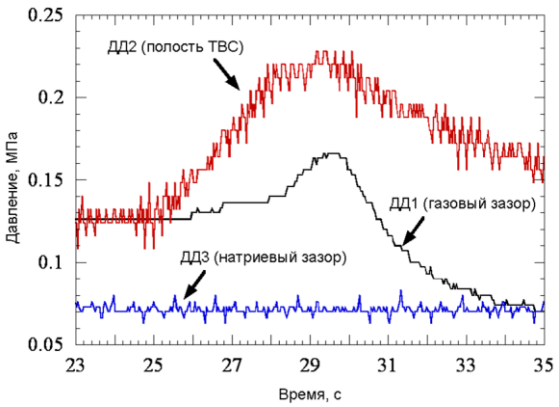


Рисунок 9. Результаты измерения давления

Показания термопар, установленных на различной высоте в газовом зазоре, показаны на рисунке 10. Показания термопар ТАС2 и ТАС3 характеризуются увеличением скорости роста температуры, начиная с момента времени 27.6 с, что является очевидным свидетельством контакта расплава с со стенкой в области расположения горячих спаев. С задержкой 0.6 с начинается резкое увеличение показаний термопары ТАГ1 (повторяет показания ТАС2). Можно предположить, что увеличение температуры и последующий выход термопары из строя произошли из-за поступления расплава в газовый зазор и контакта горячего спая термопары ТАГ1 с расплавом (она была разрушена с небольшой задержкой). Разрушение стенки нержавеющей трубы, обращенной к газовому зазору и имеющей толщину 3 мм, произошло, вероятно, в нижней части (около отметки -170 мм) в момент времени около 28.2 с.

Возвращаясь вновь к рисунку 9, следует подчеркнуть, что в момент времени 28.2 с изменился темп увеличения давления в полости ТВС и в газо-

вом зазоре. Это могло произойти в том случае, когда полость ТВС и газовый зазор пространственно объединились, и в момент времени 28.2 с горячий газ из полости ТВС поступил в полость газового зазора.

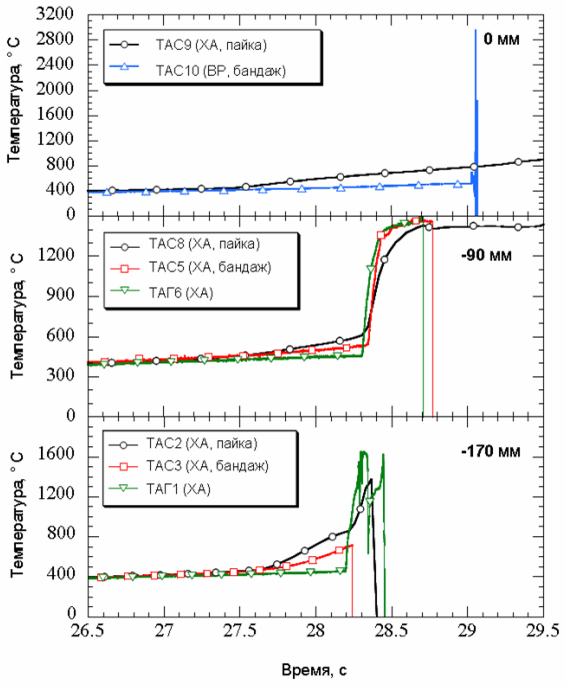
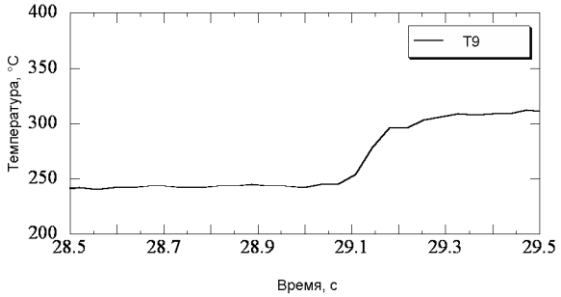


Рисунок 10. Показания термопар в газовом зазоре

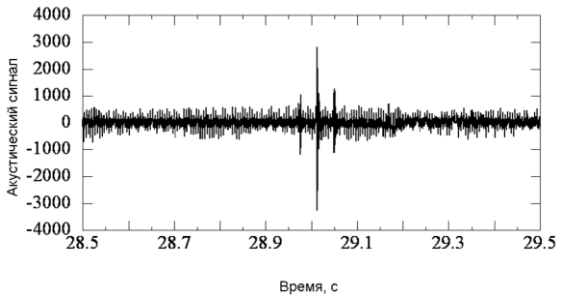
2.3.3. Разрушение стенки со стороны натриевого зазора

Как это было показано в предыдущем разделе, выравнивание давления в газовом и натриевом зазоре наблюдалось в момент времени 34 с, при этом увеличение давления в газовом зазоре началось в момент времени 29.6 с (рисунок 9). Предположительно в это время обе полости пространственно объединились. Задержка изменения показаний датчика ДД2 после этого может быть объяснена блокировкой тонкой импульсной линии (которая могла произойти вследствие конденсации паров стали), соединяющей полость ТВС с датчиком. В этой связи, исходя из рисунка 9, нельзя точно определить время разрушения стенки.

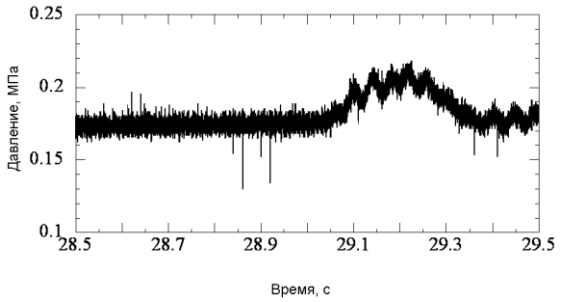
Как свидетельства разрушения стенки со стороны натриевого зазора, наблюдались некоторые специфические явления, происходящие при контакте топлива с натрием и при перемещении горячих материалов. Показания системы измерения давления натрия и вибропреобразователя показаны на рисунке 11 (а) и (б). Импульсы акустического сигнала (измеренные в 28.976 с, 29.012 с и 29.049 с, соответственно) и увеличение давления в натрии на 0.5 МПа (начавшееся в 29.04 с), как предполагается, являются результатом относительно мягкого взаимодействия топлива с натрием (FCI). На рисунке 11(в), приведены показания термопары Т9 (которая была расположена непосредственно за окном натриевого зазора).



в – Показания термопары, установленной снаружи окна натриевого зазора



б – Сигнал вибропреобразователя



а – сигнал системы измерения давления в натрии

Рисунок 11. Показания системы измерения давления в натрии и системы измерения акустических сигналов

По-видимому, определенное количество жидкого натрия было ускорено под действием паров натрия и переместилось к месту размещения термопары Т9 (уровень +340 мм), при этом было зафиксировано небольшое увеличение температуры в этой области (в момент времени 29.07 с). Аналогично, увеличение температуры по показаниям термопары ТТГ4, начавшееся в момент времени 29 с (рисунок 8), показывает, что пары натрия заполнили полость ТВС.

Показания термопар, установленных на различных уровнях по высоте в натриевом зазоре, подтверждают предложенную выше интерпретацию (рисунок 12). Следует подчеркнуть, что температура натрия по показаниям термопар ТНГ1 и ТНГ6 превысила температуру стенки, при этом термопара ТНГ6 показала температуру выше температуры кипения натрия в момент времени 29.05 с. И только после этого произошло разрушение термопары ТНС10 (типа ВР). Разрушение термопар может быть интерпретировано как результат поступления горячего материала в зазор. Скорее всего, разрушение стенки началось в нижней ее части, так как темпера-

тура стенки в момент времени ~29 с (по показаниям термопары ТНС2) была максимальной по сравнению с показаниями любых других термопар, установленных на поверхности стенки.

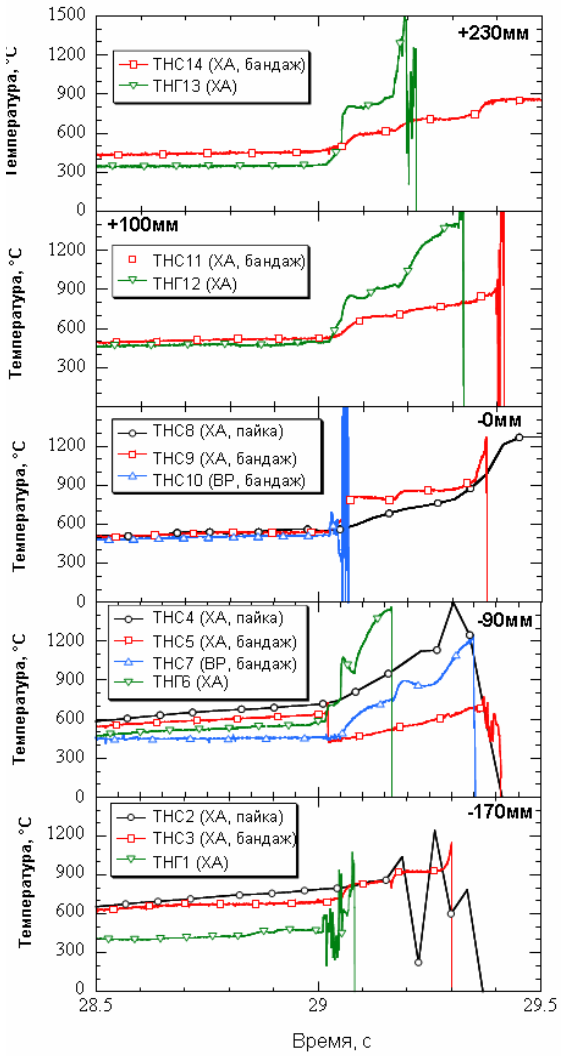


Рисунок 12. Показания термопар в натриевом зазоре

3. Обсуждение

Основываясь на интерпретации, рассмотренной в предыдущих разделах, предложен сценарий событий, происходивших в экспериментальном устройстве WF (рисунок 13). Разрушение стенки со стороны натриевого зазора произошло на очень ранней стадии после формирования бассейна расплава (менее чем через 1 с). В настоящем разделе обсуждены необходимые условия такого разрушения.

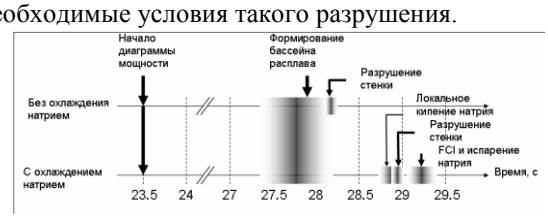


Рисунок 13. Интерпретация событий в эксперименте WF

3.1. Условия разрушения стенки

Распределение температуры по стенкам для каждой из сторон (по показаниям термопар с горячими спаями, припаянными к стенке) приведено на рисунке 14. Распределение температуры для стенки со стороны газового зазора в момент времени 28.2 с (непосредственно перед разрушением стенки) приведено в сравнении с распределением температуры для стенки со стороны натриевого зазора для того же самого момента времени (28.2 с) и для момента 29 с. Видно, что в момент времени 28.2 с температура у стенки со стороны газового зазора выше, и эффект охлаждения противоположной стенки натрием очевиден. С другой стороны, если сравнивать температуру стенки со стороны газового зазора в момент времени 28.2 с и температуру стенки со стороны натриевого зазора в момент времени 29 с, то обнаружим подобие в тепловом состоянии обеих стенок.

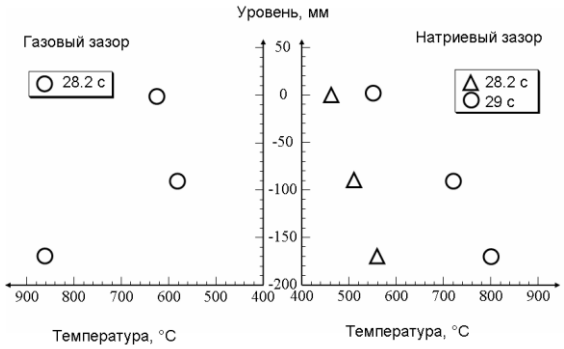


Рисунок 14. Сравнение температуры стенок непосредственно перед их разрушением

Если оценивать состояние натрия по показаниям термопар ТНГ (рисунок 12), то следует сделать вывод, что температура натрия не превышает температуру насыщения. Давление натрия в момент времени 29 с составляет 0.07~0.08 МПа (по показаниям датчика давления ДД3), а температура насыщения при этом давлении равна 830~850°С. Показания термопары ТНС2 приближаются к температуре насыщения еще до момента времени 29 с.

На рисунке 15 приведены показания датчиков пустот Чен-типа, установленных в объеме натрия. Для проверки работоспособности датчиков пустот измерялся ток питания каждого датчика. Длина чувствительной части датчиков пустот равна 6 мм (диаметр равен 0.65 мм). Изменение напряжения в диапазоне 11~14 мВ соответствует эквивалентному диаметру пустот, равному 6 мм (из предположения, что чувствительная часть полностью погружена в пустоту), с учетом зависимости измеряемых параметров от температуры. Момент времени, когда было зафиксировано первое акустическое событие (28.976 с, рисунок 11(б)), может быть интерпретирован как момент первого контакта горячего материала (смеси топлива с нержавеющей сталью) с натрием, также показан на рисунке 15. Показания датчиков пустот начинают изменяться за ~250 мс до первого акустического события.

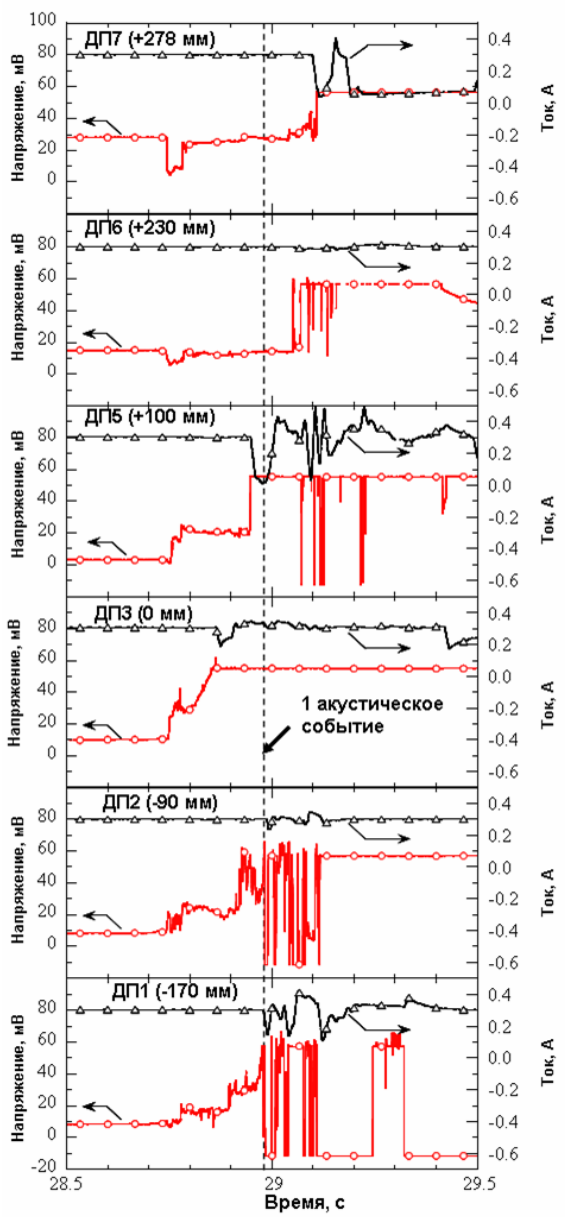


Рисунок 15. Показания датчиков пустот

Датчик пустот ДП1, который был размещен в нижней части, первым показал увеличение сигнала, соответствующего формированию пустот в натрии, в момент времени около 28.74 с. Другие датчики пустот ДП2, ДП3, ДП4 и ДП5, которые были расположены в объеме натрия, начали показывать увеличение сигнала поочередно в течение 15 мс. Датчики ДП6 и ДП7, которые в исходном состоянии находились выше поверхности натрия, показали увеличение сигнала, соответствующее приходу натрия, в моменты времени 28.74 с и 28.78 с, соответственно. Можно предположить, что эти датчики показывают кипение натрия перед разрушением стенки. Можно также предположить, что наиболее горячее пятно на поверхности стенки (в нижней части в области бассейна расплава), контактирующей с натрием, имело температуру выше температуры кипения натрия. Однако, динамика развития пустот, которая может быть оценена по показаниям датчиков пустот, не может быть определена по показаниям термопар. Отсутствие изменения температуры натрия в натриевом зазоре показывает, что основная часть жидкого натрия осталась неподвижной, и возможное кипение натрия, если таковое вообще имелось, имело локальный характер.

Увеличение температуры стенки было достаточно непрерывным перед и после начала развития пустот, зарегистрированного по показаниям датчиков пустот, и это показывает, что разрушение стенки никак не связано с возможностью развития таких пустот. Следует подчеркнуть, что аксиальные профили температуры стенок в момент разрушения подобны (как стенки со стороны газового зазора, так и стенки со стороны натриевого зазора), что является свидетельством их одинакового теплового состояния в этот момент (рисунок 14).

3.2. Тепловой поток от бассейна расплава

Очевидно, что показания термопары зависят от структуры горячего спая, определяющей его теплоемкость. Для того, чтобы оценить тепловой поток от бассейна расплава к внутренней поверхности стенки, с использованием кода TAC2D были проведены тепловые расчеты, в которых принимались во внимание геометрия и материальный состав горячего спая термопар. При проведении расчетов параметрически изменяли тепловой поток на стенку (изменяя гипотетическую температуру и теплопроводность расплава) и находили значение теплового потока, при котором воспроизводятся показания термопары TAC2. По результатам расчетов было получено, что тепловой поток от бассейна расплава к поверхности стенки составляет ~20 МВт/м^2.

Такой же высокий тепловой поток, более 10 МВт/м^2, наблюдался в некоторых экспериментах, выполненных в рамках программы SCARABEE [16]. В эксперименте BE+3 (эксперимент с полной мгновенной блокировкой топливной сборки из 37 твэлов) проплавление чехловой трубы из нержавеющей стали произошло через 21.5 с после блокировки, при этом было измерено значение теплового потока в области, граничащей с местом разрушения чехловой трубы. В этом эксперименте охлаждение в зазоре между сборками было достаточно интенсивным для того, чтобы предотвратить кипение натрия. Тепловой поток величиной 11 МВт/м^2 от поверхности стенки к натрию был зарегистрирован непосредственно перед разрушением стенки, которое произошло через 6.5 с после ожидаемого начала кипения стали в бассейне расплава. В эксперименте PVA (эксперимент по распространению расплава двуокиси урана и нержавеющей стали) проплавление стенки из нержавеющей стали между бассейном расплава и соседней сборкой произошло при самом высоком уровне мощности и после снижения расхода натрия по сборке. Хотя была

большая неопределенность при определении теплового потока, оценка, основанная на балансе тепла в локальной области между стенкой и натрием, показала, что его значение составляло 8~13 МВт/м^2. При таких условиях с очень высоким тепловым потоком стабильная корка топлива на стенке, вероятно, не была сформирована. При выполнении анализа эксперимента BF3 (эксперимент с равновесным состоянием кипящего бассейна расплава двуокиси урана и нержавеющей стали) с использованием кода AFDM [17], было показано, что присутствие насыщенной жидкой стали около внутренней поверхности тигля могло быть причиной увеличенного до ~15 МВт/м^2 теплового потока.

Таким образом, полученное в эксперименте WF высокое значение теплового потока (~20 МВт/м^2) согласуется с результатами, полученными в упомянутых выше экспериментах на реакторе SCARABEE.

Заключение

В рамках программы EAGLE на реакторе ИГР был успешно проведен эксперимент WF, при этом были получены следующие результаты:

1) Были подтверждены экспериментальные методы (по ядерному разогреву испытываемого топлива и измерениям), которые могут быть использованы в будущих полномасштабных экспериментах.

2) На основании экспериментальных результатов можно сделать предположение, что в случае контакта расплавленного топлива (которое генерирует высокий тепловой отток) со стенкой канала выведения расплава, расплав может разрушить стенку канала и начать перемещаться по каналу на очень ранней стадии.

Результат эксперимента WF - существенное доказательство раннего разрушения стенки, охлаждаемой натрием, и это послужит основанием для поддержки сценария «раннего выведения топлива» при проведении обоснования безопасности перспективных реакторов LMFBR. Механизмы формирования высоких тепловых потоков будут изучены далее с использованием результатов пост-экспериментальных исследований экспериментального устройства WF и результатов последующих крупномасштабных экспериментов.

Благодарности

Эта статья является результатом совместных исследований Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Japan Atomic Power Corporation (JAPC), которая является представителем 9 электрических компаний и Electric Power Development Company) и Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЯЦ РК) в рамках «Контракта по экспериментальным исследованиям на реакторе ИГР в целях увеличения безопасности реакторов FBR».

Авторы выражают признательность за поддержку господам O. Watanabe и N. Sawa (ARTECH), S. Kotake (JAPC), K. Yoshimura, Y. Doi и N. Uchiyama (Kawasaki Heavy Industries Ltd.), H. Matsumiya и H. Endo (Toshiba Corporation; H. Endo в настоящее время прикомандирован к JNES), Y. Shimakawa и K. Hayashi (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.), M. Ishida (в настоящее время уволился из Hitachi Ltd.), M. Isozaki, K. Ara, S. Nakai и H. Niwa (JAEA).

Эксперимент был подготовлен сотрудниками НЯЦ РК. За большой вклад в работу авторы выражают благодарность господам Алейникову Ю., Трухачеву А., Козловскому Е., Пащенко А., Богомоловой И. и другим участникам работы со стороны НЯЦ РК.

Литература

1. A Study of the Initiating Phase Scenario of Unprotected Loss-of-Flow in a 600MWe MOX Homogeneous Core / H. Endo [et al]. - IAEA IWGFR Technical Committee Meeting on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR, PNC-OEC, Japan, 1994.
2. Niwa, H. A Comprehensive Approach of Reactor Safety Research Aiming at Elimination of Recriticality in CDA for Commercialization of LMFBR / H. Niwa. – Proc. Int. Symp. on the Global Environment and Nuclear Energy System, Tsuruga, Japan, 1996.
3. Kotake, S [et al]. The R&D issues necessary to achieve the safety design of Commercialized Liquid Metal cooled Fast Reactors / S. Kotake [et al] // OECD/NEA/CSNI Workshop on Advanced Nuclear Rector Safety Issues and Research Needs, OECD, Paris, France, 18-20 February, 2002.
4. Role and Approach to the Recriticality Elimination with Utilizing the In-pile Test Reactor IGR / T. Inagaki and K. Aizawa [et al]. - 2nd Int. Conf. on Non-Proliferation Problem, Kurchatov, Republic of Kazakhstan, 1998.
5. H. Endo [et al]. Elimination of Recriticality Potential for the Consistent Nuclear Energy System/ H. Endo [et al] // Progress in Nuclear Energy - April 2002. - Vol. 40, № 3. - P. 577-586.
6. EAGLE Project: Experimental; Study on Elimination of the Re-criticality Issue during CDAs. (1) Predictive Analysis of Fuel Discharge and Quenching Phenomena in the In-pile Tests / K. Konishi [et al]. - I21 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, Hokkaido, Japan, 2001.
7. EAGLE Project: Experimental Study on Elimination of the Re-criticality Issue during CDAs. (3) Program and Results of non-sodium tests for out-of-pile tests / S. Kubo [et al]. - J39 Annual Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, Kobe, Japan, 2002.
8. EAGLE Project: Experimental Study for Advanced Safety of Fast Reactors, - Progress on the out-of-pile experiments and results of the melt discharge experiment - (Joint research document) / K. Kamiyama [et al]. JNC Report, JNC TY9400 2004-030, February, 2005.

9. Probe for Detection of Voids in Liquid Metals / J. C. Chen [et al] // The Review of Science Instruments. - Nov. 1968. - Vol. 39, № 11. - P. 1710-1713.
10. Sodium Boiling Experiments at Decay Power Levels (4) - Summary Assessment of the Low-Flow and Low-Heat-Flux Sodium Boiling Experiments at PNC / K. Yamaguchi [et al]. - PNC Report, PNC TN941 85-56, March 1985.
11. Sa. Kondo [et al]. Status and Achievement of Assessment Program for SIMMER-III, A Multiphase, Multicomponent Code for LMFR Safety Analysis / Sa. Kondo [et al] // Proc. 8-th Int. Top. Mtg. on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-8), Kyoto, Japan, September 30 – October 4, 1997.
12. Phase 2 Code Assessment of SIMMER-III, a Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis / Sa. Kondo [et al]. - JNC Report, JNC TN9400, 2000-105 p.
13. H. Yamano [et al]. SIMMER-IV: A Three-Dimensional Computer Program for LMFR Core Disruptive Accident Analysis, Version 2.A Model Summary and Program Description / H. Yamano [et al] // JNC Report, JNC TN9400, 2003-070, August 2003.
14. Toyooka, J. Pre-calculation of the Middle-Scale In-Pile Test in the EAGLE Project – 3-D Evaluation using the SIMMER-IV code - (Research Document) / J. Toyooka // JNC Report, JNC TY9400 2005-036, August, 2005.
15. Koyama, K [et al]. EAGLE Project: Experimental; Study on Elimination of the Re-criticality Issue during CDAs. criticality Issue during CDAs. (9) Application of neutronics calculation using a Monte-Carlo computer code / K. Koyama [et al] // D57, Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, 2004.
16. Kayser, G [et al]. SCARABEE Experimental Expertise on Failure Mechanisms of Stainless Steel Walls Attacked by Molten Oxide / G. Kayser [et al]. // ARS'94, Pittsburgh, April 1994.
17. Wilhelm, D [et al]. Analyzing the SCARABEE BF2 and BF3 Experiments with the AFDM Code / D. Wilhelm [et al] // ENC'94, Lyon, October 2-6, 1994.

ИГР ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫҢ ҚАУІПСІЗДІГІ МӘСЕЛЕЛЕРІ БОЙЫНША ЗЕРТТЕУЛЕР: EAGLE ЖОБАСЫ КӨЛЕМІНДЕ ӨТКІЗІЛГЕН ОРТАМАСШТАБТЫ КАМЕРАІШІЛІК ТӘЖІРИБЕ НӘТИЖЕЛЕРІ

[1)]Васильев Ю.С., [1)]Вурим А.Д, [2)]Гайдайчук В.А., [2)]Колодешников А.А., [2)]Пахниц А.В., [2)]Пахниц В.А., [2)]Маринин А.С., [2)]Шаповалов Г.В., [2)]Логачев Ю.В., [3)]K. Konishi, [3)]J. I. Sato, [4)]S. Kubo, [4)]S. Kotake, [5)]K. Koyama

[1)]Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы, Курчатов қ-сы
[2)]ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов қ-сы, Қазақстан
[3)]JAEA, O-arai, Жапония
[4)]JAPC, Жапония
[5)]ARTECH, Жапония

ҚР ҰЯО ИГР реакторында (Сепінді графиттік реактор) EAGLE бағдарламасы рамкасында қабырғаларды қирату бойынша эксперимент сәті өткізілді, онда ЖБҚ салмағы 2 кг уран диоксиді ядролық қыздырумен балқытылды. Осы экспериментте 3милимертлік тотанбайтын болат қабырға ЖБҚ және натрилі жылу тасымалдаушы 10 милиметрлі каналдың (натрилік саңылау) арасында орналасқан болатын. Әрекеттік үрдіс бойы ЖБҚ твэлдары аралас отынды - болатты балқытпа бассейні құрылғанға дейін қыздырылды.

Ядролық қыздыру жағдайында тоттанбайтын болат қабырға балқытпа бассейнімен қатты қыздырылып, қабырғаның қайта балқуына әкелді. Отынның натрилі саңырауына енуге қажетті уақыт өте аз болды (балқу бассейнінің құрылуынан кейін бір секундтан кем). Нәтижелер реактордың тылсым аймағының жылдам нейтронды сұйық металды жылу тасымалдаушысымен болжаулық апаттар нәтижелерінде құрылған реактордың тылсым аймағының балқытылған материалдары, тотықпайтын болат қабырғалардың апаттың ерте сатысында реактордың тылсым аймағы аумағынан бағытталған отынды шығаруға әкелетін қирау шекарасы үшін анықтау потенциалының барлығына сену мүмкіндігін береді. Бағытталған отынды шығарудың осындай жолының ерте құрылуы ұнамды қасиет ретінде қаралады және сындық жағдайының қайталануын жоққа шығарады. Осы мақалада қабырғаны қирату бойынша эксперимент нәтижелерінің алдын-ала есептелген бағасы ұсынылады.

RESEARCHES INTO ISSUES OF NUCLEAR FACILITIES SAFETY AT IGR RESEARCH REACTOR: RESULTS OF MEDIUM-SCALE IN-PILE EXPERIMENT CONDUCTED UNDER EAGLE PROJECT

[1)]Yu. S. Vasiliev, [1)]A.D. Vurim, [2)]V.A. Gaidaichuk, [2)]A.A. Kolodeshnikov, [2)]A.V. Pakhnits, [2)]V.A. Pakhnits, [2)]A.S. Marinin, [2)]G.V. Shapovalov, [2)]Yu.V. Logachev, [3)]K. Konishi, [3)]J. I. Sato, [4)]S. Kubo, [4)]S. Kotake, [5)]K. Koyama

[1)]National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov
[2)]Institute of Atomic Energy NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[3)]JAEA, O-arai, Japan
[4)]JAPC, Japan
[5)]ARTECH, Japan

WF (Wall Failure) test of the EAGLE program, in which ~2kg of uranium dioxide fuel-pins were melted by nuclear heating, was successfully conducted in the IGR (Impulse Graphite Reactor) of NNC/Kazakhstan. In this test, a 3mm-thick stainless steel (SS) wall structure was placed between fuel pins and a 10mm-thick sodium-filled channel (sodium gap). During the transient, fuel pins were heated leading to formation of a fuel-steel mixture pool. Under the transient nuclear heating condition, the SS wall was strongly heated by the molten pool leading to wall failure. The time needed for fuel penetration into the sodium-filled gap was very short (less than 1 second after the pool formation). The result suggests that molten core materials formed in the hypothetical core disruptive accidents of LMFBRs have certain potential to fail SS-wall boundaries early in the accident phase providing fuel escape paths from the core region. The early establishment of such fuel escape paths is regarded as a favorable characteristic to eliminate possibility of severe re-criticality events. Preliminary interpretation on the WF test results is presented in this paper.

УДК 539.172.13/.16

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ КАМЕРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ СЕЧЕНИЙ РАССЕЯНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ

[1)]Буртебаев Н., [1)]Сейтимбетов А.М., [1)]Зарифов Р.А., [1)]Павлова Н.Н., [1)]Исабекова Г.С., [1)]Керимкулов Ж.К., [1)]Кошелов А.М., [1)]Сатпаев Н.К., [2)]Бажажин А.Г., [2)]Корахужаев А.А.

[1)]Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан
[2)]Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент

В статье описана работа модернизированной камеры рассеяния, используемой в ядерно-физических экспериментах для получения дифференциальных сечений ядерных реакций в предельно широком интервале углов на 4-ом канале циклотрона У-150 ИЯФ НЯЦ РК, позволяющая проводить комбинированные измерения, а именно: при малых углах рассеяния (от 4º до 30º) и в широком диапазоне углов рассеяния частиц ($10° < \theta < 170°$). Прототипом настоящей камеры послужила конструкция реакционной камеры, описанная в работе [1]. Измерения в предельно малых углах достигаются усложнением конструкции камеры рассеяния.

Для измерений угловых зависимостей дифференциальных сечений ядерных реакций при больших углах в цилиндрической части камеры помещается на поворотных механизмах один, либо несколько полупроводниковых детекторов (ППД).

Реально это так называемые телескопы "ΔE - E " детекторов, которые в сочетании со специальной электронной схемой проводят раздельную регистрацию частиц различных масс и энергий. Для измерений угловых зависимостей сечений в области малых углов используется дальний телескоп, размещенный в удлиненном боковом кармане реакционной камеры, расстояния до которого в три ÷ четыре раза превышают расстояния до ближних телескопов.

Пучок частиц из ионопровода циклотрона через систему коллимирующих щелей поступает на исследуемую мишень, расположенную в центре камеры. Для быстрой смены мишеней, изменения ориентации мишеней относительно оси пучка, измерения толщины мишени и контроля ее в процессе эксперимента введен еще один механизм – мишенный блок, крепящийся к верхней части камеры. Он представляет собой диск с 8 отверстиями и электромеханическую систему для вращения и поворота диска на определенный угол относительно направления пучка. Все механические перемещения внутри камеры, находящейся в состоянии высокого вакуума, производятся дистанционно, за счет вращения шаговых двигателей, снабженных редукторами и сопряженных с каждым телескопом, а также мишенным блоком. Электронная система управлениям размещается снаружи камеры и подключается через фланец в днище камеры, где расположены 5 высоковакуумных многоконтактных электроразъемов.

В начальном варианте [1] система управления представляла собой набор нескольких промышленных приборов, объединенных в единую стойку и связанных через пульт управления автоматикой. В перечень основных узлов входили:

- блок управления шаговыми двигателями (БУШД) типа БУ-3-60;
- программный реверсивный счетчик типа Ф 5007;
- блок питания шаговых двигателей;
- генератор импульсов типа Г5-54;
- цифровой вольтметр - омметр В7-27;
- релейный коммутатор.

Специфика работы узлов внутри камеры заключается в том, что все они устанавливаются в нужное положение поочередно и в процессе собственно облучения пучком не изменяют своего положения.

Это позволяет иметь один БУШД и через коммутатор управлять шаговыми двигателями (ШД) поочередно, пользуясь тумблерами пульта управления.

Применение концевых выключателей (передняя автоблокировка – АП и задняя – АЗ) ограничивает движение телескопа по кольцу в пределах - 0÷180º.

Движение телескопа по кольцу через шестеренку передается на многооборотный потенциометр, изменение сопротивления которого служит сигналом обратной связи для контроля перемещения, т.е. каждый номинал сопротивления соответствует определенному углу поворота.

На каждое устройство предусмотрен отдельный тумблер:

Т1 - включает/выключает 1-ый телескоп "ΔE-E", расположенный на кольце К1.

Т2 - включает/выключает 2-ой телескоп "ΔE-E", расположенный на кольце К2 и снабженный теми же узлами, что и 1-ый телескоп, но работающий в пределах 180-360 градусов (в другом полукруге). Для кругового вращения 1- и 2-го телескопов применяются ШД средней мощности типа ШДР-721.

Т3 - включает/выключает дальний телескоп, перемещаемый с помощью маломощного шагового двигателя типа ШД-1С без датчика обратной связи, контроль его движения осуществляется визуально через окошко в заднем конусе камеры.

Т4 - включает/выключает механизм поворота мишенного блока (ПМБ), также на основе ШД-1С.

Т5 - включает/выключает механизм смены мишеней на мишенном блоке (МБ), управляемый ШД-

1С и снабженный проволочным потенциометром типа ППЗ-1А в качестве датчика обратной связи.

После сборки и отладки собственно камеры с вакуумной системой в процессе работы узлов управления элементами камеры выявились следующие недостатки прежней системы управления:

1. Полупроводниковые коммутаторы ШД, осуществляющие возбуждение обмоток, т.е. питание их импульсами определенной полярности, скважности и частоты, выполнены на устаревшей элементной базе, имеют увеличенные массу и габариты, а также продолжительный срок службы;

2. Программный реверсивный счетчик Ф5007 имеет для данной задачи большую аппаратурную избыточность. Чтобы показать это, достаточно перечислить основные технические возможности Ф5007:

а) режимы работы:

- реверсивный счет электрических сигналов по входам “А” и “Б”;
- счет двух независимых последовательностей импульсов по двум входам одновременно, как в режиме сложения сигналов “А” и “Б”, так и в режиме их вычитания;
- режим делителя частоты;
- режим формирователя заданного числа импульсов;
- режим ограничения числа, накапливаемого в счетчиках согласно предварительной записи с пульта максимального и минимального числа;

б) емкость счетчика 7 десятичных разрядов и 1-знаковый (+ или). Диапазон чисел от 10 до 9999999;

в) диапазон частот от 10Гц до 1МГц;

г) кроме ручного управления предусмотрено также дистанционное управление.

Многофункциональность прибора, реализованная на устаревшей элементной базе, увеличивает количество необходимых элементов, тем самым, снижая его надежность, а отсутствие переходных разъемов на основной плате для подсоединения функциональных плат ухудшает ремонтопригодность.

Для данной задачи, а именно, управления перемещением выбранного ШД на определенное расстояние необходим только режим формирования заданного числа импульсов с частотой, не превышающей 100 Гц, что намного ниже частоты приема ШД и тем самым исключаются возможные потери импульсов при работе в режиме разомкнутого шагового привода.

Из счетных режимов прибора необходим только режим вычитающего счетчика с емкостью счетного устройства, не превышающей 4 десятичных разрядов.

Большая аппаратурная избыточность в сочетании с низкой ремонтопригодностью, применение устаревших газоразрядных ламп на практике приводит к сбоям в процессе длительного непрерывного эксперимента, характерного для данного класса ядерно-физических исследований.

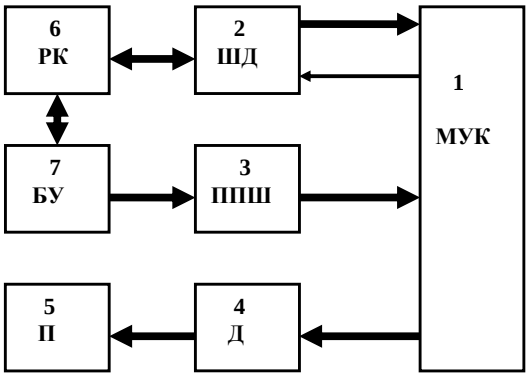
3. Цифровой вольтметр-омметр В7-27 или Щ300, применяемый для измерения сопротивлений в цепи обратной связи также давал сбои в процессе длительной работы в ходе эксперимента.

4. Хотя работа ШД внутри камеры не приводит к какому-либо изменению давления в камере, но если не отключать их обмотки после выполнения движения, возможен перегрев самих обмоток в условиях высокого вакуума.

5. Все перемещения внутри камеры могут производиться при одной, заранее определенной, скорости, поэтому применение промышленного программируемого генератора импульсов является также избыточным.

Все вышеперечисленные факторы показывают, что для увеличения надежности электронной аппаратуры и упрощения функций управления необходимо произвести модернизацию системы управления, а развитие элементной базы, в первую очередь микроэлектронной, позволило свести все функции, выполняемыми отдельными приборами, в единый интегрированный блок управления.

Тогда структура системы управления видоизменится:



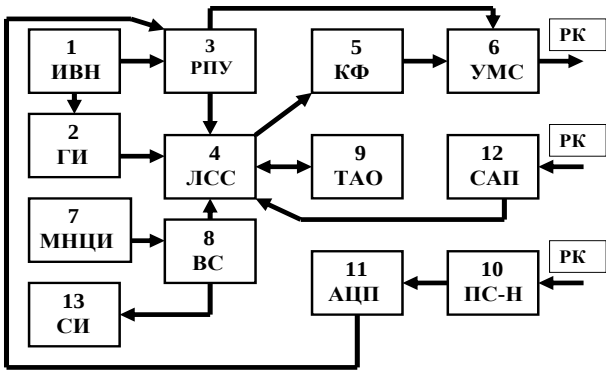
1- механические узлы камеры; 2-шаговые двигатели перемещения телескопов и мишенного блока внутри камеры; 3-привод перемещения шторок для источников калиброванного излучения; 4-полупроводниковые детекторы ППД; 5-предусилители ППД; 6-релейный коммутатор; 7-блок управления

Рисунок 1. Структура системы управления

Структурная схема единого блока управления показана ниже на рисунке 2.

В качестве источника питания используется трансформаторный блок с двухполупериодным выпрямителем и компенсационным стабилизатором последовательного действия с защитой от короткого замыкания по току и от перенапряжений на выходе.

Генератор импульсов построен на трех логических элементах “2И-НЕ“ с RC- цепью обратной связи, имеет частоту генерации 100Гц и форму импульса, близкую к меандру.



1-источник вторичных напряжений для блока;2-генератор импульсов;3-ручной пульт управления; 4-логическая схема совпадений; 5-коммутатор фаз ШД; 6-усилители мощности сигналов ШД; 7-микропульт набора цифровой информации; 8-вычитающий счетчик; 9-таймер автоматического отключения ШД; 10-преобразователь "сопротивление-напряжение"; 11-интегрирующий АЦП с индикацией; 12-схема автоблокировки перемещений; 13-схема индикации на матричных светодиодах.

Рисунок 2. Схема единого блока управления

Ручной пульт управления расположен на передней панели блока, включает в себя тумблеры включения/выключения ШД телескопов и мишенного блока, микротумблеры реверса и таймера, переключатели управления соленоидами шторок, кнопки пуска и останова движения выбранного ШД.

Коммутатор фаз ШД выполнен по схеме сочетания ИС ТТЛ-ПЗУ КР556РТ4 с двоичным реверсивным счетчиком К555ИЕ7 и реализует микропрограммный принцип распределения токов в фазах ШД [2]. Работа счетчика в режиме суммирования импульсов ГТИ производит выборку адресов ПЗУ таким образом, что ротор ШД вращается в одном направлении.

При вычитании импульсов ГТИ происходит изменение направления вращения ротора ШД. Это изменение обусловлено применением логической схемы "2И-НЕ" и микротумблера "Реверс" на передней панели блока. Управляющая микропрограмма составлена так, что выполняется следующий алгоритм коммутации обмоток четырехфазного ШД:

"1-12-2-23-3-34-4-41-1", что позволяет только электронным способом уменьшить минимальный угол единичного шага двигателя в 2 раза. В качестве усилителей мощности используются транзисторные инверторы на транзисторах p-n-p типа, что удобно как по экономичности, так и для монтажа на радиаторе. Вычитающий счетчик выполнен на базе ИС ТТЛ К555ИЕ6, на D -входы которых подается по команде "Запись" заранее набранный двоично-десятичный код, согласно весовой функции "8-4-2-1". При перемещении ШД импульсы с входа коммутатора фаз ШД параллельно поступают на вход вычитающего счетчика и постепенно уменьшают его содержимое до "0" В этот момент импульс переполнения с выхода вычитающего счетчика переключает режим триггера движения из состояния "Разрешение" в состояние "Запрет".

В этом состоянии логическая схема не пропускает импульсы с ГТИ на вход коммутатора фаз ШД. Вся информация о содержимом счетчиков наглядно отображается на светодиодных семисегментных индикаторах.

Таймер автоматического отключения питания ШД выполнен на базе RC-генератора на БИС К176ИЕ5, десятичного счетчика К561ИЕ8, триггера включения на ИС К561ТМ2 и герконовом реле. Работа таймера построена так, что при работе любого выбранного ШД он постоянно сбрасывается и только, когда позиции в камере расставлены и двигатели больше не работают, таймер успевает набрать необходимый интервал времени (30 мин) и после этого отключает источник питания "+24в" от усилителей ШД, тем самым, прекращая ток в их обмотках.

Преобразователь сопротивления в напряжение выполнен по трехпроводной схеме [3] на базе ИС операционного усилителя (ОУ) К553УД2, в цепь обратной связи которой входит изменяющееся сопротивление выбранного телескопа, а источником опорного напряжения служит прецизионный стабилитрон Д818Е. Напряжение с выхода ОУ подается на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), в качестве которого используется БИС КР572ПВ2А, изготовленный по технологии КМОП, работающий по методу двойного интегрирования и имеющий встроенные выходы, рассчитанные на работу с семисегментными светодиодными индикаторами с общим анодом.

Все телескопы имеют ограничивающие концевые микровыключатели, которые через соответствующие проводные соединения и контакты релейного коммутатора подключены к логической схеме совпадений, что позволяет автоматически отключать движение при достижении соответствующего микровыключателя.

В заключение следует отметить, что единый интегрированный блок управления в ходе проведения экспериментов показал высокую надежность и удобство в эксплуатации, наглядность результатов и в настоящее время используется в процессе экспериментальных ядерно-физических исследований на циклотроне У-150 ИЯФ НЯЦ РК.

Литература

1. Камера для измерений сечений рассеяния в области малых углов / Е.А.Романовский [и др.] // ПТЭ. – 1983. - № 5. - С. 28-31.
2. Лозовой, Л.Н. Микропрограммный блок управления четырехфазным шаговым электродвигателем / Л.Н.Лозовой // ПТЭ. – 1989. - №3. - С. 204-206.
3. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах /В.С.Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 74-80.

БӨЛШЕКТЕРДІҢ ШАШЫРАУ ҚИМАЛАРЫН ШАҒЫН БҰРЫШТАР БОЛҒАНДА ӨЛШЕУГЕ АРНАЛҒАН КАМЕРАНЫҢ ЭЛЕМЕНТТЕРІН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН ЖАҢҒЫРТУ

[1)]Буртебаев Н., [1)]Сейтимбетов А.М., [1)]Зарифов Р.А., [1)]Павлова Н.Н., [1)]Исабекова Г.С., [1)]Керимкулов Ж.К., [1)]Кошелов А.М., [1)]Сатпаев Н.К., [2)]Бажажин А.Г., [2)]Корахужаев А.А.

[1)]ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
[2)]Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясының ядролық физика институты, Ташкент

Мақалада ҚР ҰЯО ЯФИ – дің У-150 циклотронының 4-ші арнасында бұрыштардың шекті кең аралығында ядролық реакциялардың дифференциялық қималарын алу үшін ядролық-физикалық эксперименттерде пайдаланылатын шашырау камерасының жұмысы мазмұндалған, бұл қисындастырған өлшеулер жүргізуге, атап айтқанда: шағын шашырау бұрыштары болғанда (4° – тен 30° дейін) және бөлшектердің шашырау бұрыштарының кең ауқымында ($10° < \theta < 170°$), мүмкіндік береді. Осы камераның прототипі ретінде, [1] жұмыста баяндалған, реакциялық камераның құралымы алынды. Шашырау камерасының құралымын күрделендіру арқылы шекті шағын бұрыштарда өлшеулер жүргізуге қол жетеді.

MODERNIZATION OF CONTROL SYSTEM FOR ELEMENTS OF CHAMBER FOR PARTICLES SCATTERING CROSS-SECTION MEASUREMENT AT SMALL ANGLE

[1)]N. Burtebaev, [1)]A.M. Seytimbetov, [1)]R.A. Zarifov, [1)]N.N. Pavlova, [1)]G.S. Isabekova, [1)]Zh.K. Kerimklov, [1)]A.M. Koshelov, [1)]N.K. Satpaev, [2)]A.G. Bazhazhin, [2)]A.A. Korahuzhaev

[1)]Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan
[2)]Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences, Republic of Uzbekistan, Tashkent

The report describes operation of modernized scattering chamber used in nuclear experiments aimed at getting the nuclear reaction differential cross-sections within very wide interval of angles in 4^{th} channel of U-150 cyclotron in INP NNC RK, which enables to perform combined measurements, that is: with small scattering angles (from 4º to 30º) and in wide range of particles scattering angles ($10° < \theta < 170°$). Design of reaction chamber described in paper [1] is the prototype of the chamber. Measurement within very small angles is possible with complicated design of the scattering chamber.

УДК691.315.592.

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПРОДОЛЬНОЕ МАГНЕТОСОПРОТИВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ Р – ТИПА НА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ МАССАХ ПРИ J ‖ B ‖ [111]

Оразгулыев Б., Таймуратова Л.У.

Актауский государственный университет им. Ш.Есенова, Актау, Казахстан

Исследовано продольное магнитное сопротивление кремния р-типа при J ‖ B ‖ [111]. Определены насыщение и отрицательное ммагнитосопротивление, связанные с непараболичностью валентных подзон. Определено одноосное давление на магнитосопротивление. В заданном направлении увеличивается отрицательное магнитосопротивление, связанное с отрицательной эффективной массой.

Край валентной зоны кремния расположен в точке k=0 и двукратно вырожден, а третья зона из-за спин- орбитального взаимодействия отщеплена от зоны тяжелых и легких дырок на величину Δ=0,04эВ. При расчетах зонной структуры даже приведенное небольшое значение Δ уже приводит к непараболическому закону дисперсии в подзонах тяжелых и легких дырок. В случае тяжелых дырок, особенно в направлении [110] k- пространстве, отклонение от параболического закона движения становится существенным при энергиях в несколько миллиэлектронвольт.

Непараболичность валентных подзон кремния оказывает ощутимое влияние на гальваномагнитные эффекты, в особенности на магнетосопротивлении. В сильных магнитных полях продольное магнетосопротивление насыщается в направлениях [110] и [111], но не насыщается в направлении [100]. Поскольку энергия отщепленной валентной подзоны составляет всего 0,04эВ, то даже при комнатных температурах, когда $\kappa_Б$ T =0,026эВ, эта подзона заполнена незначительно ввиду небольших эффективных масс и плотности состояний в ней.

Распределение носителей по энергиям в сферической непараболической зоне вычислил Мац [1]. Это приближение использовали авторы [2] для вычисления зависимости подвижности тяжелых дырок от температуры. Зависимость $\mu \sim T^{-1,9}$ (μ- подвижность) в диапазоне от 50 до 100К следует из вычислений, в которых учитывается только рассеяние на акустических фононах. Отклонение значения показателя –1,9 от обычного значения – 1,5, соответствующего элементарной модели сферической зоны, обусловлено непараболическим законом дисперсии в подзоне.

Вследствие непараболичности подзоны тяжелых дырок эффективная масса электропроводности возрастает с температурой, так как в результате увеличения средней тепловой энергии $\kappa_Б T$ дырки занимают те уровни в подзоне, где непараболичность больше [3]. Как показали [4,5], непараболический закон дисперсии в зоне может привести к появлению отрицательного дифференциального сопротивления.

Исследования, проведенные в магнитных полях до 9 Тл показали, что зависимость коэффициента Холла от В в кремнии р – типа анизотропны [6]. Анизотропия магнетосопротивления увеличивающаяся с температурой также свидетельствуют в пользу непараболического закона дисперсии в подзоне тяжелых дырок.

Как видно из рисунка 1а, изоэнергетические поверхности тяжелых и легких дырок имеют вогнутые участки, где реализуются отрицательные эффективные массы [7].

Исходя из вышеприведенных, вполне реально предположить наблюдение отрицательного магнетосопротивления на отрицательных эффективных массах в кремнии.

Нами еще в шестидесятых годах было наблюдено отрицательные магнитосопротивление кремния р-типа и в дальнейшем подкреплено полученные данные новыми экспериментами в восьмидесятых годах. Считаем целесообразным, продолжить экспериментальные исследования магнетосопротивления кремния р- типа для выявления возможности применения результатов экспериментов по созданию на базе кремния генератора широкого диапазона частот, предложенного в 1958 году Крёмером [8], в котором используются особенности движения носителей заряда с отрицательными эффективными массами.

Прежде всего, мы выясним, при каких условиях возникают носители заряда с отрицательными эффективными массами.

Изменение состояния электрона в кристалле - квазичастицы со сложным законом дисперсии- может быть описано уравнением

$$\frac{dp}{dt} = F \,, \qquad (1)$$

где сила F создается электрическим и магнитным полем.

Для изотропного квадратичного закона дисперсии уравнение (1) имеет вид

$$m\frac{d\vartheta}{dt} = F \,, \qquad (2)$$

причем $\vartheta = \frac{p}{m}$. В случае анизотропного квадратичного закона дисперсии компонента скорости

$$\vartheta_\alpha = \frac{\partial \varepsilon(p)}{\partial p_\alpha} = \sum_\beta \frac{p_\beta}{m_{\alpha\beta}};\ \alpha,\beta = x,y,z \qquad (3)$$

а компонента ускорения

$$\frac{d\vartheta_\alpha}{dt} = \frac{d}{dt}\frac{\partial \varepsilon(p)}{\partial p_\alpha} = \frac{\partial}{\partial p_\alpha}\frac{d\varepsilon(p)}{dt} = \\ = \sum_\beta \frac{\partial}{\partial p_\alpha}\left(\frac{\partial \varepsilon(p)}{\partial p_\beta}\right)\frac{dp_\beta}{dt} = \sum_\beta \frac{\partial^2 \varepsilon(p)}{\partial p_\alpha}\frac{dp_\beta}{\partial p_\beta dt}, \qquad (4)$$

Поскольку

$$\frac{1}{m_{\alpha\beta}} = \frac{\partial^2 \varepsilon(p)}{\partial p_\alpha \partial p_\beta}, \text{ а } \frac{dp_\beta}{dt} = F_\beta$$

-компонента силы вдоль направления β,

$$\frac{d\vartheta_\alpha}{dt} = \sum_\beta \frac{1}{m_{\alpha\beta}} F_\beta \qquad (5)$$

Уравнение (5) можно записать и в форме

$$\frac{d\vartheta}{dt} = m^{-1}F \text{ или } m^{-1} = \nabla_p \nabla_{p\varepsilon}(p) \qquad (6)$$

Тензорный характер эффективной массы показывает, что движение электрона проводимости под воздействием электрического и магнитного полей существенно отличается от движения свободного электрона с изотропной массой m_0.

При произвольном угле между действующей силой F и главными осями тензора обратной эффективной массы направление ускорения электрона не будет совпадать с направлением силы.

Согласно уравнению движения (6) электрическое поле E, направленное вдоль одной из главных осей тензора, будет ускорять электрон. Так как если бы он обладал скалярной массой m_α, равной обратной величине соответствующего главного значения тензора $1/m_\alpha$, независимо от того, каковы два других главных значения тензора. Для электрического поля произвольного направления ускорение электрона будет, вообще говоря, не параллельно приложенной силе. В этом случае можно разложить вектор ускорения на две составляющие - параллельную и перпендикулярную приложенной силе. Естественно, что интерес представляет только параллельная составляющая ускорения, и задача заключается теперь в том, чтобы найти скалярную эффективную массу в направлении действия силы, независимо от того, каково значение перпендикулярной составляющей ускорения .

Пусть ℓ- единичный вектор в направлении приложенного электрического поля E. Умножая правую и левую части уравнения движения (6) скалярно на ℓ, получаем выражение для параллельной составляющей уравнения $\left(d\vartheta/dt\right)_\ell$:

$$\left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)_\ell = \left(\ell\frac{d\vartheta}{dt}\right) = \left(\ell m^{-1}F\right) = \left(F\ell m^{-1}\ell\right) = Fm_\ell^{-1}$$

Отсюда

$$m_\ell^{-1} = \left(\ell m^{-1}\ell\right) \qquad (7)$$

Величина m_ℓ (7) называется эффективной массой в данном направлении. В общем случае, когда изоэнергетические поверхности имеют более сложную форму, чем эллипсоиды, эффективная масса в данном направлении ℓ есть функция волнового вектора, то есть m_ℓ (к)- это эффективная масса в направлении ℓ в точке **к**обратного пространства.

Согласно уравнению (7) эффективная масса в каком-либо направлении может быть отрицательной, если отрицательна вторая производная энергии по волновому вектору в этом направлении.

Рассмотрим те условия, при которых производная может быть отрицательной.

Рассмотрим для $k\neq 0$ два случая, соответствующих двум взаимно перпендикулярным направлениям электрического поля.

1. Электрическое поле E (то есть и ℓ) параллельно волновому вектору *k*. Тогда эффективная масса m_ℓ, которую мы назовем продольной массой, при удалении от края в глубь энергетической зоны не может стать отрицательной вплоть до энергии порядка половины ширины всей зоны.
2. Электрическое поле E перпендикулярно *k*. В этом случае эффективная масса m_ℓ, которую можно назвать поперечной массой, может оказаться отрицательной даже в непосредственной окрестности края энергетической зоны. Необходимым и достаточным условием для этого является вогнутость изоэнергетических поверхностей в области вблизи рассматриваемого вектора к . Такие вогнутые на определенных участках изоэнергетические поверхности реализуются в непосредственной близости от вырожденного края валентной зоны при $k=0$, например в кремнии, где закон дисперсии дырок описывается неаналитической функцией.

Отрицательные эффективные массы в кремнии в направлении [100]. Край валентной зоны кремния расположен в точке $k=0$ и двукратно вырожден. Форма зон тяжелых и легких дырок кремния вблизи $k=0$ описывается выражением:

$$\varepsilon(k) = \frac{\hbar^2}{2m_0}\left\{Ak^2 \pm \left[\begin{matrix} B^2k^4 + \\ +C^2\left(k_x^2k_y^2 + k_y^2k_z^2 + k_z^2k_x^2\right)\end{matrix}\right]^{1/2}\right\} \qquad (8)$$

где A, B, C- безразмерные константы, равные соответственно 4±0,1;1,1±0,4; 4,1±0,4.

Знак плюс перед корнем в (8) соответствует зоне легких дырок, минус – зоне тяжелых дырок. Изоэнергетические поверхности тяжелых дырок имеют

вогнутые участки, где реализуются отрицательные поперечные эффективные массы.

Член с C^2 ответствен за отклонение изоэнергетических поверхностей от сферической формы и, значит, за появление отрицательных поперечных эффективных масс. При $C^2>0$ расщепление между двумя энергетическими зонами наибольшее в направлении [111] и наименьшее – в направлении [100]. При $C^2<0$ отрицательных эффективных масс в зоне тяжелых дырок нет, но они возможны в зоне легких дырок.

Строгий расчет геометрии областей отрицательных эффективных масс на основании уравнения (8) приводит к уравнениям более высокого порядка, чем (8), которые не могут быть решены аналитически. Разлагая корень в (8) в ряд, имеем

$$\varepsilon(k)=\frac{\hbar^2}{2m_0}\left(\alpha_0 k^2-\beta_0\frac{k_x^2k_y^2+k_y^2k_z^2+k_z^2k_x^2}{k^2}\right), \quad (9)$$

где $\alpha_0=A-B$; $\beta_0=C^2/2B$. Для кремния $\alpha_0=3{,}53$; $\beta_0=18{,}4$. Величина β_0, как следует из (9), есть мера отклонения поверхностей постоянной энергии от сферической формы.

Выберем оси координат таким образом, чтобы направление [100] совпадало с осью x, направление [110]-с диагональю между осями x и y, а направление[111] с пространственной диагональю между тремя осями x, y ,z. Тогда эффективные массы в направлениях [100], [110] ,[111] можно, согласно тензором обратной эффективной массы.

$$\left(m_{\alpha\beta}^{-1}\right)_n=\frac{1}{\hbar^2}\left(\frac{\partial^2\varepsilon_n(k)}{\partial k_\alpha\partial k_\beta}\right)_{k_0}, \quad (10)$$

Записать в виде

$$\frac{1}{m_{100}}=\frac{1}{\hbar^2}\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x^2}, \quad (11)$$

$$\frac{1}{m_{110}}=\frac{1}{\hbar^2}\left(\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x^2}+\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_y^2}+2\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x\partial k_y}\right), \quad (12)$$

$$\frac{1}{m_{111}}=\frac{1}{\hbar^2}\left(\begin{array}{l}\dfrac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x^2}+\dfrac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_y^2}+\dfrac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_z^2}+\\ +2\dfrac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x\partial k_y}+2\dfrac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_y\partial k_z}+2\dfrac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_z\partial k_x}\end{array}\right), \quad (13)$$

Компоненты тензора обратной эффективной массы находим из закона дисперсии тяжелых дырок (9):

$$\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x^2}=\frac{\hbar^2}{m_0}\left\{\alpha_0-\frac{\beta_0}{k^6}\left(k_y^4+k_y^2k_z^2+k_z^4\right)\left(-3k_x^2+k_y^2+k_z^2\right)\right\}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2\varepsilon}{\partial k_x\partial k_y}=-\frac{\hbar^2}{m_0}\frac{2\beta_0k_xk_y}{k^6}\left(2k_x^2k_y^2+k_y^2k_z^2+k_z^2k_x^2-k_z^4\right), \quad (15)$$

Остальные компоненты тензора (10) легко получаются циклической перестановкой. Из уравнений (11)и (14) можно найти эффективная массу в направлении [100] (ось k_x)

$$\frac{1}{m_{100}}=\frac{1}{m_0}\left\{\alpha_0-\frac{\beta_0}{k^6}\left(k_y^4+k_y^2k_z^2+k_z^4\right)\left(-3k_x^2+k_y^2+k_z^2\right)\right\}, \quad (16)$$

Нетрудно видеть, что эффективная масса m_{100} будет отрицательной на осях [010] и [001] и в некоторой близости от них, если

$$\beta_0>\alpha_0 \text{ или } C^2/2B>A-B, \quad (17)$$

Это условие легко выполняется для кремния. Поперечная эффективная масса на самих осях [010] и [001] равна

$$\frac{1}{m_{100}}=\frac{1}{m_0}(\alpha_0-\beta_0), \quad (18)$$

Из соображений симметрии следует, что эффективная масса m_{010} в направлении y отрицательна вокруг осей k_x и k_y (рисунок 2а).

Рассмотрим теперь конусы отрицательных эффективных масс в направлениях [110] и [111]. Выражения (12), (14) и (15) позволяют определить эффективные массы в направлениях типа [110] (рисунок 2б). Для эффективной массы m_{100} на осях [100] и [010] находим

$$\frac{1}{m_{100}}=\frac{1}{m_0}\left(\alpha_0-\frac{1}{2}\beta_0\right), \quad (19)$$

Эти значения эффективной массы отрицательны для кремния. На оси [001] (ось k_z) эффективная масса m_{110} оказывается равной массе m_{100} (18).

У кремния эффективные массы вдоль диагоналей грани отрицательны на всех главных осях, но конусы вокруг тех двух главных осей, которые не перпендикулярны данной диагонали грани, узки.

Для определения граничной конической поверхности пренебрежем, как и в случае эффективной массы m_{100} всеми членами выше второго порядка по k_x и k_y. Тогда из уравнений (12), (14) и (15) следует

$$\frac{1}{m_{110}}=\frac{1}{m_0}\left(\alpha_0+\frac{\beta_0}{2}\frac{k_x^2+4k_xk_y+k_y^2-2k_z^2}{3k_x^2+3k_y^2+k_z^2}\right), \quad (20)$$

Приравнивая выражение (20) нулю, получаем для граничной конической поверхности

$$\frac{6\alpha_0+\beta_0}{2(\beta_0-\alpha_0)}\left(k_x^2+k_y^2\right)+\frac{2\beta_0}{\beta_0-\alpha_0}k_xk_y-k_z^2=0, \quad (21)$$

Это уравнение эллиптического конуса, у которого оси эллипса повернуты на $\pi/4$ по отношению к осям [100] и [010].

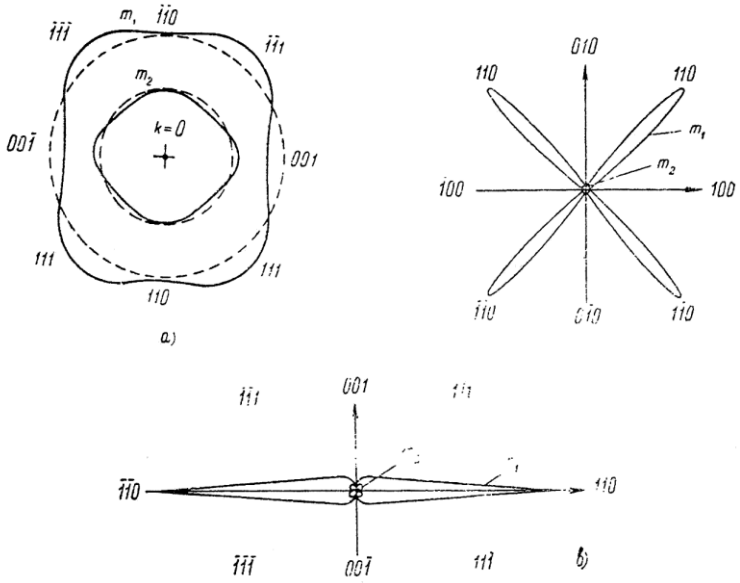


Рисунок 1. Вид изоэнергетических контуров тяжелых и легких дырок кремния: а) в плоскости[110] при энергиях дырок, много меньше Δ, б) в плоскости [001] , в) в плоскости [110] при энергиях дырок, Δ. Риунки б) и в) примерно на порядок меньше, чем рисунок а)

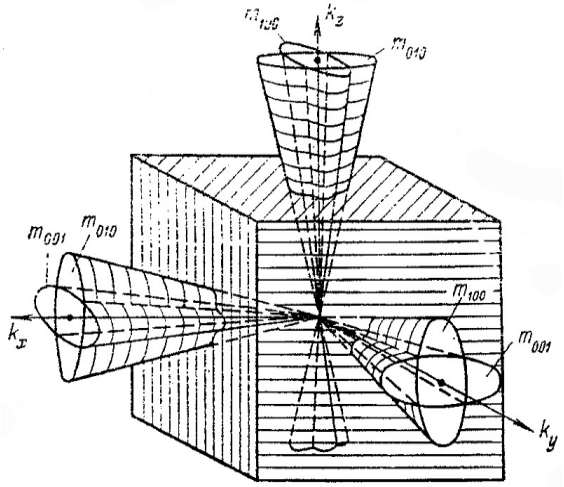


Рисунок 2. Области отрицательных эффективных масс для трех направлений типа [100] при значениях C^2, лишь немного больших, чем 2B (A-B)

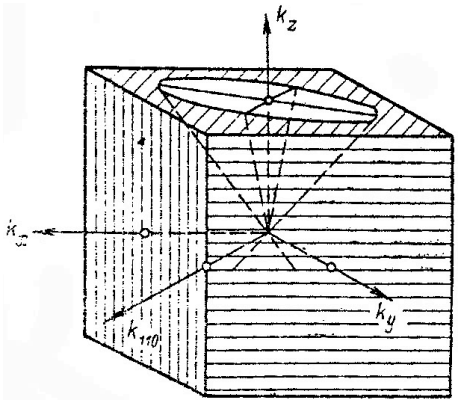


Рисунок 2б. Конус эффективной массы m_{110}.

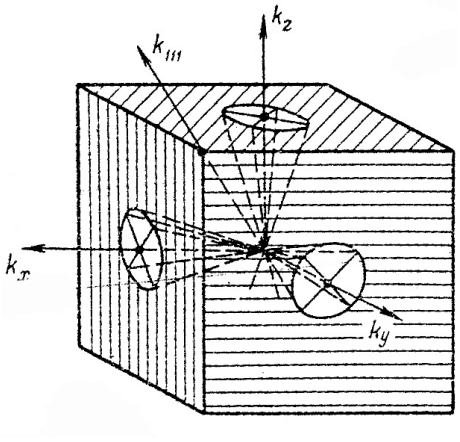


Рисунок 2в. Конус эффективной массы m_{111}.

Выражение для эффективной массы в направлении [111] можно найти, пользуясь формулами (13), (14) и (15):

$$\frac{1}{m_{111}} = \frac{1}{m_0}\left(\alpha_0 - \frac{2}{3}\beta_0\right), \qquad (22)$$

Эта эффективная масса отрицательна для кремния m_{111}= -0,11m_0. Вокруг каждой из главных осей будет конус отрицательных эффективных масс (рисунок 2в)

Рассмотрим конус вокруг оси k_z . Пренебрегая снова всеми членами выше второго порядка по k_x и k_y, получаем

$$\frac{1}{m_{111}} = \frac{1}{m_0}\left[\alpha_0 - \frac{\beta_0}{3}\frac{2k_z^2 - \left(k_x + k_y\right)^2}{3k_x^2 + 3k_y^2 + k_z^2}\right], \qquad (23)$$

Конус эффективной массы m_{111} эллиптический. Главные оси эллипса направлены вдоль диагоналей грани куба.

Все приведенные вычисления и оценки показывают, что области отрицательных эффективных масс в кремнии имеют различную форму для масс в различных направлениях. Общим для всех рассмотренных случаев является то, что области отрицательных эффективных масс имеют конические границы и не содержат осей типа [111]. Они всегда расположены вокруг осей типа [100]. Среди трех рассмотренных случаев конусы отрицательных эффективных масс в направлениях [111] наиболее узкие. Кроме того, эффективные массы m_{111} представляют интерес и в том отношении, что только в этом случае оси конусов не перпендикулярны направлению, в котором рассматриваются эффективная масса.

Если эффективная масса проводимости носителей заряда принимает отрицательное значение, то и сопротивление образца будет отрицательным. Помещая такой образец в магнитное поле можно наблюдать отрицательное магнетосопротивление, что и сделано нами.

Экспериментальные результаты, полученные на кристаллах кремния р- типа измерением продольного магнетосопротивления по кристаллографическим направлениям [111], [110]и [001] показали, что анизотропия магнетосопротивления свидетельствует в пользу непараболического закона дисперсии в подзоне тяжелых дырок. (рисунок 3).

Согласно классической теории в сильных магнитных полях, когда $\omega\tau \gg 1$, $\hbar\omega_H \ll k_Б T$ магнетосопротивление должно насыщаться. Действительно, наблюдается полное насыщение магнетосопротивления в области сильных магнитных полей во всех кристаллографических направлениях. Однако, в случаях J ‖ B ‖ [111] и J ‖ B ‖ [110] на кривых магнетосопротивления появляется и спад, то есть отрицательное магнетосопротивление. Оно не связано с квантованием энергии носителей тока в магнитном поле, так как не выполняется условие квантования ($\hbar\omega_H \ll k_Б T$).

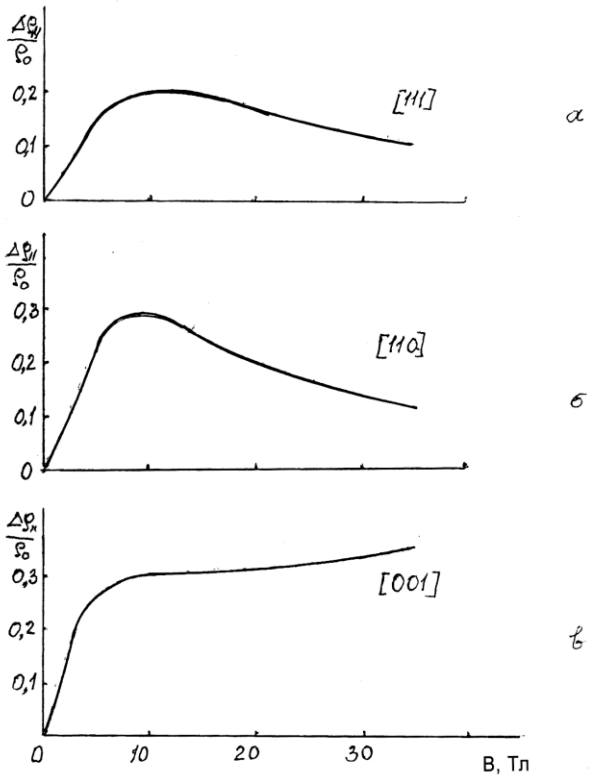


Рисунок 3. Продольное магнетосопротивление кремния р – типа $\rho_{300K} = 300 Ом \cdot см$ *, Т=77,4К*

Для выяснения причины возникновения отрицательного магнетосопротивления, исследуемые образцы подверглись одноосной упругой деформации.

Как видно из рисунков (рисунок 4а,в) одноосная упругая деформация не снимает спада (т.е. отрицательного магнетосопротивления), а наоборот несколько усиливает его, а магнетосопротивления по мере увеличения давления постепенно уменьшается и при достижении величины $6 \cdot 10^3$ кГ/см² перестает зависеть от него.

В области насыщения пьезосопротивления, спадающая часть магнетосопротивления пересекает нулевую линию, образуя отрицательное магнетосопротивление, тогда как для направления [001] такой спад отсутствует, а наоборот, наблюдается некоторый подъем.

Очевидно, такое поведение магнетосопротивления является характерной особенностью данного кристаллографического направления [001]. Сообщается, например, что продольное магнетосопротивление германия р- типа не насыщается в направлении [001] [10]. Такие результаты на кремнии р- типа нами сообщалось в работе [11] еще раньше чем в [10]. Поэтому результаты работы [10] являются как бы подтверждением экспериментальных исследований [11].

Гальваномагнитные эффекты в кремнии р- типа в некоторых отношениях отличаются от аналогичных

явлений в германии р- типа. Это объясняются тем, что энергия отщепленной валентной подзоны в кремнии составляет всего 0,04эВ (а в германии – 0,28эВ) что и приводит к непараболическому закону дисперсии в подзонах тяжелых и легких дырок. Объяснение этому дается на рисунке 2а, так что при удалении от направлении [010] и [001] значение $1/m_{100}$ убывает по абсолютной величине до нуля и в конце концов становится положительным.

Непараболичность в направлении [110] становится существенной при энергиях в несколько миллиэлектронвольт, а при больших энергиях изоэнергетическая поверхность подзоны тяжелых дырок в данном направлении вспучивается (рисунок 1в).

В области насыщения пьезосопротивления спадающая (отрицательная) часть магнитосопротивления пересекает нулевую линию, образуя отрицательное магнитосопротивление. При этом насыщающаяся часть магнетосопротивления в случае X ‖ J ‖ B ‖ [111] по величине уменьшается в два раза, в случае X ‖ J ‖ B ‖ [110] – почти в три раза и в случае X ‖ J ‖ B ‖ [001] – в три раза (рисунок 4).

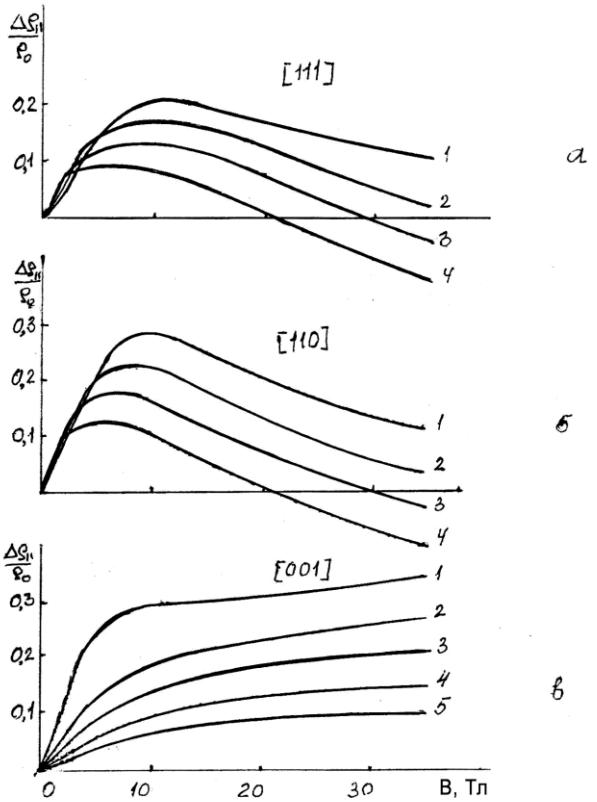


Рисунок 4. Зависимости $\frac{\Delta\rho_{II}}{\rho_0} = f(H)$ *кремния при различных значениях X 10^{-3}, кГ/см^2: 1-X=0,2-2,3-4,4-6,5-7.* ($\rho_{300K} = 300 Ом \cdot см$), *T=77,4K*

При приложении к кристаллу кремния одноосной упругой деформации сжатия наряду с переселением легких дырок в зону тяжелых дырок , происходит перестройка зонного спектра, приводящая к тому, что с увеличением давления тяжелые дырки становится легче, подвижность их увеличивается, а величина пьезосопротивления соответственно уменьшается, следовательно, уменьшается и величина магнетосопротивления.

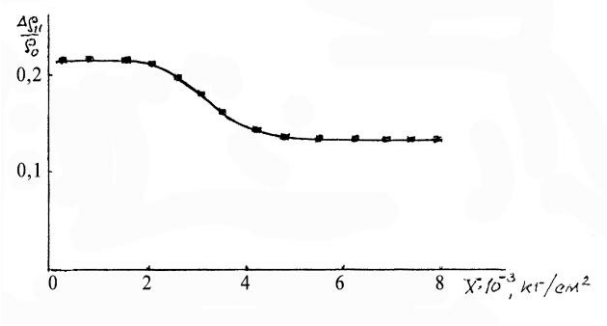


Рисунок 5. Зависимость магнетосопротивления кремния р – типа от одноосного давления при B_{const}*=12Тл* ($\rho_{300K} = 40 Ом \cdot см$)

На рисунке 5 приведены зависимость магнетосопротивления от давления (при B_{const}=12Тл). С увеличением давления магнетосопротивление постепенно начинает уменьшаться, а при достижении величины $X \geq 4{,}5 \cdot 10^3$ кГ/см² перестает зависеть от него. Это объясняется тем, что при больших деформациях магнетосопротивление обусловлено носителями заряда только лишь зоны $M_J = \pm ½$, изоэнергетическая поверхность которой эллипсоидальна.

Опыты по циклотронному резонансу на одноосно деформированном кремнии р – типа, проведенные в [12] показали, что при увеличении деформации резонансные линии легких и тяжелых дырок исчезают и появляется новая линия, соответствующая дыркам, верхний из расщепившихся валентных зон. По эффективной массе эти дырки занимают среднее (промежуточное) положение между легкими и тяжелыми дырками.

Отметим, что полупроводники, имеющие носители заряда с отрицательными эффективными массами и у которых вероятность рассеяния этих носителей на оптических фононах велика, могут служить для усиления или генерации СВЧ колебаний.

В заключение отметим, что наши экспериментальные данные допускают изготовления СВЧ генераторов на базе кремния, как самого подходящего среди всех известных полупроводников.

Литература

1. Matz, D. Hot- carrier distribution function in Semiconductors Nonparabolic Energy bands / D.Matz // J. Phys. Chem. Solids. – 1967. - V.28, №3. - P.373-382.
2. Asche, M. On the Temperature Dependence of Hole Mobility in Silicon / M.Asche, J.Borʒesʒkowski //Phys. Stat. Solidi. – 1970. - V.37, №2. - P. 433-438.
3. Stradling R.A, Cyclotron Resonance of Electrons in Silicon at Temperatures up to 200°K. / R.A.Stradling, V.V. Zhukov //Proc. Phys. Soc. – 1965. - V.87, №2. - P. 263-271.
4. Persky, G. Negative Differential mobility in Nonparabolic Bands /Persky G. , Bartelink D. J. //Bull. Am. Phys. Soc. – 1969. - V.14. - P. 748-749.
5. Pawcett, W. Negative differential mobility in Indium Antimonide / W. Pawcett, J.G.Ruch //J. Appl. Phys. Letter. – 1969. - V.15, №11. - P. 368-370.
6. Miyaʒawa H. , Suʒuki K. , Maeda H. //Phys. Rev. – 1963. - v. 131. - p. 2442.
7. Цидильковский, И.М. Электроны и дырки в полупроводниках /И.М.Цидильковский. - М.: Наука, 1972. - С.237.
8. Krȍmer, H. The physical principles of a negative mass amplifier /H.Krȍmer //Proc. IRE. – 1959. - V.47. - P.407.
9. Dousmanis, G. [et al] //Phys. Rev. Lett. – 1958. - v.1. - p.404.
10. Зеегер, К. Физика полупроводников/ К.Зеегер. - М.: ИЛ, 1977. - С.354.
11. Оразгулыев, Б. Измерение магнитосопротивления кремния р- типа в сильных магнитных полях / Б.Оразгулыев //ФТТ. – 1966. - Т.8. - С. 2780-2782.
12. Hense, J.C. Cyclotron Resonance Exporiments in Uniaxially Stressed Silicon: Valence Band Inverse Mass Parameters and Deformation Potentials / J.C.Hensel, G.Feher //Phys. Rev. – 1963. - V.129, №3. - P. 1041-1062.

ТЕРІС ЭФФЕКТИВТІ МАССАМЕН J ‖ B ‖ [111] ЖАҒДАЙДАҒЫ Р-ТИПТІ КРЕМНИЙДІҢ ТЕРІС ҚУМА МАГНИТТІК КЕДЕРГІСІ

Оразгулыев Б., Таймуратова Л.У.

Ш.Есенов атындағы Ақтау мемдекеттік университеті, Ақтау, Қазақстан

р-типтегі J ‖ B ‖ [111] жағдайдағы кремнийдің қума магнетокедергісі зерттелді. Ауыр тесіктің параболалық емес зонасымен байланысты, магнеткедергінің қанығуы, сондай-ақ, теріс магнеткедергі бақыланды. Магнетокедергіге біросьті қысымның әсер етуі анықталды. Берілген бағытта теріс эффективті массамен байланысқан, магнетокедергінің теріс бөлігі күшейеді, ол магнеткедергінің шамасын үш есеге азайтады.

NEGATIVE LONGITUDINAL MAGNETORESISTANCE OF SILICON P - TYPE AS ON NEGATIVE EFFECTIVE WEIGHTS AT J ‖ B ‖ [111]

B. Orazguliev, L.U. Taimuratova

Sh.Esenov name Aktau state university, Aktau, Kazakhstan

This article considered an influence of uniaxially stressed on magneticresistance. It also considered that it decreases longitudinalof magneticresistance three times and increases the negative part of magneticresistance, depending on negative effective mass in this direction.

УДК: 621.039.572

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ТОПЛИВОМ НИЗКОГО ОБОГАЩЕНИЯ И ВЫГОРАЮЩИМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозоров А.А., Токтаганов М.О., Кимолаев Ж.Б., Сушков В.А.

Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье представлены результаты экспериментов на реакторе ИВГ.1М, проведенные в рамках выполнения работ по теме «Разработка и обоснование концепции модернизации активной зоны реактора ИВГ.1М». Представлены результаты, полученные при проведении физических исследований с целью определения влияния размещения в экспериментальном устройстве выгорающего поглотителя. Проведено сравнение результатов расчетов, выполненных с использованием расчетной программы MCNP5, с экспериментальными данными.

ВВЕДЕНИЕ

В Казахстане одобрена концепция развития атомной энергетики страны, включающая строительство атомных электростанций (АЭС). В то же время мировая практика эксплуатации промышленных и экспериментальных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) показала, что развитие атомной энергетики возможно только при условии обеспечения высокой степени безопасности этих установок.

Руководствуясь рекомендациями МАГАТЭ, и в соответствии с научно-технической программой по развитию атомной энергетики в Республике Казахстан в ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК проводятся работы по исследованию возможности снижения обогащения топлива реактора ИВГ.1М. Снижение обогащения ядерного топлива исследовательских реакторов является основной задачей по нераспространению ядерно-опасных материалов.

Для обоснования возможности перевода реактора ИВГ.1М на низкообогащенное топливо проведена серия нейтронно-физических расчетов параметров активной зоны с различными конфигурациями топливных сборок и физические исследования с топливом низкого обогащения.

Целью физических исследований являлась проверка корректности расчетной методики определения влияния выгорающего поглотителя тепловых нейтронов на нейтронно-физические параметры активной зоны (АЗ) реактора ИВГ.1М.

УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для получения экспериментальных данных о влиянии выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики системы «ЭУ с топливом низкого обогащения – реактор ИВГ.1М» было разработано ЭУ с двумя типами тепловыделяющих сборок (ТВС):

- ЭУ с ТВС, состоящей из 10 модельных твэлов и 5 стержневых поглотителей;
- ЭУ с ТВС, состоящей из 10 модельных твэлов без стержневых поглотителей.

Предварительно для определения оптимальной конфигурации модельной ТВС с топливом типа БН-350 с обогащением 17 % по ^{235}U и выгорающим поглотителем на основе B^{10} были проведены нейтронно-физические расчёты для двух вариантов модели ЭУ:

Результаты расчетов нейтронно-физических характеристик системы «ЭУ с топливом низкого обогащения – реактор ИВГ.1М» приведены в таблице 1.

Физические исследования включали в себя два эксперимента с топливом низкого обогащения: эксперимент с использованием ЭУ без выгорающего поглотителя и эксперимент с использованием ЭУ с выгорающим поглотителем. Схема и внешний вид ЭУ представлены на рисунке 1.

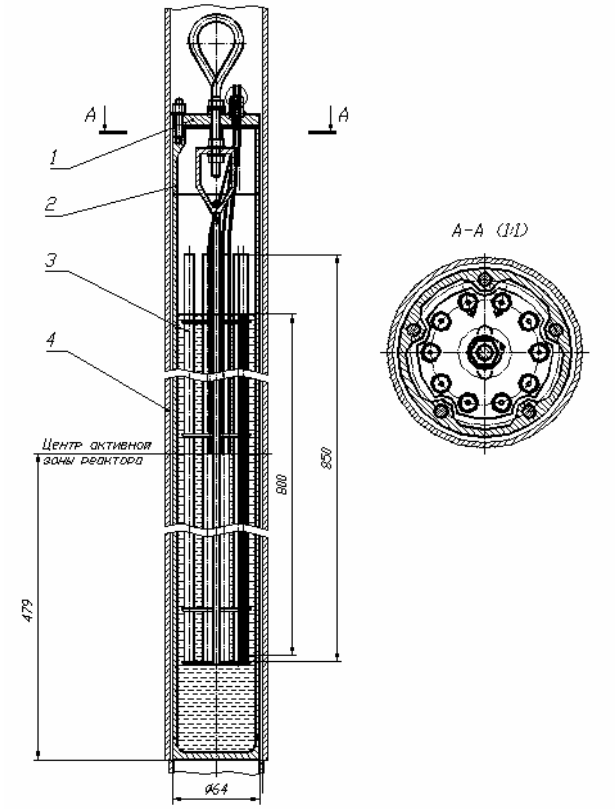
ТВС без выгорающего поглотителя представляет собой однорядную сборку из 10 модельных твэлов, 2 из которых были измерительными твэлами, оснащенными топливными таблетками, калиброванными на содержание ^{235}U. Оболочка твэлов была изготовлена из циркониевого сплава Э110 (рисунок 2).

Активная часть модельного твэла состояла из 85 топливных таблеток типа БН-350 с обогащением ~17 % по ^{235}U. Высота активной части составляла ~800 мм.

Общая масса диоксида урана с обогащением 17 % в модельной ТВС составила 1995 г. Длина модельной ТВС – 850 мм, наружный диаметр – 50 мм.

Таблица 1. Результаты нейтронно-физических расчетов

Вариант модели	Эффективный коэффициент размножения, $K_{эф}$	Соотношение топливо/реактор, (кДж/г UO_2)/кДж ИВГ.1М	Запас реактивности, $\rho,\beta_{эф}$
10-твэльная ТВС с пятью стержневыми поглотителями	1,026579	$1,23\times10^{-5}$	4,045415
10-твэльная ТВС без стержневых поглотителей	1,052511	$2,15\times10^{-5}$	7,795424



1 – крышка ЭУ, 2 – корпус ЭУ, 3 – модельная ТВС, 4 – экспериментальный канал

а – Схема ЭУ



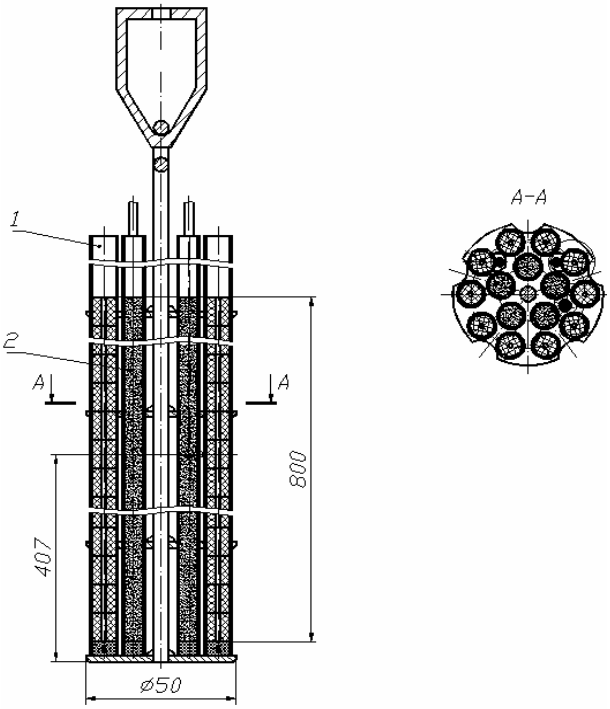
б – модельная ТВС перед установкой в корпус ЭУ

Рисунок 1. Экспериментальное устройство без стержневых поглотителей



Рисунок 2. Топливные таблетки типа БН-350 и оболочка модельного твэла, использованные для оснащения ТВС с топливом низкого обогащения

ЭУ с выгорающим поглотителем (рисунок 3) представляет собой двухрядную сборку из твэлов и поглощающих стержней. Наружный ряд состоит из 10 модельных твэлов, внутренний ряд – из 5 поглощающих стержней. Один измерительный твэл оснащался топливными таблетками, калиброванными на содержание ^{235}U для последующих спектрометрических измерений. В качестве поглотителя тепловых нейтронов использовалась порошкообразная борная кислота



1 – модельный твэл, 2 – стержневой выгорающий поглотитель

Рисунок 3. Экспериментальное устройство с выгорающим поглотителем

ЭУ было оснащено детекторами быстрых нейтронов, в качестве которых использованы активационные индикаторы (АИ) из никеля. АИ были установлены на уровнях ±390, ±300, ±200, ±100, 0 мм от центра АЗ на радиусе 20 мм от вертикальной оси ТВС.

ЭУ устанавливались в физический экспериментальный канал реактора таким образом, чтобы середина активной части ТВС совпадала с центром АЗ реактора.

Энерговыделение в АЗ во время облучения ЭУ без выгорающего поглотителя составило 1,06 МДж, а во время облучения ЭУ с выгорающим поглотителем – 1,08 МДж.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Удельное энерговыделение тепловых нейтронов в топливных таблетках, облученных на пуске, определялось по интенсивности гамма-линии лантана ^{140}La (E_γ=1596 кэВ) [1-4].

Распределение энерговыделения по высоте твэлов, приведённое к 1 МДж энерговыделения в реакторе, для двух ЭУ представлено на рисунке 4.

Средние значения удельного энерговыделения в топливе и средние значения соотношения между удельным энерговыделением в топливе и энерговыделением в активной зоне реактора ИВГ.1М приведены в таблице 2.

На рисунке 5 показаны результаты определения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов по высоте ТВС при мощности реактора 1 кВт для ТВС без стержневых поглотителей и со стержневыми поглотителями.

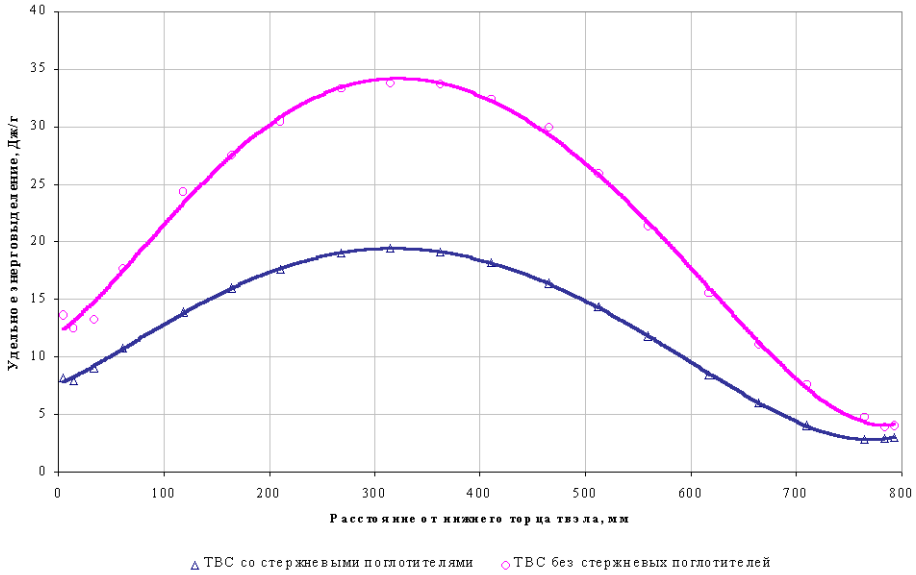
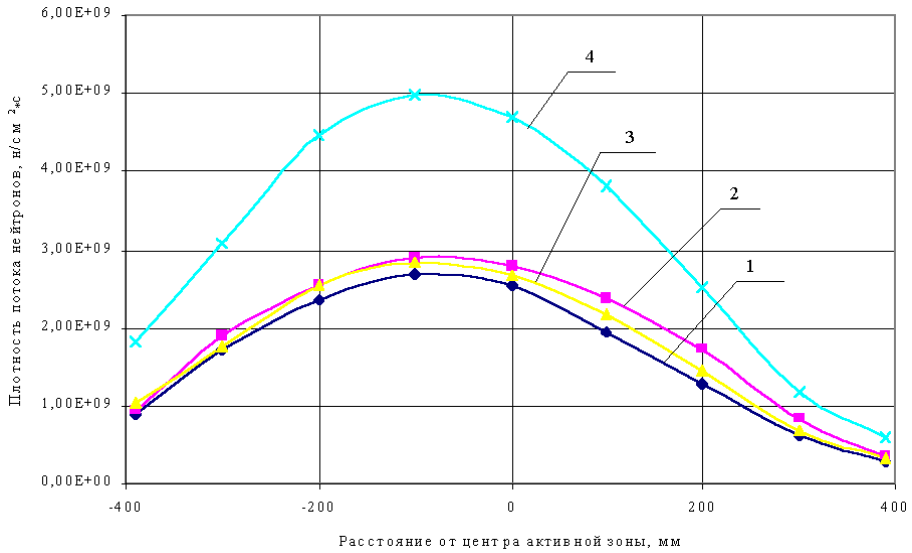


Рисунок 4. Распределение энерговыделения в топливных таблетках по высоте твэлов



1 - быстрые нейтроны (E>2,3 МэВ) для ТВС со стержневыми поглотителями; 2 - быстрые нейтроны (E>2,3 МэВ) для ТВС без стержневых поглотителей; 3 - тепловые нейтроны для ТВС со стержневыми поглотителями; 4 - тепловые нейтроны для ТВС без стержневых поглотителей

Рисунок 5. Распределение плотности потока тепловых и быстрых нейтронов при мощности реактора 1 кВт по высоте ТВС

Таблица 2. Результаты физических измерений

Модификация ТВС	Среднее удельное энерговыделение в топливе ТВС, Дж/г UO_2	Соотношение топливо/реактор, (кДж/г UO_2)/кДж ИВГ.1М
Без стержневых поглотителей	22,6	$2{,}1\times10^{-5}$
Со стержневыми поглотителями	12,8	$1{,}2\times10^{-5}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования с целью определения влияния размещения в ЭУ выгорающего поглотителя и верификации нейтронно-физических расчётов.

Сравнение результатов физических исследований для ТВС без стержневых поглотителей и со стержневыми поглотителями показало, что размещение в ЭУ выгорающего поглотителя B^{10} в количестве 5,6 г приводит к снижению плотности потока тепловых нейтронов (и удельного энерговыделения) в ~1,75 раза, при этом плотность потока быстрых нейтронов уменьшается на ~15%. Присутствие стержневых поглотителей тепловых нейтронов приводит к уменьшению запаса реактивности на ~3,7 $\beta_{эф.}$.

Значения удельного энерговыделения в топливе ТВС, определенные экспериментальным и расчетным путем, расходятся не более чем на 5%, что показывает корректность использованной расчётной модели.

В дальнейшем полученные данные предполагается использовать при создании более сложных расчётных моделей кандидатных ТВС с выгорающим поглотителем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спектрометрическая система Genie-PC Модель S400. Основы работы с системой [текст]: Справочник. / Vol 2.0-№4/94.
2. Брискман, Б.А. Внутриреакторная дозиметрия. [текст]: Практическое руководство/ Б.А. Брискман, В.В. Генералов, Е.А. Крамер-Агеев, В.С. Трошин//- М.:Энергоиздат, 1985.
3. Гусев, Н.Г. Радиационные характеристики продуктов деления [текст]/ Н.Г. Гусев, П.М. Рубцов, В.В. Коваленко, В.М. Колобашкин.//-М.: Атомиздат, 1974.
4. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках [текст]: / Под редакцией Васильева Р.Д //Материалы I Всесоюзной школы. Рига, 22 нояб. - 3 дек. 1976.-М.,1976.- Т 1,2.

ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДАҒЫ ЖАНЫП БІТУШІ ЖЫЛУ НЕЙТРОНДАРДЫ ЖҰТҚЫШ ЖӘНЕ ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫННЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРІНІҢ НӘТИЖЕСІ

Алейников Ю.В., Попов Ю.А., Прозоров А.А., Токтаганов М.О., Кимолаев Ж.Б., Сушков В.А.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

Мақалада «ИВГ.1М реакторының тылсым аймағында жаңарту тұжырымдамаларын негіздеу және жетілдіруң тақырыбы бойынша орындалған жұмыстардың аумағында өткізілген ИВГ.1М реактрындағы эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Жанып бітуші жұтқыштың эксперименталдық құрылғысында орналастырудың әсерін анықтау мақсатында жүргізілген физикалық зерттеулердің барысында алынған нәтижелер берілген. Эксперименталдық мәліметтермен MCNP5 есептеу бағдарламасын қолданумен жүргізілген есептеу нәтижелерін теңестіру жүргізілді.

RESULTS OF PHYSICAL INVESTIGATION OF LOW BENEFICIATING FUEL AND BUMABIC ABSORBER OF SLOW NEUTRON IN REACTOR IVG 1M.

Yu.V. Aleinikov, Yu.A. Popov, A.A. Prozorov, M.O. Toktaganov, Zh.B. Kimolaev, V.A. Sushkov

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Results of experiments on reactor IVG 1M, conducted in the context of execution of work by subject “design and substantiation conception of modernisation core IVG 1M” are represented. Results derived under physical investigations for definition effect of arrangement bumabic absorber in experimental device are represented. Results of analysis comparison with data experimental realized with working of MCNP5 program are conducted.

УДК 621.315.592

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА АНИЗОТРОПИИ ПО НАСЫЩЕНИЮ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ n-ТИПА

Оразгулыев Б., Казбекова Б.К.

Актауский государственный университет им. Ш.Есенова, Актау, Республика Казахстан

В статье приведены исследования магнитосопротивления кремния n-типа. Получено, что насыщение магнитосопротивления кремния n-типа наступает при $\frac{\mu H}{c} \approx 4$ независимо от концентрации и температуры носителей тока. Определен параметр анизотропии в зависимости от магнитосопротивления. Механизм рассеяния выбирается в зависимости от температурной зависимости магнитосопротивления.

Одним из непосредственных методов изучения анизотропии рассеяния носителей тока, является исследование гальваномагнитных эффектов в полупроводниках. Гальваномагнитные эффекты, такие как, например, магнитосопротивление являются очень чувствительными к типу механизма рассеяния. Изучая зависимости магнитосопротивления от концентрации примесей и температуры можно оценить характеристики анизотропного рассеяния электронов.

Анизотропия рассеяния особенно ярко проявляется в области классически сильных магнитных полей, где магнитосопротивление насыщается. При этом необходимо иметь в виду, что измерения продольного магнитосопротивления дают наиболее ценные сведения, так как оно всецело обусловлено анизотропией энергетического спектра носителей тока и анизотропией их рассеяния.

Продольное магнитосопротивление - наличие изменения сопротивления образца, помещенного в магнитное поле, параллельное электрическому току появляется при наличии анизотропии изоэнергетической поверхности постоянной энергии или квантования энергии носителей тока в магнитном поле.

Как известно, изоэнергетическая поверхность зоны проводимости кремния является эллипсоидальной (рисунки 1, 2) и поэтому нет такого направления электрического поля (за исключением направления вдоль главной оси типа [100]), для которого отсутствовало бы изменение сопротивления в продольном магнитном поле. Наиболее простой случай в кремнии осуществляется, когда ток и магнитное поле направлены вдоль оси [III] (т.е. $\bar{J} \| \bar{H} \| [III]$).

В этом случае изменение сопротивления кремния обусловлено, токами, переносимыми электронами каждой из шести долин, которые не параллельны оси [III], то есть токи электронов всех долин направлены симметрично относительно оси [Ш] и поэтому мы имеем как бы одну группу носителей тока с одной эффективной массой и подвижностью.

В слабом магнитном поле (когда $\mu H / c$ «1, $\hbar\omega_H$ «$k_Б T$) коэффициенты изменения сопротивления для основных кристаллографических направлений зависят от напряженности магнитного поля и энергетической зависимости времени релаксации, тогда как в сильном магнитном поле ($\mu H / c$ «1, $\hbar\omega_H$ «$k_Б T$) они не зависят от вида энергетической зависимости времени релаксации и определяются только анизотропией энергетического спектра носителей тока. Поэтому в сильном магнитном поле должно наблюдаться насыщение магнитосопротивления.

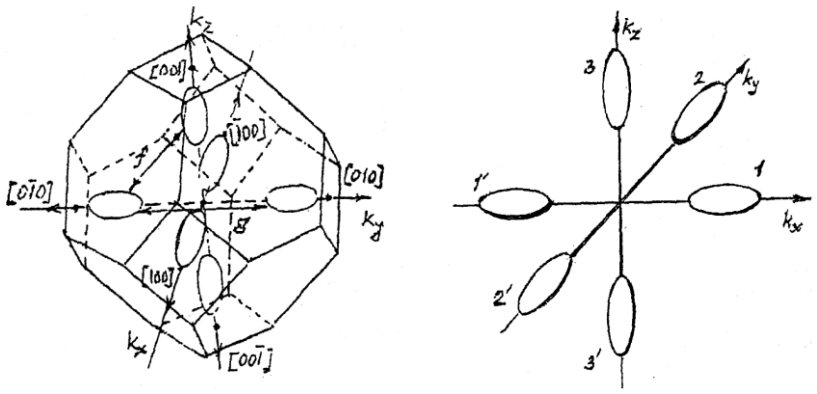


Рисунок 1. Расположение долин в к -пространстве в кремнии

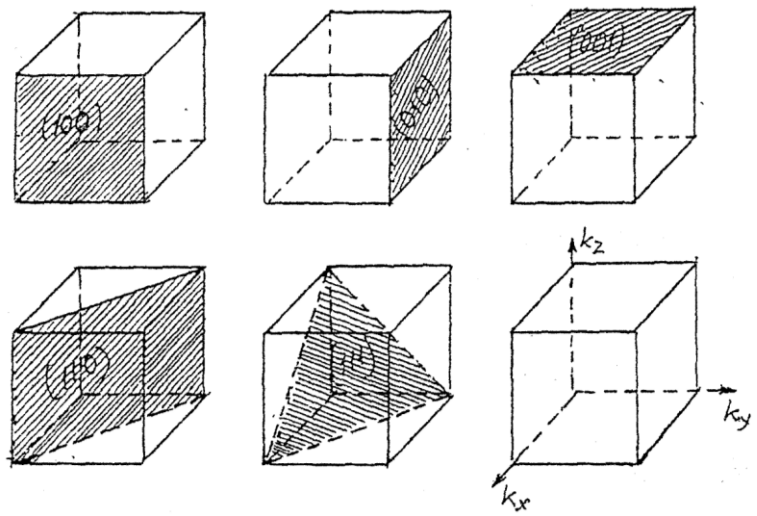


Рисунок 2. Кристаллографические оси и плоскости кристалла с соответствующими индексами Миллера

В работе [1] была изучена (при T=78°K) анизотропия рассеяния электронов в кремнии по концентрационной ($n=2.10^{13}\div6.10^{16}$) зависимости насыщения продольного магнитосопротивления в постоянном магнитном поле напряженностью 90 кЭ и получено хорошее согласие эксперимента с теорией [2], учитывающей анизотропию рассеяния на ионизированных примесях. Однако авторам [2] не удалось изучить анизотропию рассеяния от температурной зависимости насыщения магнитосопротивления из-за недостаточной величины магнитного поля.

Нами были проведены тщательные измерения продольного магнитосопротивления кремния n-типа в этом кристаллографическом направлении для набора образцов с различной концентрацией примеси ($n=2.10^{13}$-:-6.10^{16}) и при температурном интервале 77-300° в сильном магнитном поле. Результаты этих экспериментов приведены на рисунках 3-5. Одновременно с этими исследованиями мы провели измерения подвижности электронов во всех образцах, результаты которых приведены в таблице 1.

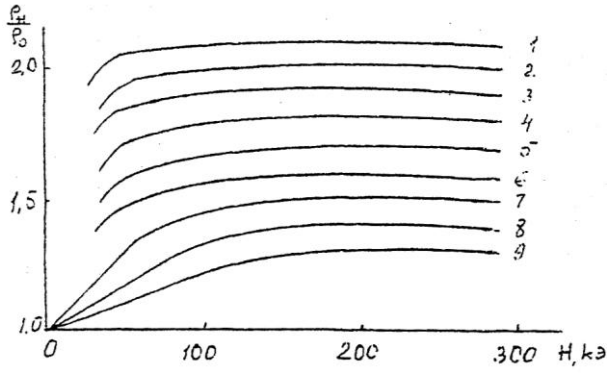


Рисунок 3. Зависимость насыщения продольного магнитосопротивления кремния n-типа от концентрации примесей $\bar{J}\left\|\bar{H}\right\|[III]$ *T = 77,4 °K* ρ_{300^0K}*, ом см: 1-200; 2-100; 3-30; 4-15; 5-10; 6-7,5; 7-1,0; 8-0,5; 9-0,2*

Сопоставляя данные рисунков 3-5 можно видеть, что насыщение магнитосопротивления наступает при $\frac{\mu H}{c} \approx 4$ независимо от концентрации и температуры носителей тока. Из этих рисунков можно определить параметр анизотропии подвижности k, который входит в выражения для всех без исключения кинетических коэффициентов и, следовательно, имеет важное значение для описания кинетических эффектов. Именно изменение параметра анизотропии k в зависимости от концентрации примесей и температуры ясно показывает соотношение между различными механизмами рассеяния носителей тока.

Расчет параметров анизотропии рассеяния K_t – проведен с использованием значений параметра анизотропии эффективных масс $k_{m=}=4.72$, T=78°K. Номера образцов совпадают с номерами кривых на рисунке 3.

Поэтому, в принципе нельзя построить количественную теорию этого эффекта без учета анизотропии рассеяния носителей тока на акустических фононах и тем более - на примесных ионах.

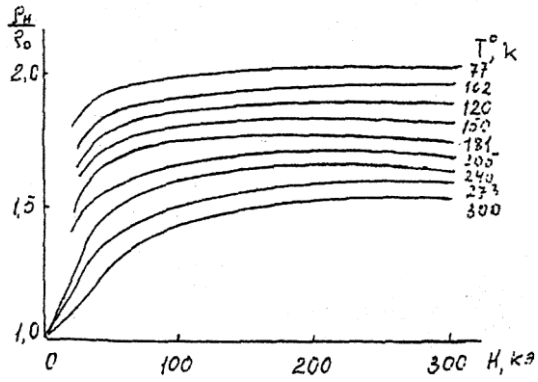


Рисунок 4. Температурная зависимость магнитосопротивления кремния n-типа $\bar{J}\left\|\bar{H}\right\|[III]$ ρ_{300^0K} *=30 ом.см*

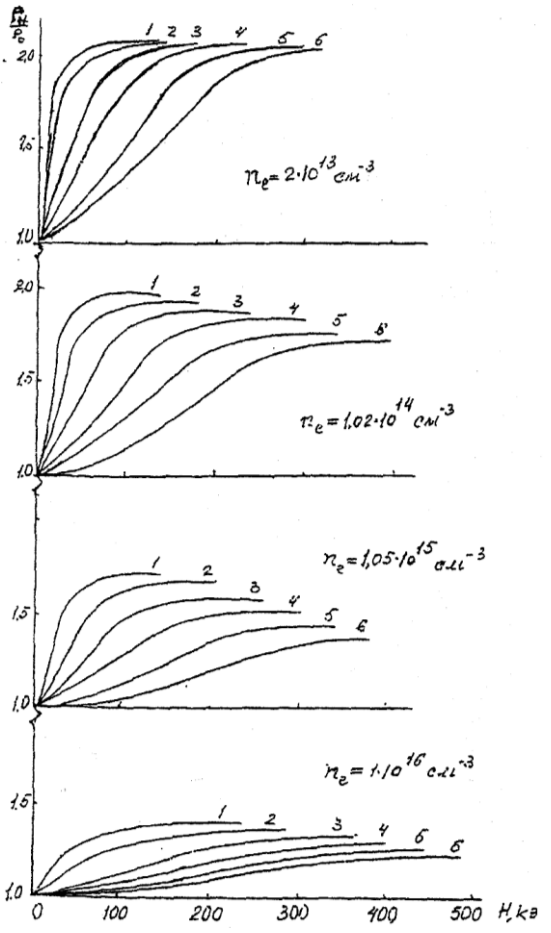


Рисунок 5. Зависимость насыщения продольного магнитосопротивления кремния n-типа от концентрации и температуры $\bar{J}\left\|\bar{H}\right\|[III]$ *T °K: 1-77; 4; 2-100; 3-150; 4-200; 5-250; 6-300*

На рисунке 6 показана зависимость параметра анизотропии рассеяния k_t от концентрации примесей, построенная по данным рисунка 3. Поскольку, процессы рассеяния электронов в кремнии при рассеянии на акустических фононах и ионизированных примесях описываются тензором времени релаксации, то K_t характеризует анизотропию рассеяния, характерную для этих механизмов рассеяния, а важные при высоких температурах типы, междолинные рассеяния являются изотропными (т.е. $\frac{\langle\tau_{\text{П}}\rangle}{\langle\tau_{\perp}\rangle}=1$). Из рисунка видно, k_t с увеличением концентрации примесей постепенно увеличивается от величины 0.71 соответствующей рассеянию на колебаниях решетки, до величины около 2, соответствующей превалирующему рассеянию на примесях.

Анализ этих результатов был проведен следующим образом. Согласно теории [2] величина насыщения магнитосопротивления (в случае $\bar{J}\left\|\bar{H}\right\|[III]$) кремния n-типа дается выражением:

$$\frac{\rho_{H\to\infty}}{\rho_0}=\frac{(2k+1)(k+2)}{9k} \tag{1}$$

Компоненты тензора времени релаксации для смешанного механизма рассеяния выражается соотношениями:

$$\frac{1}{\tau_{\perp}}\Big)=\frac{1}{\tau_{\perp}}\Big)_a+\frac{1}{\tau_{\perp}}\Big)_{iv}+\frac{1}{\tau_{\perp}}\Big)_i \tag{2}$$

$$\frac{1}{\tau_{\text{Ш}}}\Big)=\frac{1}{\tau_{\text{Ш}}}\Big)_a+\frac{1}{\tau_{\text{Ш}}}\Big)_{iv}+\frac{1}{\tau_{\text{Ш}}}\Big)_i \tag{3}$$

a,iv,i- означают акустические, междолинные, ионизированные примеси.

По результатам работы [5]

$$\frac{\tau_{\text{Ш}}}{\tau_{\perp}}\Big)_a=\frac{2}{3},\ \frac{\tau_{\text{Ш}}}{\tau_{\perp}}\Big)_a=1 \tag{4}$$

По расчетам [3]

$$\frac{\tau_{\text{Ш}}}{\tau_{\perp}}\Big)_1=3\text{, а по [6] }\frac{\tau_{\text{Ш}}}{\tau_{\perp}}\Big)_1=4 \tag{5}$$

Для учета междолинного рассеяния рассмотрим взаимодействие электронов с фононами соответствующих энергий: для низкоэнергетических фононов 190°К и для высокоэнергетических фононов 630°К.

Вклад в (2) акустического и междолинного рассеяния выражается

$$\frac{1}{\tau_{\perp}}\Big)_a=w_{a\perp}\left(\frac{\xi}{k_{\text{Б}}T}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{T}{T_0}\right) \tag{6}$$

$$\frac{1}{\tau_{\perp}}\Big)_{iv}=2_{a\perp}\left(\frac{630}{T_0}\right)\left[\frac{\left(\left(\frac{\xi}{630}\right)+1\right)}{\exp\left(\frac{630}{T}\right)^{-1}}+\frac{\left(\left(\frac{\xi}{630}\right)-1\right)^{\frac{1}{2}}}{1-\exp\left(-\frac{630}{T}\right)^{-1}}\right]+$$
$$+0.15w_{ai}\left(\frac{190}{T}\right)^{\frac{3}{2}}\left[\frac{\left(\left(\frac{\xi}{630k}\right)+1\right)^{\frac{1}{2}}}{\exp\left(\frac{190}{T}\right)^{-1}}+\frac{\left(\left(\frac{\xi}{190k}\right)-1\right)^{\frac{1}{2}}}{1-\exp\left(-\frac{190}{T}\right)^{-1}}\right] \tag{7}$$

где $w_{a}j$ - константа связи для акустического рассеяния. Теоретические расчеты, проведенные для концентрации примесей. 10^{13}, 10^{14}, 10^{15}, 10^{16}, 10^{17}, см$^{-3}$ находятся в хорошем соответствии с экспериментальными значениями насыщения магнитосопротивления.

Характеристики исследованных кристаллов кремния легированных фосфором представлены в таблице 1 для Т=77,4 °К.

Таблица 1. Характеристика исследованных кристаллов кремния n-типа

№ образца	$\rho_{300^0 K}$, ом см	n, см$^{-3}$	$K = \frac{K_m}{K_\tau}$	K_τ	$\left(\frac{\rho_{[III]}}{\rho_0}\right)$	$\rho_{77^0 K}$, ом см	$R_{H\to\infty}(77k),\ см^3/к$	$\mu_{77K} = \sigma \cdot R_{H\to\infty}$, $см^2/в.с$
0	0,02							
1	0,20	$2{,}2\cdot10^{16}$	3,5	1,35	1,4	0,157	$8{,}3\cdot10^{2}$	$5{,}34\cdot10^{3}$
2	0,50	$1{,}0\cdot10^{16}$	4,0	1,18	1,5	0,2	$1{,}62\cdot10^{3}$	$8{,}15\cdot10^{3}$
3	1,00	$4{,}6\cdot10^{15}$	4,37	1,08	1,58	0,27	$2{,}82\cdot10^{3}$	$1{,}04\cdot10^{4}$
4	7,50	$4{,}9\cdot10^{14}$	4,75	0,98	1,65	0,7	$1{,}057\cdot10^{3}$	$1{,}51\cdot10^{4}$
5	10,0	$3{,}57\cdot10^{14}$	4,94	0,955	1,7	0,82	$1{,}35\cdot10^{4}$	$1{,}65\cdot10^{4}$
6	15,0	$1{,}99\cdot10^{14}$	5,32	0,9	1,78	1,4	$2{,}6\cdot10^{4}$	$1{,}85\cdot10^{4}$
7	30,0	$1{,}2\cdot10^{14}$	5,9	0,84	1,9	2,7	$5{,}26\cdot10^{4}$	$1{,}95\cdot10^{4}$
8	100,0	$4{,}1\cdot10^{13}$	6,35	0,74	2,0	9,2	$1{,}94\cdot10^{4}$	$2{,}10\cdot10^{4}$
9	200,0	$2{,}0\cdot10^{13}$	6,57	0,717	2,05	18,8	$4{,}2\cdot10^{4}$	$2{,}21\cdot10^{4}$

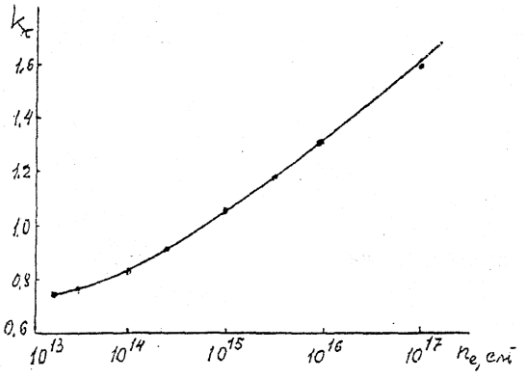


Рисунок 6. Зависимость параметра анизотропии рассеяния k_t от концентрации примесей, построенная по данным рисунка 3

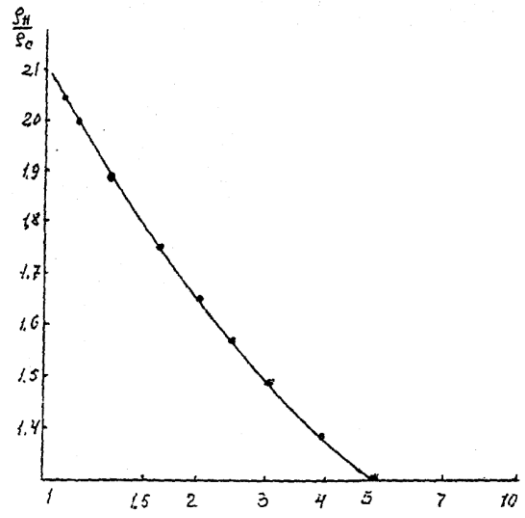


Рисунок 7. Зависимость $\left.\frac{\rho_{H\to\infty}}{\rho_0}\right]_{///}^{\frac{\nu_a}{\mu}}$ *от отношения* $\frac{\mu_0}{\mu}$

На рисунке 7 построена зависимость $\left.\frac{\rho_{H\to\infty}}{\rho_0}\right]_{///}^{\frac{\nu_a}{\mu}}$ от отношения $\frac{\mu_0}{\mu}$, где $\mu_0 = 2{,}65\cdot10^4$ см^2/В·с для для чисто акустического рассеяния при 77,4 °К, а μ_H - холловская подвижность, определяемая из соотношения $\mu_H = \sigma R_{H\to\infty}$.

Наши результаты дают полное соответствие с экспериментальными результатами работы [3].

Согласно работы [7] величина параметра анизотропии k для кремния n-типа должна с увеличением концентрации примесей уменьшаться оченьмедленно, начиная от максимального значения, что хорошо видно из рисунка 8. На рисунке расчет выражен сплошной линией, а экспериментальные данные - точками, которые получены из значения величины насыщения магнитосопротивления. При концентрации примесей 10^{16} см$^{-3}$ ощутим вклад рассеяния на нейтральных примесях. Заметим, что величина изотропной подвижности менее чувствительна к величине анизотропии рассеяния, чем магнитосопротивление.

В классически сильных магнитных полях теория [2] и борновское приближение для концентраций примесей до 10^{16} см$^{-3}$ дают адекватные выражения для анизотропии рассеяния на ионизированных примесях.

Теперь рассмотрим изменение параметра анизотропии k в зависимости от температуры. По данным рисунка 5. построена температурная зависимость параметра анизотропии k (рисунок 8).

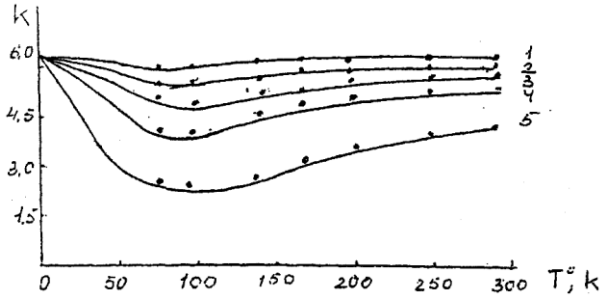


Рисунок 8. Температурная зависимость параметра анизотропии k n_e, $см^{-3}$: 1-2·10^{13}; 2-4,1·10^{13}; 3-1.02·10^{14}; 4-1; 0,5-1,0·10^{15}; 5-1,0·10^{16}

Согласно [7-9] параметр анизотропии k для смешанного рассеяния определяется следующим выражением

$$k = \frac{m_Ц}{m_\perp}\frac{\langle\tau_\perp\rangle}{\langle\tau_Ц\rangle} = \frac{3m_Ц I_i}{2m_\perp I_0} \qquad (8)$$

где

$$I_0 = \int_0^{\infty} \frac{x^3 e^{-X}\,dx}{x^2 + b_0};\ I_1 = \int \frac{x^3 e^{-x}\,dx}{x^2 + b_1}$$

$$b_1 = 1.25 \cdot 10^{-10} \frac{N}{T^3}\left(31.4 + \ln\frac{T^2 x}{N} + \frac{1.46 \cdot 10^{-14} N}{T^2 x}\right)$$

$$b_0 = 2.38 \cdot 10^{-11} \frac{N}{T^3}\left(32.0 + \ln\frac{T^2 x}{N} - \frac{10^{-14} N}{T^2 x}\right)$$

N - концентрация примесных ионов, $x = \frac{\xi}{k_Б T}$.

Результаты определения параметра анизотропии k по этой формуле представлены на рисунке 8. Параметр анизотропии k состоит из анизотропии эффективных масс k_m и анизотропии рассеяния k_t

$$k = \frac{k_m}{k_\tau}$$

Анизотропия эффективных масс хорошо определена циклотронного резонанса и может считаться постоянной в использованной нами интервале температур и равной k_m=4,72 [10].

Тогда по данным рисунка 4 можно определить параметры рассеяния k_t. Результаты такого определения приведены на рисунке 9. Полученные нами данные находятся в хорошем согласии экспериментальными результатами [3] в которых, было изучен магнитосопротивление кремния n - типа в зависимости от примесей в магнитных полях напряженностью до 90 кЭ при Т=78°К и по этим данным определен параметр анизотропии рассеяния k_t.

Однако в этой работе не была измерена температурная зависимость насыщения магнитосопротивления из-за недостаточной величины магнитного поля. Этот пробел восполнен нами в работе [4].

Для теоретического расчета концентрационной зависимости k_t мы использовались теорией [7-9], где получены соответствующие выражения. Учитывалось рассеяние на акустических фононах, ионизированных примесях, на оптических фононах двух типов с энергиями 190° и 630°К.

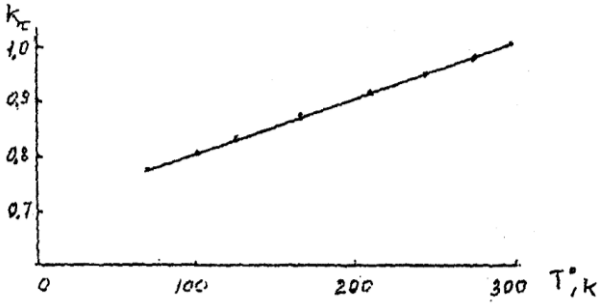


Рисунок 9. Зависимость параметра анизотропии рассеяния k_t от температуры по рисунку 4

При этом использовались следующие параметры $\left.\frac{\tau_Ш}{\tau_\perp}\right)_a = \frac{2}{3}$ [5] междолинное рассеяние принималось изотропным, т.е. $\left.\frac{\tau_Ш}{\tau_\perp}\right)_{iv} = 1$ константа связи оптическими фононами брались из работы [5].

Сопоставление экспериментальных результатов с расчетными данными приведено в таблице 2.

Данные таблицы свидетельствуют о хорошем соответствии теории и эксперимента для азотной температуры.

Однако выше 100 °К начинает наблюдаться расхождение между теорией и экспериментом, которое приводит к тому, что точки экспериментальных данных не ложатся на линии теоретического расчета. Глубина минимума на кривых (рисунок 8) характеризует долю рассеяния на примесных ионах и с ростом концентрации примесей этот минимум становится более глубоким и сдвигается в сторону больших температур.

Заметим, что изменение параметра анизотропии рассеяния k_t зависимости от концентрации примесей и температуры ясно показывает соотношение между различными механизмами рассеяния носителей тока.

Таблица 2. Изменение параметра анизотропии k с концентрацией примеси

	Концентрация доноров, см^3	**k**	**k_t**
Экспериментальные значения при 77,4°К	$2x10^{13}$	6,57	0,717
	$1,2x10^{14}$	6,0	0,78
	$1,05x10^{15}$	5,0	0,94
	$1,0x10^{16}$	4,0	1,18
	$0,98x10^{17}$	2,35	2,01
Теоретические значения при 80°К	10^{13}	6,7	0,705
	10^{14}	6,0	0,80
	10^{15}	5,0	0,93
	10^{16}	3,6	1,3
	10^{17}	2,35	2,01

Как видим изменением концентрации или температуры можно осуществить переход от одного механизма рассеяния к другому, и изучить анизотропию каждого механизма рассеяния в отдельности. Например, согласно нашим данным для концентрации носителей тока 10^{14} см$^{-3}$ существенно внутридолинное акустическое рассеяние (рисунок 4 и таблица 2), а с увеличением концентрации растет доля рассеяния на ионизированных примесях и при концентрации примесей 10^{16} см$^{-3}$ анизотропия рассеяния достигает значения $k_r >> 2$.

Отметим, что при низких температурах в наших экспериментах мы захватывали и область квантования для направления $\bar{J} \| \bar{H} \| [III]$. Так для температуры 77,4°К $\hbar\omega_H = k_Б T$ при Н=160 кэ. Однако четкого проявления эффектов квантования на рисунках 3-5 все ещё не наблюдается, хотя магнитосопротивление испытывает небольшой рост с увеличением магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neuringer, L.J, Little W.J. Longitudal Magnetoresistance of n-Silicon in d.c. Magnetic fields to 90 kilogauss / L.J.Neuringer, W.J. Little.// Proc.Intern. Conf. Phys. Semiconductors, - Exeter, 1962. - P.614-623.
2. Херринг, К. Теория явлений переноса и потенциала деформации для полупроводников со многими минимумами на энергетических поверхностях и с анизотропным рассеянием. / К.Херринг, Э.Фогт. // Проблемы физики полупроводников - М.: ИЛ, 1957. - С. 567-598.
3. Neuringer, L.J. Saturation magneoresistance and impurity scattering anisotropy in n-type silicon. / L.J.Neuringer, D.Long // Phys. Rev. – 1964. - V.135, №3A. - P.788-793.
4. Оразгулыев, Б. Рассеяние электронов в кремнии.// Оразгулыев Б., Тарасова В.М. // ФТП. – 1973. - Т.7. - Вып.5. - С.970-972.
5. Long, D. Scattering anisotropies in n-type Silicon / D.Long, J.Myers // Phys. Rev. – 1960. - V.120, №1. - P. 39-44.
6. Ham, F. Ionized Impurity Scattering in Semiconductors / F.Ham // Phys. Rev. – 1955. - V.100, №1. - P.55-58.
7. Анизотропное рассеяние электронов на ионизированных примесях и акустических фононах/ А.Г.Самойлович [и др.] // ФТТ. – 1961. - Т.3. - Вып.11. - С. 3285-3298.
8. Даховский, И.В. Анизотропное рассеяние электронов в германии и кремнии / И.В.Даховский //ФТТ. – 1963. - Т.5. - С.2332-2338.
9. Даховский И.В., Михай Е.Ф. Вычисление параметра анизотропии в n-кремнии / И.В.Даховский, Е.Ф.Михай // ФТТ. – 1964. - Т.6. - Вып. 8. - С.3479-3481.
10. Stradfing, R.A. CR of electrons in Silicon at temperature up to 200°K / R.A.Stradfing, V.V.Zhukov // Proc.Phys.Soc. – 1965. - V.87, №2. - P.263-271 .

N-ТИПТІ КРЕМНИЙДІҢ МАГНИТТІК КЕДЕРГІСІНІҢ ҚАНЫҒУЫ АРҚЫЛЫ АНИЗОТРОПИЯНЫҢ ПАРАМЕТРІ АНЫҚТАУ

Оразгулыев Б., Казбекова Б.К.

Ш.Есенов атындағы Ақтау мемдекеттік университеті, Ақтау, Қазақстан Республикасы

n-типтік кремнийдің бойлық магниттік кедері аса сау қабілетін зерттеу үстінде магниттік кедергінің қанығуы $\frac{\mu H}{c} \approx 4$ басталатыны, ол кристаллографикалық бағыттаудың меншікті кедергісіне және кристалдың қызуына байланысты емес екені дәлелденді. Магниттік кедергінің қанығуы мөлшеріне қарай анизотропияның параметрі анықталған. Магниттік кедергігің қызулық тәуелділігінен ыдырату механизмі айқындалады.

DEFINITION OF PARAMETER ANISOTROPY НИЗОТРОПИИ ON SATURATION A MAGNETORESISTANCE OF SILICON OF A N-TYPE

B. Orazguliev, B.K. Kazbekova

Sh.Esenov name Aktau state university, Aktau, Republic of Kazakhstan

Learning longitudinal magnetoresistance silicon n - type was established that saturation of magnetoresistance will be at $\frac{\mu H}{c} \approx 4$ out of depending on specific resistance, crystallographic orientation and temperature of crystal. On magnitude saturation magnetoresistance was determined parameter anisotropy. On depending temperature of magnetoresistance was established mechanism scattering.

УДК 533.56:621.039.66

ЧАСТОТНОМОДУЛИРОВАННЫЙ РАДАР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

[1)]Колтыгин О.В., [2)]Логачев Ю.В., [3)]Мартынов С.Б., [1)]Пономарев В.А.

[1)]ФГУП НИИ автоматических приборов, Новосибирск, Россия
[2)]Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан
[3)]СКБ "Вега", Новосибирск, Россия

Выполнен анализ радиотехнических особенностей микроволновых систем диагностики плазмы КТМ с точки зрения специфики исследования их характеристик в лабораторных условиях. Разработаны технические предложения по использованию в качестве одной из контрольных измерительных систем имитационного стенда ЧМ-радара с повышенной виброустойчивостью.

Рассмотрена возможность использования в перспективе ЧМ-радара в качестве дополнительной системы микроволновой диагностики плазмы.

Сформулированы основные технические требования, определяющие базовые параметры ЧМ-радара, и разработана структурная схема устройства. Выбран вариант симметричного закона модуляции частоты,. выполнены расчетные оценки его базовых характеристик, в частности величина девиации частоты, требуемая при заданном разрешении по дальности, допустимая погрешность АЧХ СВЧ тракта, ожидаемая величина погрешности от доплеровской частоты, необходимость когерентного накопления оценок дальности и т.д..

В обоснование конфигурации ЧМ-радара проведено макетирование отдельных элементов ЧМ-радара.

Полученные результаты подтвердили возможность и эффективность использования ЧМ радаров в качестве системы микроволновой диагностики плазмы в диапазоне частот порядка 200 ГГц с высоким уровнем вибрационной и шумовой устойчивости. Результаты работы могут быть использованы при разработке перспективных систем микроволновой диагностики плазмы на токамаках.

В рамках реализации проекта создания и эксплуатации казахстанского материаловедческого токамака (КТМ) в г. Курчатове в Институте атомной энергии ведется разработка стендовой и методической базы для научно-технического обеспечения эксплуатации установки и обучения персонала [1]. Одним из направлений этой работы является создание базы для имитационных исследований характеристик микроволновых систем диагностики плазмы, которые являются одними из наиболее информативных, и в то же время сложных и специфических систем диагностики параметров плазмы. Их особенности связаны как со сложностью технической реализации и режимов работы в условиях токамака, так и со спецификой калибровки и тестирования, а также методов обработки и интерпретации первичной информации. Актуальность этого направления определяется, главным образом, тем, что в полном объеме исследования подобных систем невозможно выполнить в режиме штатной работы такой сложной физической установки, какой является токамак КТМ. Кроме этого наличие такой лабораторной базы позволяет проводить самостоятельные работы по созданию перспективных систем диагностики плазмы. Учитывая, что любые системы измерений имеют свои достоинства и недостатки, а также ограниченную область применения с точки зрения диапазона измеряемых параметров, актуальность таких работ не вызывает сомнения. Это подтверждается тем, что, как правило, диагностический комплекс средней установки включает до 40 диагностик [2] и в различных научных центрах постоянно ведутся работы над совершенствованием параметров существующих и разработкой новых систем диагностики плазмы.

Комплекс микроволновых диагностик материаловедческого токамака КТМ должен включать в себя следующие системы:

- одноканальный интерферометр, предназначенный для измерения и управления средней плотностью плазмы, для динамического позиционирования плазменного шнура;
- 2-х частотный импульсный радар-рефлектометр, предназначенный для измерения положения границы плазменного шнура;
- многоканальный интерферометр, предназначенный для измерения динамики профиля электронной плотности;
- перестраиваемый импульсный рефлектометр, предназначенный для измерения профиля электронной плотности в динамике с зондированием плазмы по горизонтали в экваториальной плоскости;
- интерферометр, предназначенный для измерения динамического положения Х-точки плазмы токамака КТМ относительно дивертерных пластин.

По совокупности признаков эти системы могут быть отнесены к импульсным системам ближней радиолокации (СБРЛ), в которых расстояние до объекта соизмеримо с размерами самого объекта. Импульсные системы являются наиболее простыми с точки зрения реализации, и поэтому они используются на ряде токамаков. В тоже время, подобные системы обладают рядом недостатков, особенно

критичных в условиях работы на токамаках. Отметим некоторые из них, имеющие непосредственное отношение к контексту данной статьи [3-5]:

- низкая виброустойчивость подобных систем;
- наличие эффекта Доплера и вторичного эффекта Доплера и связанные с этим частотные и фазовые искажения (модуляции) полезного сигнала;
- наличие паразитной модуляции сигнала за счет возможной флуктуации плотности плазмы и ее границы;
- искажение принимаемого сигнала за счет проникновение зондирующего сигнала в тракт приемника в случае недостаточной развязки приемного и передающего трактов.

Эти и ряд других факторов приводят к искажению полезного сигнала и, соответственно, к снижению точности измерений, разрешающей способности и достоверности интерпретации результатов. Для уменьшения влияния данных факторов используют различные методы – от применения массивных виброизолирующих станин как вариант борьбы с вибрацией до перехода в область более коротких длин волн и применения методов лазерной интерферометрии [6-8].

Одним из путей решения указанных проблем является использование методов частотной модуляции сигнала, которые в свое время радикально изменили технику микроволнового зондирования [9], что согласуется с теорией радиолокации, согласно которой частотно модулированные системы обладают значительно большей виброустойчивостью.

В ходе первого этапа работ (2005 г.) по созданию имитационного стенда для исследований характеристик систем микроволновых диагностик в качестве одной из калибровочных стендовых систем рассматривался частотно модулированный радар – дальномер. Калибровочная система должна выполнять функцию контрольных измерений исследуемых параметров, результаты которых сравниваются с результатами тестируемой системы диагностик. Исходя из этого, очевидно, что ее характеристики в части исследуемых параметров должны быть, по крайней мере, не хуже, чем характеристики тестируемой системы диагностик. Кроме этого, предпочтительным является использование калибровочной (дублирующей системы), основанной на физических принципах, отличных от основной (контролируемой) системы. Применительно к рассматриваемым системам диагностики плазмы в качестве калибровочной системы измерения положения плазменного шнура, могут использоваться либо СВЧ системы с частотной модуляцией сигнала, либо один из вариантов лазерных интерферометров. Выбор данные систем обусловлен тем, что, с одной стороны, в них используются аналогичные физические принципы измерений, а с другой стороны – они свободны от ряда недостатков тестируемых систем диагностики.

В рамках обоснования данного выбора проведена разработка структурной схемы ЧМ-радара и выполнены макетные и модельные оценки потенциальных параметров устройства. Анализ результатов показал принципиальную возможность использования подобного устройства в качестве системы диагностики плазмы. Учитывая, что работа над перспективными системами диагностик является одной из задач при создании имитационных стендов, в данной статье приводится концептуальная информация по работе выполненной по данному направлению.

В ближней радиолокации радары, использующие частотную модуляцию сигнала, применяют по причине высоких точности измерения дальности и степени виброустойчивости, связанных с отстройкой от частот вибрации при правильном выборе частот модуляции.

При определении конфигурации и параметров дальномера использовались базовые технические требования (ожидаемая плотность плазмы и т.п.), которые применялись при разработке штатных систем микроволновой диагностики КТМ. Кроме этого учитывался ряд дополнительных факторов, в частности:

- эффективная поверхность рассеяния искомой границы плазмы может флуктуировать со значительной радиальной скоростью (при радиальной скорости флуктуаций $V_{рмакс}$= 0.5 см/мкс, максимальная частота паразитных амплитудной и фазовой модуляций (АМ и ФМ) будет составлять 0.5 МГц);
- рабочий диапазон по дальности 0.3 ÷ 1.5 м, необходимая разрешающая способность по дальности 1 - 3 см;
- диапазон несущих частот 20 - 200 ГГц;
- время измерения не более 100 мкс.

Учитывая концептуальный характер рассматриваемого этапа работ, полный набор параметров, необходимых для технической реализации системы, не приводится.

В ходе предварительного анализа приведенных требований были выполнены расчетные оценки базовых характеристик системы для варианта симметричного закона модуляции частоты. Оценивались такие параметры, как величина девиации частоты (требуемая при заданном разрешении по дальности), допустимая погрешность АЧХ СВЧ тракта, ожидаемая величина погрешности от доплеровской частоты, необходимость когерентного накопления оценок дальности (частоты отклика) и т.д.

На основании проведенных оценок были сформулированы требования к системе и разработано схемное решение, обеспечивающее реализацию данных требований.

Так, независимо от параметров и способа модуляции частоты несущего сигнала приемник радара должен быть рассчитан на когерентный прием с неизвестной фазой входного сигнала, т.е. иметь в своем составе комплексный квадратурный смеситель.

Полное использование возможностей комплексного квадратурного когерентного приема существенно повышает точность по дальности, поэтому необходимо принятие специальных мер по автоматическому определению квадратурных ошибок приемника.

Структурная схема дальномера приведена на рисунке 1.

Учитывая широкую полосу СВЧ тракта, а также неизбежное нестабильное по времени проникание передаваемого сигнала в приемный тракт, предлагается введение специального калибровочного сигнала, принимаемого одновременно с полезным входным сигналом и служащего для постоянной оценки квадратурных ошибок смесителей, фильтров и всего низкочастотного тракта. Наиболее оптимально в качестве калибровочного использование сигнала передатчика с задержкой его на $1.5 \div 3$ нс относительно сигнала передающей антенны. Наличие калибровочного сигнала также автоматически облегчает задачу построения согласованного фильтра для его приема, с непосредственным измерением влияния ФМ и АМ передатчика, параметров сигнала при сложных и может быть нелинейных законах модуляции.

Учитывая, что точность измерения сигналов будет определяться параметрами калибровки, для улучшения шумовых характеристик тракта используется калибровочный сигнал значительного уровня, а отклик от него удален по частоте от диапазона сигналов полезной определяемой дальности в область комплексных частот противоположного знака. Это проиллюстрировано на рисунке 2.

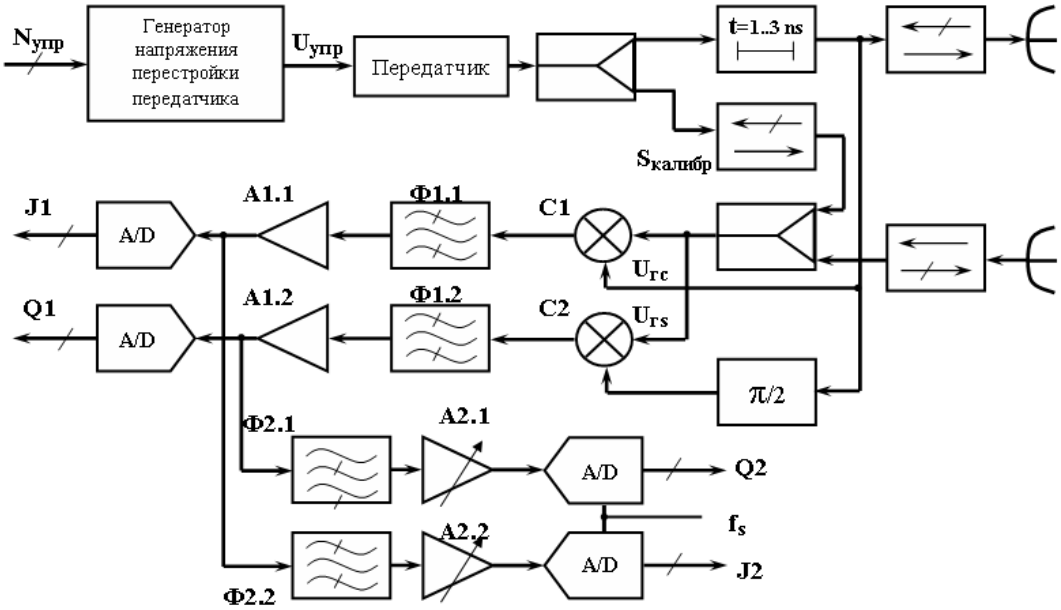


Рисунок 1. Вариант структурной схемы сигнального тракта ЧМ-радара.

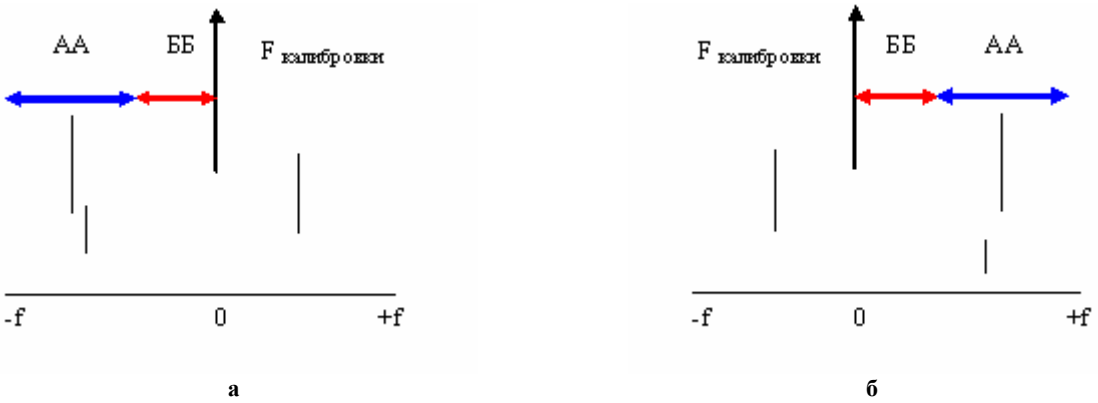


Рисунок 2. Расположение частот комплексных (НЧ) сигналов для полуциклов с возрастающей (а) и убывающей (б) несущей: АА – зона частот полезных сигналов, ББ – нерабочая "ближняя" зона

Для оценки мешающих сигналов в "ближней" зоне и составляющих паразитной амплитудно-фазовой модуляции (АФМ) сигнала передатчика в схему низкочастотного сигнального тракта введены АЦП сигналов I1/Q1 – канал сигналов "высокого уровня" и "ближней" зоны. Это вспомогательный канал, используемый также для оценки статистики помех и мешающих отражений.

Основной сигнальный канал (цифровые сигналы I2/Q2) образуют фильтры Ф2, усилители А2. Нижняя частота среза фильтра должна обеспечивать подавление сигналов "ближней" зоны. Диапазон частот полезных сигналов должен лежать в области от 0.2 до 10 МГц – наиболее оптимальная область с точки зрения спектральной плотности собственных шумов, усиления и динамического диапазона.

Для обработки и анализа сигналов разработаны два варианта цифрового тракта, один из которых приведен на рисунке 3.

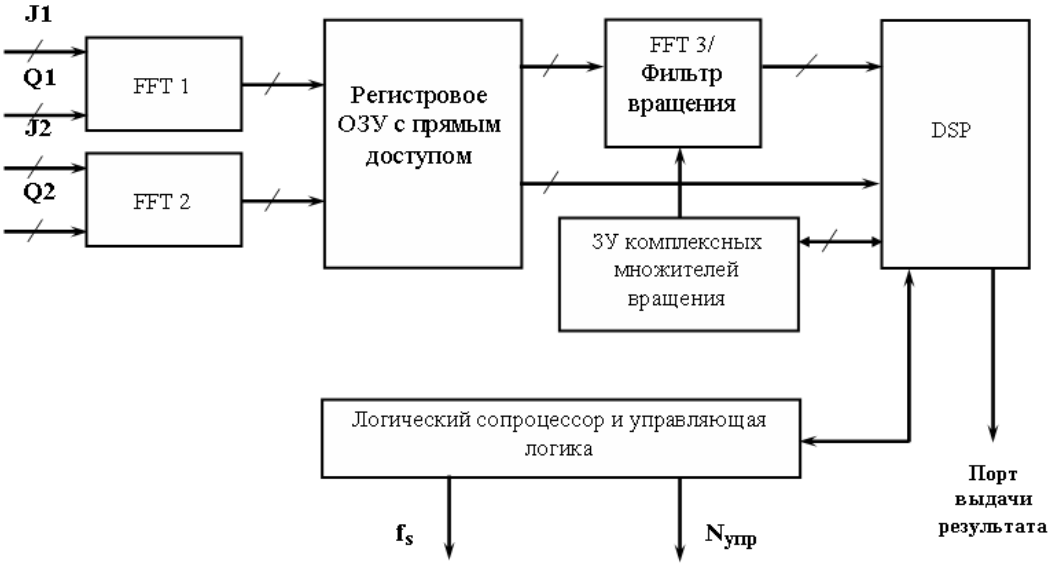


Рисунок 3. Вариант построения цифрового анализатора / измерителя ЧМ-радара.

Тракт состоит из программируемого сигнального процессора и внешней по отношению к нему логики. Для проведения сигнальных измерений каналов I1/Q1 и I2/Q2 комплексные устройства Фурье-анализа FFT1 и FFT2 вычисляют комплексный спектр сигнала с размещением результата в буферном регистровом ОЗУ. Дополнительный модуль FFT3 продолжает эти операции, завершая вычисление Фурье-спектра с осуществлением комплексного накопления данных за несколько периодов зондирования. Комплексные множители для отдельных сегментов сигнального спектра задаются специальным ЗУ. Данный модуль может выполнять как последнюю операцию вычисления традиционных БПФ с прореживанием по времени или по частоте, так и специально задаваемую коррекцией спектра. Приведенная структура тракта предполагает, что выполнение фильтра-обнаружителя в спектральной области проще реализуемо, хотя рассматривался и вариант многоканального комплексного коррелятора [10].

Описанная схема является основой для построения различных систем фазовых и/или частотных радаров, но их конкретные возможности будут определяться параметрами СВЧ тракта, законом модуляции и способом накопления оценки дальности. В рамках данной работы рассматривались и другие варианты схемных решений с целью сравнительного анализа их эффективности, стоимости, простоты схемной реализации и других показателей.

Учитывая особую важность корректного выбора закона модуляции, приведем некоторые критерии и расчетные соотношения, использованные на этапе расчетных оценок параметров дальномера.

Как отмечено ранее, для простого и линейного учета доплеровского смещения требуется симметричный закон частотной модуляции сигнала. Для достижения различимости полезного сигнала на фоне спектра сильной паразитной АФМ мешающих отражений "ближней" зоны необходимо частоты биений сигналов полезного объекта существенно сдвинуть по частоте, что требует высокой скорости изменения частоты передатчика в цикле модуляции.

Сигнал передатчика на подъеме частоты (для упрощения расчет сигнала на спаде частоты не приводится) определяется из соотношения:

$$S(t)_{пл} = \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0 + t^2 \cdot \Delta\omega_m / T_m) \text{ для } t = 0..Tm/2,$$

где ω_0 - минимальная частота несущего сигнала, φ_0 - произвольная фаза несущей, $\Delta\omega_m$ - девиация частоты (размах), T_m – период модулирующего сигнала.

В этом случае соответствующий НЧ сигнал (на спаде частоты), принимаемый от объекта с задержкой дальности $t_r=2\cdot R/c$ равен:

$$S_{нч}(t)_{пл} = \cos(-\omega_0 \cdot t_r + \varphi_{об} - t\cdot 2\cdot t_r \cdot \Delta\omega_m / T_m)$$

для $t=0..T_m/2$, где членами порядка tr^2 пренебрегаем, а $\varphi_{об}$ – неизвестная фаза ЭПР объекта.

Если для оценки дальности использовать только частотныйо член в одноканальном приемнике действительного сигнала $(S_{нч}(t).+S_{нч}(-t).)/2$, то точность, представление и разрешение по дальности будут определяться величиной изменения фазы за полцикла модуляции и для разрешения по дальности $\Delta t_r=2\cdot\Delta R/c$ за 1/2 периода модуляции это изменение $(\Delta t_r\cdot\Delta\omega_m)$ должно быть более π. Это условие в данном случае необходимо для определения соотношения фазового изменения сигнала к его неизвестной амплитуде.

Оценить потенциальную погрешность определения дальности по фазовой компоненте можно как $\Delta t_r\cdot\Delta\omega_m \geq 2\Delta\varphi_{мин}$, где $\Delta\varphi_{мин}$ - среднеквадратичное значение фазовой ошибки за время накопления, определяемое аддитивными шумами, фазовой внутрицикловой паразитной модуляцией передатчика, остаточными квадратурными ошибками в тракте приемника и калибратора и вполне достижимо значение π/50.

Для проверки возможностей метода проведено моделирование с оценкой взаимнокорреляционной функции откликов при изменении дальности и доплеровской частоты. В модели, исходя из проведенных оценок, приняты удобные для реализации параметры сигналов: минимальная частота несущей 20 ГГц, размах девиации частоты в пределах цикла 1 ГГц. За время измерения 100 мкс проводится 26 циклов качания частоты, отдельно проверялось междуцикловое смещение частоты на (100..200)/26 МГц. Моделируемые сигналы квантовались по времени с частотой дискретизации 16 МГц.

В приведенных ниже примерах единица изменения дальности равна 3 см, шаг изменения доплеровской частоты 6.25 кГц (что соответствует частоте биений по дальности 0.02 см). Показаны срезы автокорреляционной функции (АКФ) при изменении в качестве параметра доплеровской частоты (синий – автокорреляционный отклик с основным пиком на дальности 31 что соответствует 90 см). Вторые графики показывают положения всех максимумов той же корреляционной функции (КФ) при изменении доплеровской частоты (вид на тело функции в плоскости изменения Fд). Ось дальности – dim2, ось Fд - dim1.

Пример 1 (рисунки 4-5). Первая оценка приведена для варианта простого накопления сигналов без дополнительного учета внутрицикловой и междуцикловой связи сигналов.

Здесь полуширина АКФ по уровню 50 % около 3.75, т.е. разрешение по дальности 11 см, уровень боковых лепестков АКФ менее 21 %.

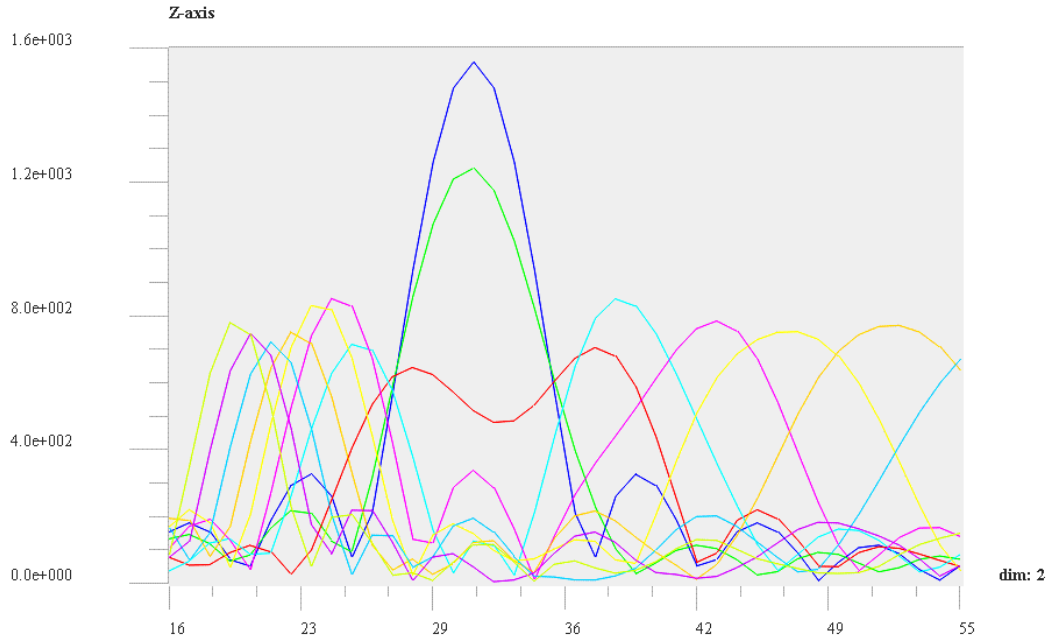


Рисунок 4. Вид автокорреляционной функции при изменении доплеровской частоты. (Пример 1)

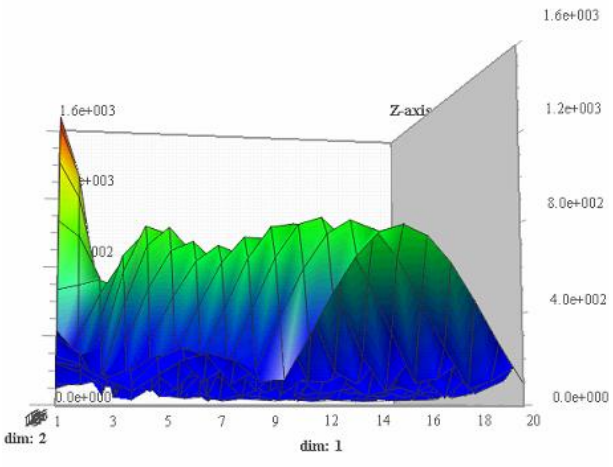


Рисунок 5. Положения максимумов корреляционной функции.

Уровень пиков КФ при изменении Fд велик – до 53 % от пика АКФ (на подобных графиках для других дальностей он меньше – зависит от соотношения основной частоты отклика к длительности цикла).

Пример 2 (рисунки 6-7). В примере приведены корреляционная функция откликов для варианта последовательного применения двух корреляционных фильтров: первый – совпадения сигналов за время измерения и второй – совпадения продуктов комбинации четных и нечетных полуциклов за время измерения.

Здесь полуширина АКФ по уровню 50 % около 1.5, т.е. разрешение по дальности 4.5 см, уровень первых боковых лепестков АКФ менее 10 %, последующих существенно меньше.

Уровень пиков КФ при изменении Fд – до 27 % от пика АКФ – по сравнению с примером 1 уменьшился, но их величина не уменьшается с увеличением отстройки по дальности и по Fд.

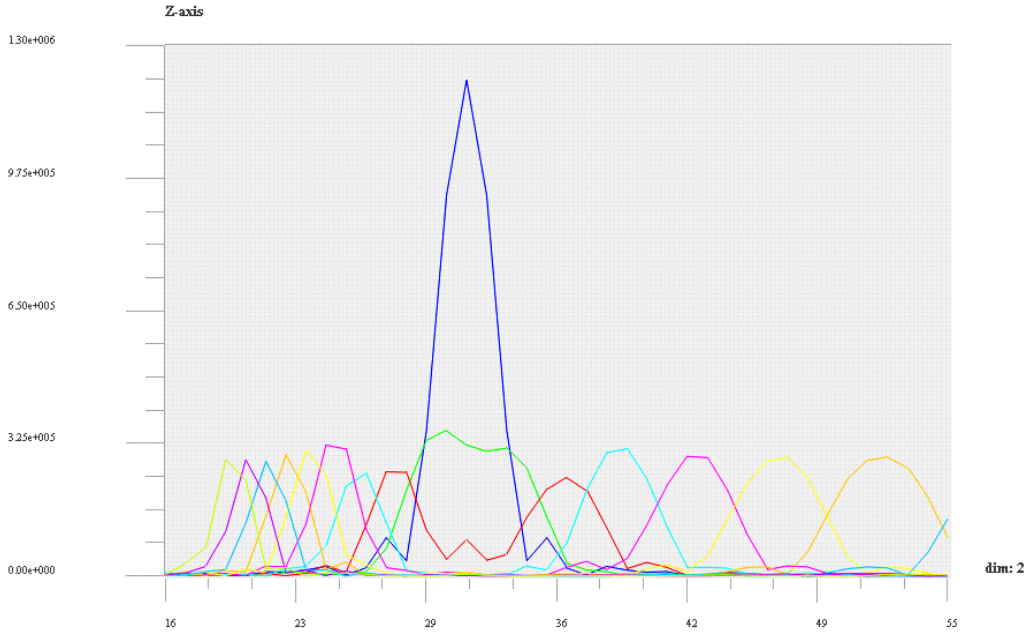


Рисунок 6. Вид автокорреляционной функции при изменении доплеровской частоты. (Пример 2)

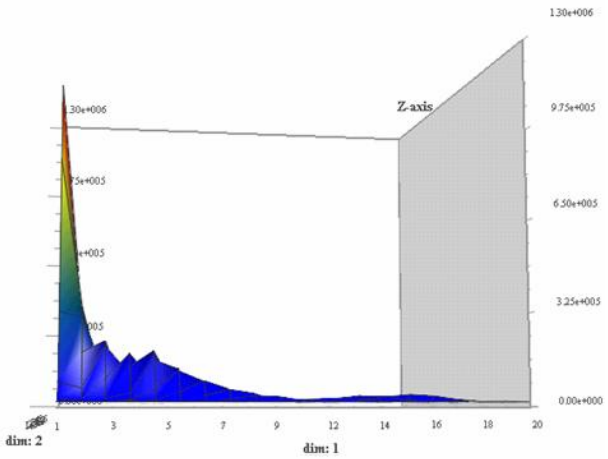


Рисунок 7. Положения максимумов корреляционной функции. (Пример 2)

Всего в рамках данного этапа работ проведено порядка 40 циклов расчетов с целью оценки влияния изменения схемных решений и режимов обработки сигналов на основные параметры системы. Для иллюстрации на рисунке 8 приведен вид области КФ для смещения по дальности более 30 см в случае применения двух корреляционных фильтров (аналогично примеру 2) и дополнительного смещения частоты несущей на 7.69 МГц (с общим смещением за 26 циклов на 200 МГц).

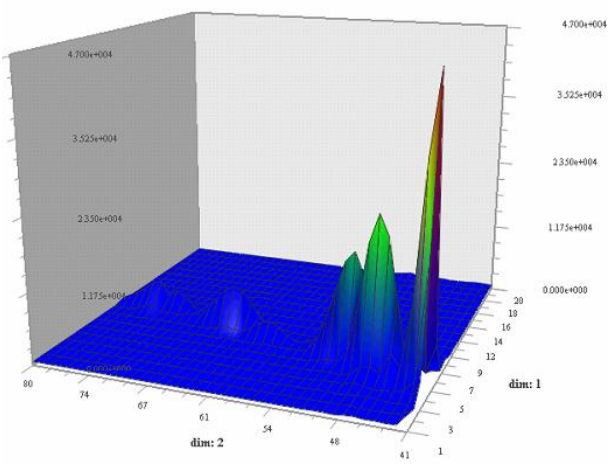


Рисунок 8. Положения максимумов корреляционной функции (Пример 3)

В сравнении с примером 2, форма АКФ и разрешение по дальности почти не имеют изменений, а пики КФ при изменении Fд существенно уменьшены и их величина резко снижена при росте Fд (напомним, что диапазон показанных здесь Fд мал). Уровень лепестков АКФ при отстройке по дальности: 30 см -42 дБ, 60 см –48 дБ.

По данной проекции КФ видно, что введение простейшей дополнительной межцикловой модуляции существенно улучшает разрешение по Fд. Пики КФ резко спадают при смещении по Fд и по дальности, причем максимумы располагаются в виде узкой цепи, т.е. при возможных флуктуациях Fд эти характеристики существенно улучшатся. Аналогичные расчеты выполнены и для существенно больших величин Fд.

Проведенное расчетное моделирования сигналов, некоторые результаты которого приведены выше, подтвердили хорошие возможности по обнаружению и различению сигнала при высокой скорости модуляции. При девиации частоты 1 ГГц (плюс 0.2 ГГц дополнительная ступенчатая), длительности цикла модуляции 3.85 мкс достижимы (за 100 мкс времени измерения) уверенное разрешение по дальности лучше 3 см (по крутизне спада основного лепестка АКФ) и достаточное разрешение по доплеровской частоте, а также существенное снижение влияния паразитных АФМ.

Следует отметить, что если структурная схема устройства практически полностью определена и подтверждена макетированием отдельных элементов системы, то в отношении способа модуляции и алгоритма обнаружения/фильтрации приведенные результаты необходимо считать предварительными и оценочными и требуется специальный этап работ по углубленной проверке. С этой целью начат этап дополнительного анализа ранее описанных сигналов. Целью его является оптимизация системы путем построения байесовского фильтра оценки сигнала на фоне шума и помех. Анализ проводится путем построения методом регрессии системы линейных фильтров различения сигналов для различных наборов точек в поле дальность - доплеровское смещение, усреднения по нескольким дополнительным параметрам и определения ошибки распознавания сигналов. Предварительные результаты подтверждают возможность построения линейных фильтров различения сигналов с обеспечением разрешающей способности по дальности лучше 3 см.

В целом результаты данной работы подтвердили возможность и эффективность использования ЧМ радаров в качестве системы микроволновой диагностики плазмы в диапазоне частот порядка 200 ГГц с высоким уровнем вибрационной и шумовой устойчивости. В рамках следующих этапов создания имитационного стенда планируется продолжение работы.

Литература

1. Кенжин, Е. А. Экспериментальные стенды для подготовки и сопровождения исследований на токамаке КТМ / Е. А. Кенжин [и др.] // Экспериментальные возможности токамака КТМ и программа исследований : докл. Междунар. семин.: тез., Астана, 10-12 октября 2005 г. – Астана: ДГП ИЯФ НЯЦ РК, 2005. – 150 с.
2. Стрелков, В. С. Физические основы методов диагностики плазмы / В. С. Стрелков. – М. : МИФИ, 2004. – 345 с.
3. Орлинский, Д. В. Диагностика плазмы на крупных токамаках / Д. В. Орлинский // Обзор. – М. : ЦНИИатоминформ, 1984. – 471 с.
4. Финкельштейн, М. И. Основы радиолокации / М. И. Финкельштейн, - М. : Советское радио, 1973. – 620 с.
5. Малых, Н. И. Интерферометрия высокотемпературной плазмы в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне волн / Н. И. Малых, Е. П. Горбунов, Е. С. Ямпольский // Диагностика плазмы: сб.ст. / Энергия, - М.: 1981. - вып. 4.1. – С. 512 -516.
6. Fukuda, T. Rev.Sci.Instrum / T. Fukuda, A.Nagashima. - 60, 6, 1989.
7. Koslowsci, H. R. Fusion Engineering and Design / H. R. Koslowsci, H. Soltwisch. - 34-35, 143, 1997.
8. Kawano, Y. Rev.Sci.Instrum / Y. Kawano [et.al.] - 67, 1520, 1996.
9. Лукьянов, С. Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез / С. Ю. Лукьянов. – М. : Наука, 1975. – 130 с.
10. Коган, И.М. Многоканальная взаимно корреляционная обработка сигнала как метод повышения помехоустойчивости при ограниченном времени анализа / И.М. Коган // Теоретические оценки : «Радиотехника», - 1967. - Т. 22, № 3. – С. 46-48.

ПЛАЗМА ДИАГНОСТИКАСЫНЫҢ ЖИІЛІКТІ МОДУЛЬДІ РАДАРЫ

[1)]Колтыгин О.В., [2)]Логачев Ю.В., [3)]Мартынов С.Б.

[1)]Автоматтық құралдардың ҒЗИ ФМУК, Новосибирск, Ресей
[2)]ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан
[3)]«Веган МКБ, Новосибирск, Ресей

КТМ плазманың микротолқынды диагностикасы жүйелерінің радиотехникалық ерекшеліктерін талдау зерттеудің өзіндік көзқарасымен зертханалық жағдайда орындалды. Еліктеуіш стендінің бақылаулық-өлшеуіш жүйелерінің бірі ретінде дірілдеуге орнықтылығы жоғарылатылған ЖМ-радарын қолдану бойынша техникалық ұсыныстар өңделді.

Келешекте ЖМ-радарын плазманың микротолқынды диагностикасының қосалқы жүйесі ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылды.

ЖМ-радарының базалық параметрларын анықтайтын негізгі техникалық талаптары жетілдірілді және қондырғының құрылымдылық схемасы өңделді. Жиілікті модульдеу симметриялық заңының нұсқауы таңдап алынды, оның базалық сипатының есептемелерін бағалау, жеке алғанда девиация жиілігінің ауқымы аса жоғары жиілікті амплитудалық жиілік сипаттама жолының рауалы қателігінің ұзақтық бойынша берілген рұқсатын талап ететін, допплерлік жиіліктен тосып отырған қателік ауқымы, ұзақтығын бағалауға қажетті когеренттік жинақ т.б. орындалды.

ЖМ-радар конфигурациясы негіздемесінде ЖМ-радардың жеке элеметтерін үлгілеу жүргізілді.

Алынған нәтижелер ЖМ-радарын плазманың микротолқынды диагностикасының жүйесінде 200 ГГц реттік жиілікте жоғарғы деңгейлі дірілдету және шуылдық орнықтылғын қолданудың мүмкіндігі мен тиімділігін құптады.

Жұмыс нәтижелері токамактарда келешекте плазманың микротолқынды диагностикасы жүйелерін өңдеу кезінде қолданылуы мүмкін.

FREQUENCYMODULATED RADAR FOR PLASMA DIAGNOSTIC

[1)]O.V. Koltygin, [2)]Yu.V. Logachev, [3)]S.B. Martynov, [1)]V.A. Ponomarev

[1)]FSUE SRI of automatic apparatus, Novosibirsk, Russia
[2)]Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan
[3)]DO "Vega", Novosibirsk, Russia

The analysis of the microwave system KTM plasma diagnostic radiotechnical features in the view of specificity analysis their description in laboratory conditions is carried out. The technical offers by application as one of checking measuring system of FM (frequency modulated) radar simulation stand with advanced chatter stability is designed.

The perspective availability of FM radar as additional microwave system plasma diagnostic is examined.

The basic technical requirement, definitory basic parameters of FM radar is formulated and structural scheme of device is designed. The variant of frequency modulation symmetrical low is selected, designed appraisals its basic characteristic are carried out.

The prototyping of FM radar individual elements for FM radar configuration ground is carried out.

The findings confirmed the possibility and FM radar employment effectiveness as microwave system plasma diagnostic in the frequency range about 200 GHz with high level of vibratory and noise stability. The work results can be use in design perspective system of TOKAMAK microwave plasma diagnostic.

УДК 539.21: 621.039

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Бакланов В.В., Дерявко И.И., Кукушкин И.М., Малышева Е.В.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Представлено обобщение и анализ результатов освидетельствования состояния образцов-свидетелей исследовательского реактора ИВГ.1М, а также деталей одного из его водоохлаждаемых технологических каналов.

Введение

Реактор ИВГ.1М, как известно, проходит периодические проверки технического состояния. В ходе каждой из таких проверок проводятся также и освидетельствования состояния образцов-свидетелей, отслеживающих состояние деталей водоохлаждаемой центральной сборки реактора и его водоохлаждаемых технологических каналов (ВОТК). Образцами-свидетелями деталей центральной сборки являются 110 стержневых образцов из нержавеющей стали 08Х18Н10Т, бериллия с защитными покрытиями, циркоций-ниобиевого сплава Э110 и титан-гадолиниевого сплава 17, которые находятся в ячейках межканального бериллиевого вытеснителя реактора с 1975 года. Образцы в каждой их четырех ячеек вытеснителя размещаются в съемных трубчатых пеналах. В качестве примера на рисунке 1 показаны образцы, выгруженные из одной ячейки вытеснителя для проведения очередного их освидетельствования.



Рисунок 1. Образцы-свидетели из пенала ячейки №3 межканального вытеснителя реактора

Образцами-свидетелями деталей технологических каналов ВОТК являются 205 образцов в форме пластин из алюминий-магниевого сплава АМг6М и нержавеющей стали 12Х18Н10Т (из таких материалов изготовлено большинство деталей канала). Эти образцы находятся в специальном канале КВК-300 водяного контура реактора с 1990 года (канал КВК-300 размещен вне корпуса реактора).

Образцы размещены в кассете канала КВК-300 (рисунок 2) в двадцати разборных блоках, содержащих по 8, по 10 или по 13 образцов. В десяти блоках размещаются пассивированные и непассивированные АМг6М-образцы, дистанционированные друг от друга внутри блока капроновыми втулками на стержнях крепления, а в остальных десяти – по 5 пар АМг6М- и 12Х18Н10Т-образцов (каждая пара плотно контактирующих друг с другом разнородных по материальному составу образцов дистанционирована от соседней пары внутри блока капроновыми втулками).

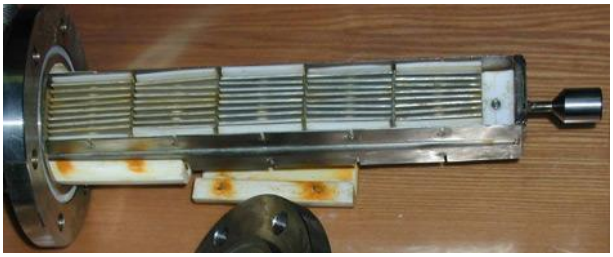


Рисунок 2. Кассета с образцами-свидетелями, частично выдвинутая из корпуса канала КВК-300

Всего для получения опосредствованных данных по состоянию деталей реактора ИВГ.1М было проведено пять освидетельствований состояния его образцов-свидетелей. Кроме того, для получения непосредственной информации о состоянии деталей каналов ВОТК в 2004 году была выполнена разделка и поэлементное обследование деталей одного из тридцати технологических каналов реактора – канала ВОТК №4.

В связи с отмеченным в настоящей работе проведено обобщение и совместный анализ ранее полученных результатов исследований [1-6] по освидетельствованию состояния образцов-свидетелей и обследованию деталей разделанного технологического канала после длительного нахождения этих образцов и деталей в неподвижной дистиллированной воде при комнатной температуре (в межпусковые периоды) и периодического кратковременного нахождения в протоке дистиллированной воды при температуре до 95°С (в пусковые периоды).

При этом основной целью такого анализа являлось выяснение того, насколько адекватно образцы-свидетели отслеживают коррозионные и радиационные изменения состояния деталей активной зоны реактора. Действительно, как видно из таблицы 1, степень упомянутой адекватности можно установить путем сопоставления состояния деталей канала ВОТК из нержавеющей стали, циркоций-ниобиевого сплава, а также пассивированных и непассивированных деталей из алюминий-магниевого сплава с состоянием образцов-свидетелей из тех же материалов, испытывавшихся в канале КВК-300 и в межканальном вытеснителе.

Таблица 1. Материалы исследуемых образцов и деталей

Образцы из вытеснителя	Образцы из канала КВК-300	Детали из канала ВОТК
08Х18Н10Т	12Х18Н10Т	12Х18Н10Т
(Zr,Nb)-сплав	-	(Zr,Nb)-сплав
-	АМг6М (пасс.)	АМг6М (пасс.)
-	АМг6М (непасс.)	АМг6М (непасс.)
-	-	АМг5М (пасс.)
Бериллий	-	-
(Ti,Gd)-сплав	-	-

К сожалению, для деталей реактора, изготовленных из титан-гадолиниевого сплава и бериллия с защитным покрытием, такое сопоставление осуществить было невозможно, поэтому состояние этих деталей будет предполагаться полностью соответствующим состоянию Be- и (Ti,Gd)-образцов-свидетелей.

ОБРАЗЦЫ БЕРИЛЛИЯ С ПОКРЫТИЕМ

Поверхности бериллиевых образцов были защищены одним из трех типов покрытий – серым оксидным (таким покрытием защищены и бериллиевые детали реактора), белым эматалевым или черным оксидным. У представляющих наибольший интерес Be-образцов с серым оксидным покрытием коррозионное изменение цвета покрытия с увеличением длительности испытаний было наименее заметным: исходный серый цвет лишь частично искажался налетом белого или светло-серого оттенков (рисунок 3). У Be-образцов с эматалевым покрытием цвет покрытия в конечном итоге становился желто-коричневым, а у образцов с черным оксидным покрытием – почти белым.

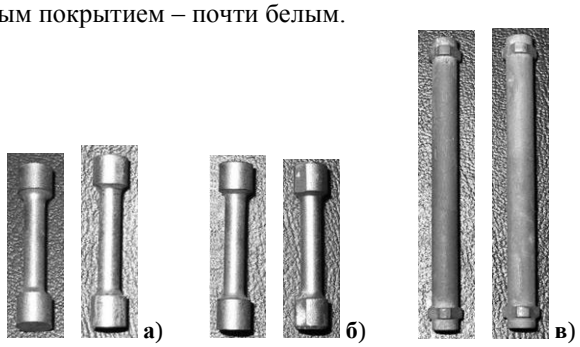


Рисунок 3. Бериллиевые образцы с серым оксидным покрытием до (везде слева) и после (везде справа) испытаний в течение 9,8 (а), 22,3 (б) и 29,4 лет (в)

Количественные показатели коррозионного повреждения бериллия, защищенного покрытием, определялись по удельным привесам образцов. Из рисунка 4 можно видеть, что средняя за первые 22,3 года испытаний скорость их коррозии равна примерно 0,05 мг/(м^2·ч). То есть покрытия надежно защищают бериллий от взаимодействия с водой.

Что касается радиационного повреждения бериллия, то при освидетельствовании состояния образцов-свидетелей в 2004 году было показано, что влияние облучения флюенсом быстрых нейтронов примерно $7\cdot10^{19}$ см$^{-2}$ на структуру и свойства бериллия еще не обнаруживается; в частности, не обнаружено ни радиационного распухания бериллия, ни радиационного изменения его прочности и пластичности (например, предел прочности при изгибе сохранился на исходном уровне 940 МПа), а удельное электросопротивление увеличилось только на ~1 %. Полученный результат хорошо согласовался с известными данными Г.А. Серняева [7].

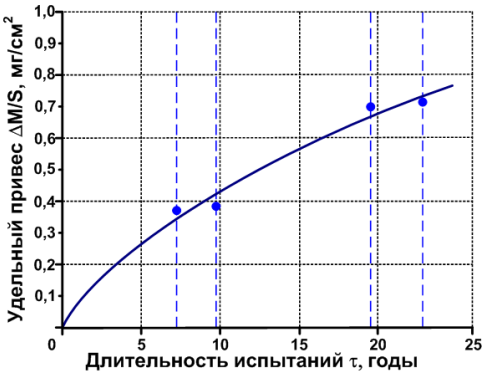


Рисунок 4. Кинетика коррозионных привесов Be-образцов с покрытиями

ОБРАЗЦЫ ТИТАН-ГАДОЛИНИЕВОГО СПЛАВА

Визуальным обследованием образцов установлено в целом удовлетворительное коррозионное состояние поверхностей образцов-свидетелей из (Ti,Gd)-сплава: светлая блестящая поверхность образцов в отдельных участках содержала налет неяркого светло-серого оттенка (рисунок 5).



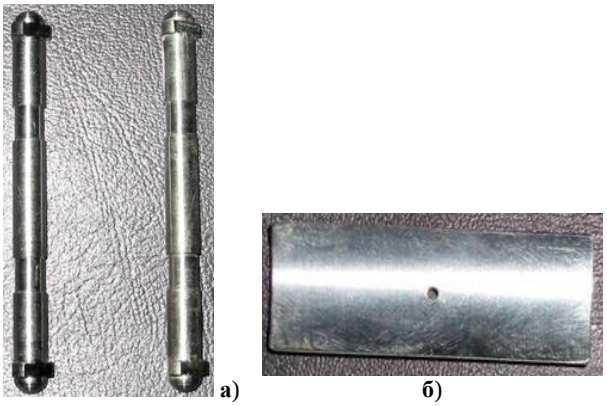
Рисунок 5. Титан-гадолиниевый образец до (слева) и после (справа) 29,4-летних испытаний

Степень радиационного повреждения этих образцов-свидетелей не исследовалась.

СТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ И ДЕТАЛИ

При визуальном обследовании образцов-свидетелей из нержавеющих сталей, испытанных в межканальном вытеснителе реактора и в канале КВК-300, и деталей из нержавеющей стали канала ВОТК №4 установлено хорошее соответствие степени коррозионного повреждения поверхностей деталей и образцов-свидетелей; другими словами, стальные образцы-свидетели адекватно отслеживали коррозионное состояние стальных деталей активной зоны реактора (ср. рисунки 6 и 7).

Качественная оценка степени коррозионного повреждения образцов-свидетелей и деталей указала на высокую коррозионную стойкость нержавеющих сталей в водоохлаждаемом реакторе. При количественной определении степени коррозионной деградации стальных деталей реактора было получено полное подтверждение этому (рисунок 8): средняя за 14,3 года скорость коррозии стали составила всего лишь около 0,02 мг/(см^2·год).



а) **б)**

Рисунок 6. Стальные образцы: а) – образцы из стали 08Х18Н10Т до (слева) и после (справа) 29,4-летних испытаний в межканальном вытеснителе; б) – образец из стали 12Х18Н10Т после 14,3-летних испытаний в канале КВК-300

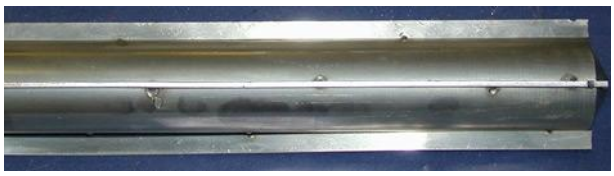


Рисунок 7. Пробка блока биологической защиты из стали 12Х18Н10 после 14-летней эксплуатации в канале ВОТК №4

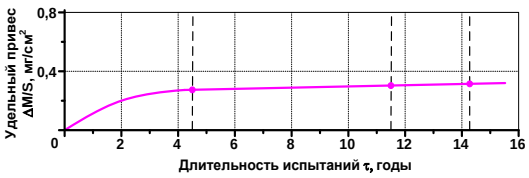
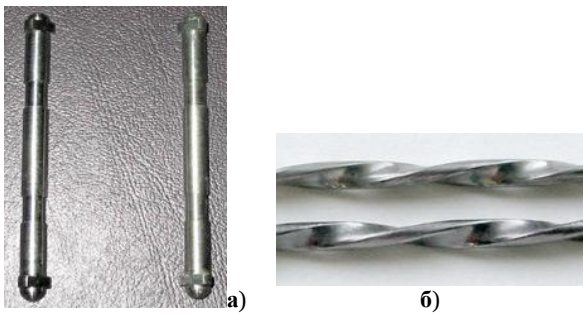


Рисунок 8. Кинетика коррозионных привесов образцов из стали 12Х18Н10

Степень радиационного повреждения стальных образцов-свидетелей и деталей не исследовалась.

ЦИРКОНИЙ-НИОБИЕВЫЕ ОБРАЗЦЫ И ДЕТАЛИ

Обследование циркоций-ниобиевых образцов-свидетелей из межканального вытеснителя и циркоций-ниобиевых деталей канала ВОТК №4 выявило у них такую же, как у стали, высокую коррозионную стойкость (рисунок 9) и такую же адекватность отслеживания образцами-свидетелями коррозионного состояние (Zr,Nb)-деталей активной зоны реактора.



а) **б)**

Рисунок 9. (Zr,Nb)- образцы (а) до (слева) и после (справа) 29,4-летних испытаний в вытеснителе и фрагменты твэлов (б) с (Zr,Nb)- оболочкой до (вверху) и после (внизу) 14,3-летней эксплуатации в канале ВОТК №4

Радиационные изменения у (Zr,Nb)-деталей (облученных до флюенса быстрых нейтронов ~10^{19} см$^{-2}$) практически отсутствовали. В частности, у оболочек твэлов микротвердость после эксплуатации в реакторе осталась на исходном уровне, равном 1,55 ГПа.

АЛЮМИНИЙ-МАГНИЕВЫЕ ОБРАЗЦЫ И ДЕТАЛИ

Освидетельствованием этих образцов и деталей установлена полная адекватность отслеживания (Al,Mg)-образцами-свидетелями коррозионного состояния (Al,Mg)-деталей активной зоны реактора.

Коррозионное состояние пассивированных алюминий-магниевых образцов-свидетелей и пассивированных алюминий-магниевых деталей канала ВОТК №4 визуально было квалифицировано как вполне удовлетворительное (см. правые снимки на рисунках 10 и 11). У пассивированных (Al,Mg)-образцов, находящихся в механическом контакте со стальными, визуально не обнаруживалось влияния контактной и щелевой коррозии, способной привести к усилению коррозии (Al,Mg)-поверхностей [8]. Степень коррозионного повреждения поверхностей у всех непассивированных (Al,Mg)-образцов была заметно выше, чем у пассивированных (см. левые снимки на рисунках 10 и 11).

При количественном определении уровня коррозионного повреждения образцов-свидетелей (а следовательно, и деталей технологических каналов реактора), проведенном путем измерения скорости коррозии $К_М$ и глубинного показателя коррозии $К_П$ [9, 10], было получено убедительное подтверждение результатов визуального освидетельствования образцов и деталей.

Скорости коррозии $К_М$, как можно видеть из кинетических кривых на рисунке 12, у непассивированного АМг6М-материала заметно выше, чем у пассивированного. В частности, средние за 14,3 года скорости коррозии у пассивированного и непасси-

вированного материала составляют соответственно 0,04 и 0,12 мг/(см^2·год). Самый важный показатель коррозионной стойкости конструкционного материала, т.е. глубинный показатель $К_П$, характеризующий среднюю (за время испытания или эксплуатации) скорость коррозии внутрь материала, также оказался различным для пассивированного и непассивированного АМг6М-материала, а именно: 0,0008 мм/год у пассивированного и 0,0018 мм/год у непассивированного.



Рисунок 10. Непассивированный (слева) и пассивированный (справа) АМг6М-образцы после 14,4-летних испытаний в канале КВК-300

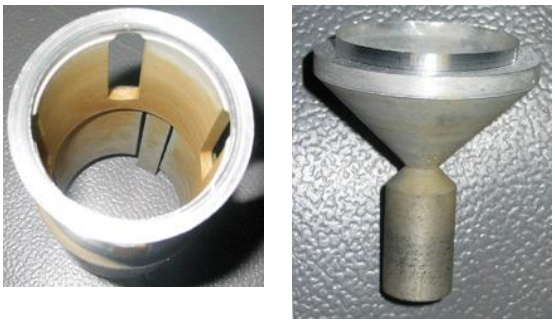


Рисунок 11. Непассивированная (слева) и пассивированная(справа) АМг6М-детали канала ВОТК №4 после 14-летней эксплуатации в канале ВОТК №4

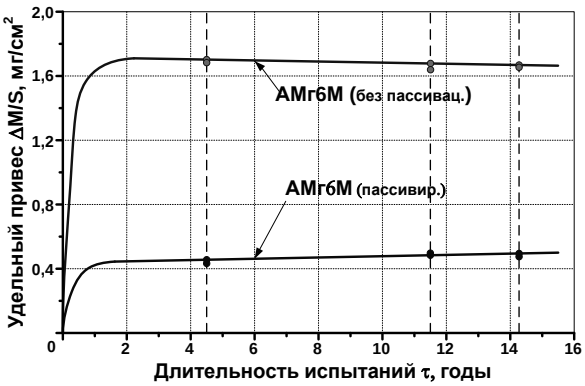


Рисунок 12. Кинетика коррозионных привесов алюминий-магниевых образцов-свидетелей

Необходимо отметить, что полученные данные по скоростям $К_П$ свидетельствуют о высокой коррозионной стойкости АМг6М-материала. Действительно, глубины коррозионного разрушения поверхностей у алюминий-магниевых образцов-свидетелей за 125300 часов нахождения в холодной неподвижной воде (и 235 часов нахождения в горячей движущейся воде) оказываются незначительными: 11 мкм у пассивированных образцов и 26 мкм у непассивированных.

Результаты исследований радиационной стойкости алюминий-магниевого материала, выполненные рентгеноструктурными и прочностными методами на образцах, вырезанных из корпуса ВОТК №4 и корпуса необлученного канала, показали, что облучение флюенсом быстрых нейтронов порядка 10^{19} см$^{-2}$ при температуре до ~95^{o}С не приводит к заметному накоплению в АМг5М-материале радиационных дефектов и к соответствующим изменениям его прочности и пластичности. В частности, значения прочности при растяжении и относительного удлинения составили 290 МПа и 7 % у исходных образцов и 290 МПа и 8 % у облученных.

Выяснено также, что облучение флюенсом тепловых нейтронов ~$2\cdot10^{19}$ см$^{-2}$ при температуре до ~95^{o}С приводит к очень слабому радиационному повреждению материала сердечников твэлов: распухание твэлов отсутствовало, микротвердость (U,Zr)-сердечника до и после облучения была равна 1,8 ГПа, а такие чувствительные характеристики, как электросопротивление и период решетки, увеличились соответственно только на 1,3 и 0,002 %.

Необходимо отметить, что отсутствие радиационного распухания твэлов (утолщения и удлинения топливных стержней) является важным положительным моментом: твэлы не вносят свой вклад в повышение гидравлического сопротивления внутреннего тракта охлаждения канала. Следовательно, это повышение может быть связано только с исчезновением (засорением) проходного сечения в тонком зазоре между гильзой тепловыделяющей сборки и корпусом канала (засорение было вызвано смывом порошка ржавчины с поверхности пружины поджатия, изготовленной из углеродистой стали). Эффект засорения может уменьшить проходное сечение тракта охлаждения канала, как следовало из расчетов, не более чем на 3 %, что находится в допустимых пределах, указанных разработчиком каналов ВОТК. Полученный результат позволяет считать возможным дальнейшую безопасную эксплуатацию каналов ВОТК в реакторе ИВГ.1М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщены результаты периодических освидетельствований коррозионного и радиационного состояния образцов-свидетелей из бериллия, нержавеющих сталей, цирконий-ниобиевого, титан-гадолиниевого и алюминий-магниевого сплавов, отслеживающих состояние деталей реактора ИВГ.1М, а также результаты послереакторного исследования коррозионного и радиационного состояния деталей одного из тридцати технологических каналов реактора. Совместным анализом этих результатов выяснено, что образцы-свидетели адекватно отслеживают коррозионные и радиационные изменения состояний деталей активной зоны реактора. Подтверждена высокая коррозионная и радиационная стойкость материалов деталей, эксплуатирующихся в активной зоне реактора. Все представленные результаты свидетельствуют о возможности дальнейшей эксплуатации исследовательского реактора ИВГ.1М.

Литература

1. Контроль состояния узлов, деталей и материалов реактора ИВГ.1М / И. И. Дерявко И.И [и др.] // 20 лет энергетического пуска реактора ИВГ.1: докл. научно-практ. конф., Курчатов, 26–27 апр. 1995. – Курчатов, ИАЭ НЯЦ РК, 1995. – С.. 48–51.
2. Радиационная и коррозионная стойкость бериллиевых образцов-свидетелей реактора ИВГ.1М / В. В. Бакланов [и др.] // Вестник НЯЦ РК / НЯЦ РК. – 2004. – Вып. 4(20). – С. 85–89.
3. Бакланов, В. В. Коррозионная стойкость в воде образцов алюминиевого сплава и нержавеющей стали / В. В. Бакланов , И. И. Дерявко, Е. В. Малышева // Вестник НЯЦ РК / НЯЦ РК. – 2005. – Вып. 1(21). – С. 19–23.
4. Состояние деталей канала ВОТК №4 после 14-летней эксплуатации в реакторе ИВГ.1М / В. В. Бакланов [и др.] // Там же. – С. 24–28.
5. Отработка методик определения скоростей коррозии алюминий-магниевых образцов в воде / В. В. Бакланов [и др.] // Там же. – С. 29–33.
6. Белоус, В. Н. Состояние деталей активной зоны реактора ИВГ.1М после 30-летней эксплуатации / В. Н. Белоус [и др.] // Ядерная и радиационная физика : докл. V межд. конф., Алматы, 26–29 сент. 2005. – Алматы, ИЯФ НЯЦ РК, 2005. – С. 501–508.
7. Серняев, Г. А. Радиационная повреждаемость бериллия / Г. А. Серняев. – Екатеринбург : Изд-во "Екатеринбург", 2001. – 396 с. – ISBN 5-884464-040-4.
8. Герасимов, В. В. Материалы ядерной техники / В. В. Герасимов, С. С. Монахов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 288 с.
9. Жук, Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. – М. : Металлургия, 1976. – 472 с.
10. Фокин, М. Н. Методы коррозионных испытаний / М. Н. Фокин. – М. : Металлургия, 1986. – 342 с.

ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢТЫЛСЫМ АЙМАҒЫ БӨЛШЕКТЕРІН КУӘЛАНДЫРУ НӘТИЖЕЛЕРІНІҢ ТАЛДАУЫ

Бокланов В.В., Дерявко И.И., Кукушкин И.М., Малышева Е.В.

ҚР ҰЯО Атом энергиясы институты, Курчатов, Қазақстан

ИВГ.1М зерттеу реакторының куә-үлгілерінің куәландыру нәтижелерінің талдауы және жалпылауы, сондай ақ оның суды салқындату технологиялық канал жүргізулерінің бір бөлшегі келтіріледі.

ANALYSIS OF EXAMINATION RESULTS OF STATE OF IVG.1M REACTOR CORE PARTS

V.V. Baklanov, I.I. Deryavko, I.M. Kukushkin, E.V. Malysheva

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Generalization and analysis of examination results of check test pieces state of research reactor IVG.1M and also parts of one of its water-cooling technological canals are presented.

УДК 550.344

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ СИЛЬНЫХ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНАХ ТЯНЬ-ШАНЯ И ПАМИРА: СВИДЕТЕЛЬСТВА МИГРАЦИИ ЮВЕНИЛЬНЫХ ФЛЮИДОВ

[1,2)]Копничев Ю.Ф., [2)]Соколова И.Н.

[1)]Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия
[2)]Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Анализируются пространственно-временные вариации макросейсмических эффектов для 32 сильных землетрясений (M≥6.0), произошедших в районах Тянь-Шаня и Памира в 1885-1992 гг. Рассматриваются значения таких параметров как средние радиусы 6- и 7-балльных изосейст, приведенные к магнитуде M=7.0 (R^1_6 и R^1_7), а также отношение среднего радиуса 4-балльной к радиусам 6- и 7-балльных изосейст (R_4/R_6 и R_4/R_7). Установлено постепенное уменьшение значений параметров R^1_6 и R^1_7, а также параметров R_6/R_4 и R_7/R_4 с конца 1800-х до 1970-1975 гг. и их резкое увеличение после 1975 г. Отмечено, что часто после сильных близких коровых землетрясений и глубокофокусных гиндукушских событий величины R^1_6 и R^1 резко падают, а величины R_4/R_6 и R_4/R_7 в среднем возрастают. Предлагается объяснение обнаруженных эффектов подъемом ювенильных флюидов в верхнюю кору в очаговых зонах сильных коровых землетрясений, а также в крупных разломных зонах после сильных глубокофокусных событий и дальнейшей миграцией их в горизонтальном направлении, что приводит к увеличению затухания амплитуд сильных движений. Имеющиеся геофизические и геохимические данные не противоречат такой интерпретации.

Введение

К настоящему времени накоплен значительный объем данных о макросейсмических проявлениях сильных землетрясений (в первую очередь на территории бывшего СССР), установлены существенные вариации скорости затухания балльности в различных тектонических провинциях [1-4 и др.], получены корреляционные зависимости между интенсивностью сотрясений и главными параметрами сильных движений (ускорением, скоростью, смещением) [5]. Вместе с тем, до сих пор мало что известно о возможности временных вариаций макросейсмических эффектов сильных землетрясений в целом для больших регионов, а также о влиянии отдельных сильных событий на характеристики макросейсмического поля при землетрясениях, относительно близких во времени и в пространстве. Такие данные могут дать ценную дополнительную информацию о характере геодинамических процессов в тектонически активных районах, в частности, о возможной миграции глубинных флюидов, на которую указывают результаты, полученные в целом ряде недавних работ [6-13]. Это связано с тем, что повышение содержания свободных флюидов приводит к резкому увеличению затухания короткопериодных поперечных волн, которым обычно соответствуют максимальные амплитуды ускорений и скоростей на записях сильных движений. В настоящей работе детально исследуются вариации макросейсмических эффектов сильных землетрясений в районах Тянь-Шаня и Памира, предварительные результаты изучения которых кратко изложены в [14].

Данные и методика

Для анализа использовались первичные данные о макросейсмических параметрах 32-х сильных коровых землетрясений Тянь-Шаня и Памира с M ≥6.0, произошедших с 1885 по 1992 гг. (рисунок 1, таблица 1), которые были опубликованы в [3] (до 1974 г. включительно), а также в сборниках «Землетрясения в СССР в 1975-1990 гг.» и «Землетрясения Северной Евразии в 1991-1995 гг.». Глубина гипоцентра h, определенная по инструментальным данным, не превышала 30 км (по макросейсмическим данным – 50 км). Для каждого землетрясения определены значения таких параметров макросейсмического поля как:

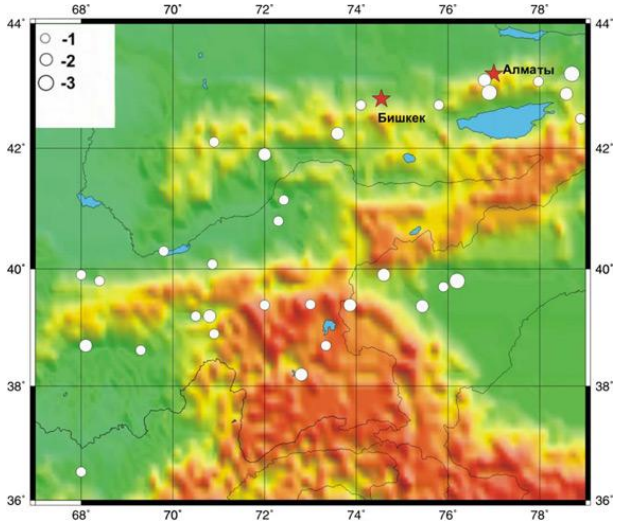
1) средние радиусы 6-балльной (R^1_6) и 7-балльной (R^1_7) изосейст (км), приведенные к магнитуде M=7.0;

2) отношения средних радиусов 4-балльной к радиусам 6- и 7-балльной изосейст (R_4/R_6 и R_4/R_7).

1. Средние радиусы 6-балльной (R^1_6) и 7-балльной (R^1_7) изосейст (км), приведенные к магнитуде M=7.0

При определении среднего радиуса изосейст использована магнитуда M_{LH} [3], индексы в обозначении которой далее для простоты опущены. Процедура приведения к единой магнитуде выполнена с использованием выражения из [3], связывающего интенсивность I (баллы), магнитуду M, средний радиус I-й изосейсты R_i (км) и глубину очага h (км) для региона Средней Азии, включающего Тянь-Шань и Памир:

$$I = 1.5\,M - 3.5\lg\sqrt{(R_i^2 + h^2)} + 3.0 \qquad (1)$$



Магнитуда:1- 7.0>M≥6.0; 2 - 8.0>M≥7.0; 3 – M≥8.0.

Рисунок 1. Район исследований. Эпицентры сильных коровых землетрясений

Таблица 1. Параметры сильных коровых землетрясений Тянь-Шаня и Памира

Название	Год	Дата	φ°	λ°	h, km	M	R_6, км	R_4/R_6	R'_6, км	R_7, км	R_4/R_7	R'_7, км
Беловодское	1885	02.08	42.70	74.10	15	6.9	110		120	56		72
Верненское	1887	08.06	43.10	76.80	20	7.3	180	2.3	135	100	4.2	73
Чиликское	1889	10.07	43.20	78.70	40	8.3	370	2.2	100	230	3.5	51
Артышское	1896	01.11	39.70	75.90	25	6.6	80	4.3	120			
Уратюбинское (I)	1897	17.09	39.80	68.40	25	6.6	75	3.9	115			
Уратюбинское (II)	1897	17.09	39.90	68.00	45	6.7	105	3.4	145			
Кашгарское (I)	1902	22.08	39.80	76.20	40	8.1	290	2.5	100	165	4.4	41
Андижанское	1902	04.12	40.80	72.30	9	6.4	60	3.8	110	30	7.7	56
Айваджское	1906	24.10	36.50	68.00	32	6.8	90	5.6	115			
Каратагское (I)	1907	21.10	38.70	68.10	24	7.3	170	2.6	125			
Кеминское	1911	03.01	42.90	76.90	25	8.2	150	3.5	45	100	5.2	20
Сарезское	1911	18.02	38.20	72.80	26	7.4	130	2.1	90	80	3.4	51
Арганкульское (I)	1934	31.08	38.90	70.90	8	6.5	24		45	10		19
Пскемское	1937	18.11	42.10	70.90	25	6.5	55	4.9	95	7	9	34
Кемино-Чуйское	1938	20.06	42.70	75.80	21	6.9	105	4.7	115	50	9.8	56
Гармское	1941	20.04	39.20	70.50	8	6.4	60	3.5	110	30	7	56
Файзабадское	1943	11.01	38.62	69.30	10	6.0	36		100	18		55
Чаткальское	1946	02.11	41.90	72.00	30	7.5	170		100	80		43
Хаитское	1949	10.07	39.20	70.80	16	7.4	80	5.3	55	40	10.5	24
Улугчатское	1955	15.04	39.90	74.60	50	7.1	75	4.5	70			
Каракульское	1963	16.10	38.70	73.34	17	6.5	60	3.8	100			
Сарыкамышское	1970	05.06	42.48	78.89	15	6.8	35	6	45	14	15	20
Маркансуйское	1974	11.08	39.39	73.86	18	7.3	55	4.7	40			
Исфара-Баткенское	1977	31.01	40.08	70.86	25	6.1	37		106	13		64
Жаланаш-Тюпское	1978	24.03	42.88	78.58	15	7.0	90	2.8	90	37	6.8	37
Дараут-Курганское	1978	01.11	39.39	72.60	20	6.8	61	4.9	76	12.5	24	21
Алайское	1983	16.12	39.40	73.00	10	6.1	45	3.4	110	13	11.2	39
Кашгарское (II)	1985	23.08	39.37	75.44	20	7.0	210	1.9	210	112	3.6	112
Кайраккумское	1985	13.10	40.30	69.80	10	6.0	35	8.1	97	18	15.8	55
Байсорунское	1990	12.10	43.08	77.97	15	6.4	70		130	33		64
Кочкоратинское	1992	15.05	41.15	72.42	5	6.2	33		75	19		43
Сусамырское	1992	19.08	42.24	73.59	25	7.3	147		110	77		55

Зависимость между величинами I, M, R и h может несколько различаться для разных частей рассматриваемой территории, однако из-за недостаточности данных использование формулы (1) как первого приближения представляется оправданным (аналогично поступили авторы монографии [3]). Исходя из (1), получено выражение для определения приведенных радиусов R^1_6 и R^1_7, соответствующих магнитуде M=7.0:

$$\lg \sqrt{(R^{1,2}_i + h^2)} = \lg \sqrt{(R_i^2 + h^2)} - 0.43(M-7.0), \quad i=6,7, \quad (2)$$

где R_i (км) – исходные средние радиусы 6-балльной и 7-балльной изосейст для данного землетрясения.

Следует отметить, что при M<6.0 величины R_6, R_7 и h для района Средней Азии оказываются, как

правило, одного порядка, поэтому большие погрешности определения глубины гипоцентра (особенно до середины 20-го века) резко снижают точность оценки параметров R^1_6 и R^1_7. По этой причине события с M<6.0 исключены из анализа. Кроме того, не рассматривались недостаточно надежно определенные величины R_6 или R_7 (например, для Арганкульского землетрясения 1935 г. с M=6.1).

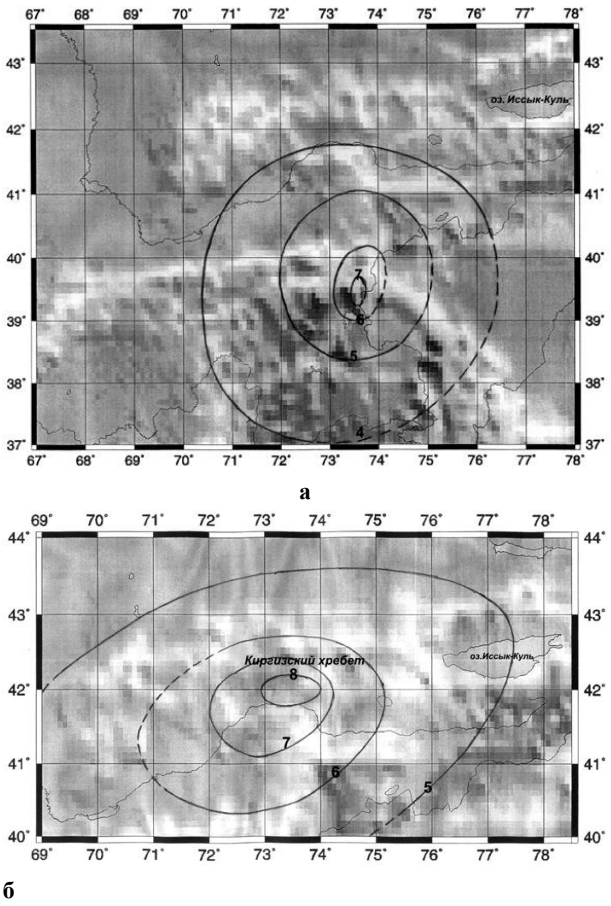
2. Отношение средних радиусов 4-балльной к радиусам 6- и 7-балльных изосейст (R_4/R_6 и R_4/R_7)

Выбор данного параметра связан с тем, что, во-первых, для I=4 - 7 баллов имеется наибольший объем данных. Во-вторых, как будет показано ниже, сейсмические волны, соответствующие 6- и 7-балльным изосейстам, распространяются в основном в верхней части земной коры, где, прежде всего, можно ожидать временные вариации скорости затухания интенсивности сотрясений. Это обусловлено тем, что именно в верхней части коры должна наблюдаться максимальная скорость миграции флюидов, поскольку эта часть разреза характеризуется наибольшей проницаемостью пород [15,16]. В то же время волны, соответствующие 4-балльным изосейстам проникают в нижнюю кору и верхи мантии, поэтому величину R_4 можно использовать в качестве референц-радиуса, на фоне которого удобно выделять временные вариации параметров R_6 и R_7.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

В таблице 1 приведены сведения о рассмотренных землетрясениях и параметрах R^1_6, R^1_7 и R_4/R_6, R_4/R_7. Величины R^1_6 варьируются от 40 до 210 км, составляя в среднем 101 ± 34 км. Приведенный радиус 7-балльной изосейсты изменяется от 20 до 112 км (в среднем R^1_7 =48±21 км). На рисунке 2 показаны изосейсты двух землетрясений, имеющих примерно одинаковую энергию – Маркансуйского 1974 г. и Сусамырского 1992 г. (таблица 1).

Очаги обоих землетрясений имели близкую глубину –18 и 25 км, соответственно, однако размеры площадей, оконтуренных изосейстами с высшими значениями, резко различаются. При Маркансуйском землетрясении макросейсмические эффекты оказались достаточно слабыми, что не позволило даже оценить площадь, оконтуренную 8-балльной изосейстой. Для Сусамырского землетрясения средний размер 6-балльной изосейсты почти в 3 раза больше, чем для землетрясения Маркансуйского. Вместе с тем, следует отметить резкую анизотропию макросейсмического поля этого землетрясения - высшие изосейсты явно сгущаются к северу и северо-востоку, по направлению к Киргизскому хребту.



а

б

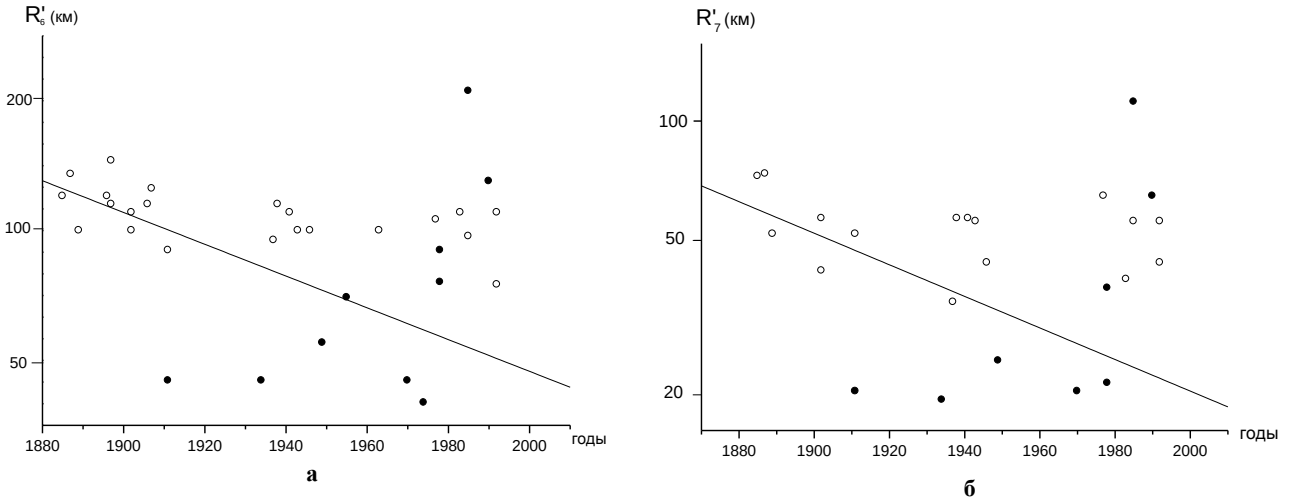
Рисунок 2. Примеры резкого различия размеров изосейст для двух землетрясений с M=7.3: а – Маркансуйского; б - Сусамырского

На рисунке 3 приведена зависимость величин R^1_6 и R^1_7 от времени, иллюстрирующая постепенное уменьшение значений этих параметров в период с конца 1800-х годов до 1970 - 1975 гг. Для интервала времени 1885 - 1975 гг. получены следующие корреляционные зависимости:

$$\lg R^1_6 \text{ (км)} = 9.015 - 0.0037T \text{ (лет)}, \quad r = -0.61, \quad (3)$$

$$\lg R^1_7 \text{ (км)} = 9.462 - 0.0041T \text{ (лет)}, \quad r = -0.53, \quad (4)$$

где r - коэффициент корреляции.



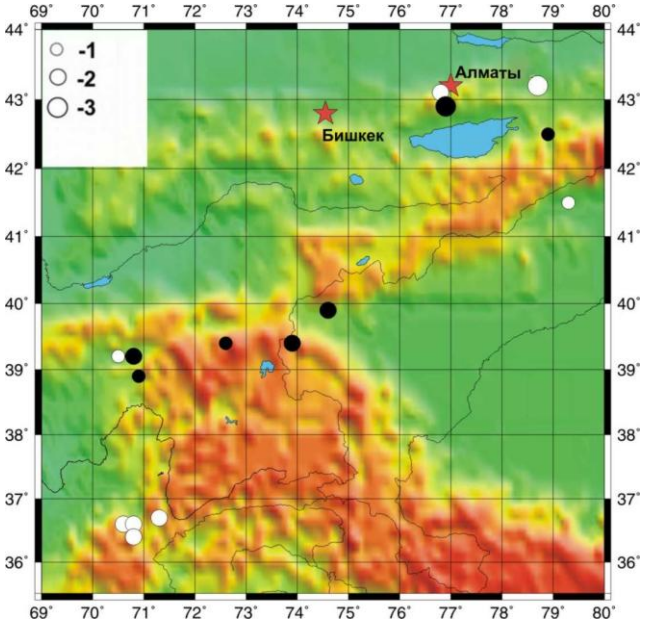
Залитые значки – данные по землетрясениям, произошедшим через короткий интервал времени после близких сильных коровых или глубокофокусных гиндукушских землетрясений. Прямая – линия регрессии по данным за 1885-1975 .

Рисунок 3. Зависимость от времени параметров: а - R'_6; б - R'_7

С середины 1970-х годов величины R^1_6 и R^1_7 значительно возрастают. В среднем за период 1977 - 1992 гг. R^1_6= 114±40 км, R^1_7 =54± 26 км. Важно, что существенно пониженные значения R^1_6 (40 – 76 км) отмечены для землетрясений Кеминского, Арганкульского (1), Хаитского, Улугчатского, Сарыкамышского, Маркансуйского и Дараут-Курганского. Для пяти из этих событий (за исключением Улугчатского и Маркансуйского землетрясений) получены также очень низкие величины R^1_7. Эпицентры четырех событий (Кеминского, Хаитского, Сарыкамышского и Дараут-Курганского землетрясений) находились на сравнительно небольших расстояниях (до 150 км) от эпицентров сильных коровых землетрясений, произошедших соответственно за время ΔT=22 - 24, 8, 1.3 и 4.2 года до них (таблица 2, рисунок 4). Кроме того, перед Арганкульским, Хаитским, Улугчатским, Маркансуйским и Дараут-Курганским землетрясениями (соответственно за 5.5; 0.3; 6; 0.03 и 4.3 года) произошли сильнейшие глубокофокусные гиндукушские землетрясения с магнитудой M от 7.2 до 7.7 на эпицентральных расстояниях до 500 км. (отметим, что здесь не рассматриваются геодинамические эффекты сильнейших гиндукушских землетрясений, проявлявшиеся иногда и на гораздо больших эпицентральных расстояниях [11]).

Таблица 2. Параметры землетрясений с аномально низкими величинами R'_6 и предварявших их сильных коровых и глубокофокусных событий

Название	Год	Дата	φ°	λ°	h, км	M	Δr*, км	ΔT, лет	V_f, км/год
Верненское	1887	08.06	43.10	76.80	20	7.3	24	24	
Чиликское	1889	10.07	43.20	78.70	40	8.3	150	22	
Кеминское	1911	03.01	42.90	76.90	25	8.2			14
Гиндукушское	1929	01.02	36.70	71.30	200	7.2	250	5.5	
Арганкульское (I)	1934	31.08	38.90	70.90	8	6.5			
Гармское	1941	20.04	39.20	70.50	8	6.4	26	8	
Гиндукушское	1949	04.03	36.60	70.60	300	7.7	290, 510	0.3; 6	
Хаитское	1949	10.07	39.20	70.80	16	7.4			13
Улугчатское	1955	15.04	39.90	74.60	52	7.1			
Гиндукушское	1965	14.03	36.60	70.80	215	7.7	415	9	
Кокшаальское	1969	11.02	41.50	79.30	25	6.6	120	1.3	
Сарыкамышское	1970	05.06	42.48	78.89	15	6.8			
Гиндукушское	1974	30.07	36.40	70.80	200	7.3	430, 370	0.03; 4.3	
Маркансуйское	1974	11.08	39.39	73.86	18	7.3	115	4.2	
Дараут-Курганское	1978	01.11	39.40	72.60	20	6.8			43
Примечание* - Δr - расстояние между эпицентрами соответствующих землетрясений в парах.									



Магнитуда землетрясений: 1 - 7.0>M≥6.0; 2 - 8.0>M≥7.0; 3 – M≥8.0

Рисунок 4. Эпицентры землетрясений с аномально низкими значениями R'_6 и R'_7 (залитые значки), а также предваряющих их сильных коровых и глубокофокусных событий

Очаговые зоны указанных событий с аномально низкими величинами R^1_6 и R^1_7 попадают внутрь 5- и 6-балльных (а для Кеминского и Хаитского землетрясений – даже 8- и 9-балльных) изосейст предварявших их сильных коровых и глубокофокусных землетрясений. Вместе с тем для нескольких землетрясений (Жаланаш-Тюпского, Кашгарского (II) и Байсорунского), также произошедших через сравнительно небольшие интервалы времени после близких сильных событий (8, 11 и 12 лет, соответственно), такой эффект не наблюдается. Для Кашгарского землетрясения даже получены аномально большие величины R^1_6=210 км и R^1_7=112 км. Следует, однако, заметить, что землетрясениям, предварявшим первые два из них (Сарыкамышскому и Маркансуйскому) соответствуют аномально малые площади, оконтуренные высшими изосейстами (в частности, 6-балльной изосейстой). В то же время «нормальные» величины параметра R^1_6 соответствуют паре Уратюбинских землетрясений 17.09.1897, которые произошли с интервалом 2 часа. Практически совпадают со средними значения R^1_6 Кемино-Чуйского (1938 г.) землетрясения, очаг которого попадает в область 8- и 9-балльных сотрясений при Кеминском (1911 г.) землетрясении. На рисунке 5а для рассматриваемых землетрясений представлена зависимость параметра R_4/R_6 от времени. Величины R_4/R_6 варьируются в диапазоне 2.1 - 6.0. Наблюдается увеличение во времени средних значений параметра вплоть до середины 1970-х годов. Уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$R_4/R_6 = -44.147 + 0.025T \text{ (лет)}, \quad r = 0.61. \qquad (5)$$

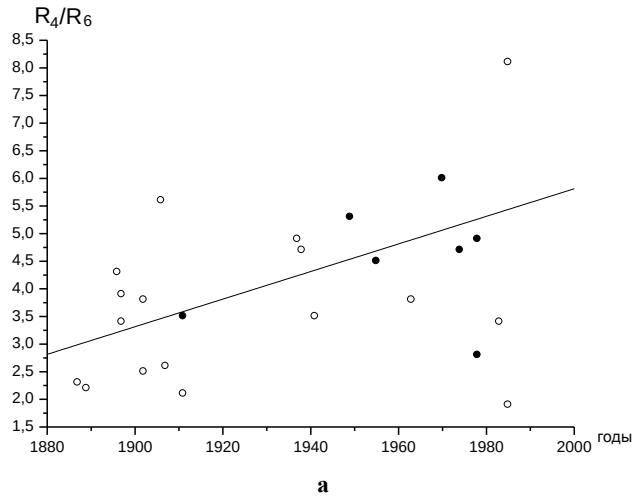
Существенно, что относительно высокие значения R_4/R_6 (от 3.5 до 6.0) соответствуют описанным выше событиям с аномально низкими величинами R^1_6.

Рисунок 5б иллюстрирует аналогичную зависимость для параметра R_4/R_7 . Данная величина растет до 1970 г. примерно в 5 раз быстрее, чем параметр $R_4/R_{6,}$. Уравнение линейной регрессии для этой зависимости выражается формулой:

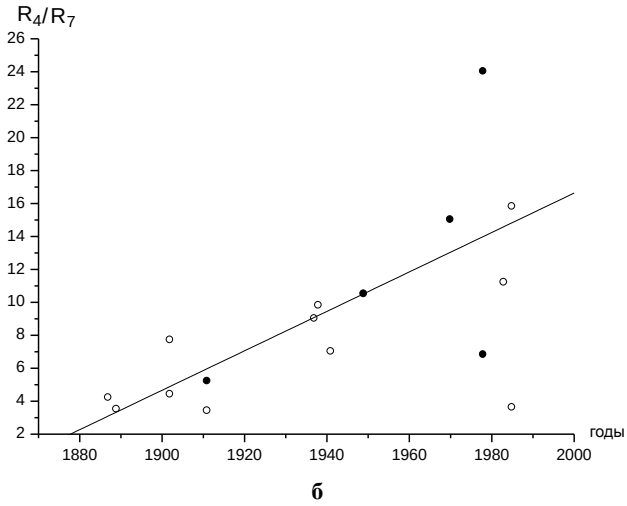
$$R_4/R_7 = -222.803 + 0.120T \text{ (лет)}, \quad r = 0.89. \qquad (6)$$

Относительно повышенные значения параметра R_4/R_7 (от 10.5 до 24) наблюдаются для трех землетрясений

На рисунке 6 показан временной ряд сильных коровых землетрясений Тянь-Шаня и Памира (M≥6.0), начиная с 1885 г.



а



б

Рисунок 5. Зависимость от времени параметров: а - R_4/R_6 ; б – R_4/R_7 обозначения на рисунке 3)

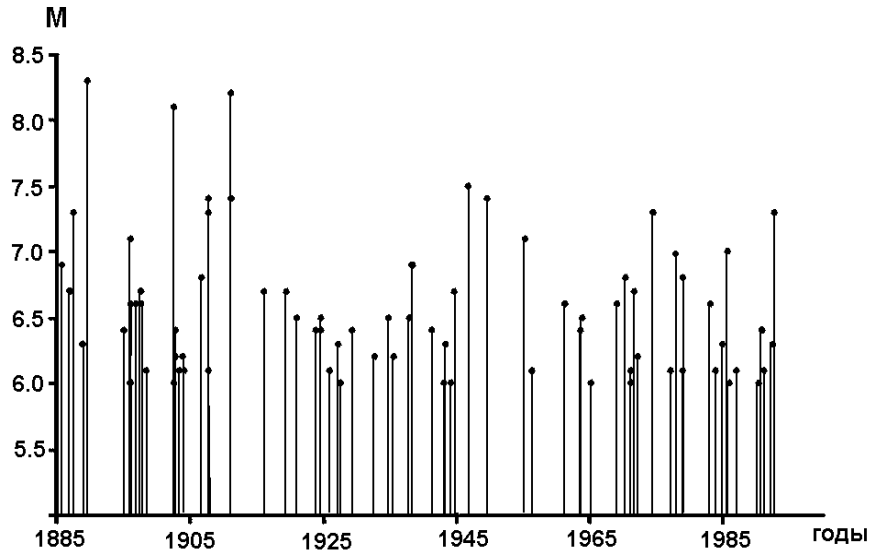


Рисунок 6. Магнитуда (M) сильных землетрясений в районах Тянь-Шаня и Памира за период 1885 - 1992 гг.

Видно, что с 1885 по 1911 гг. в районах Тянь-Шаня и Памира наблюдался аномально высокий уровень сейсмической активности. Примерно до начала 1970-х годов количество землетрясений в целом снижалось. С середины 1970-х годов наблюдалось новое повышение уровня сейсмичности - в течение 14 лет произошло 3 землетрясения с M≥7.0.

ОБСУЖДЕНИЕ

Отметим сначала, что использование данных макросейсмики представляет уникальную возможность изучения вариаций поля поглощения сейсмических волн в земной коре за достаточно большой промежуток времени. Изучение этих эффектов обычными методами невозможно, поскольку записи короткопериодных каналов в рассматриваемом районе до 1960-х годов практически отсутствуют.

Анализ макросейсмических данных показывает, что после серии сильнейших землетрясений конца 1800-х – начала 1900-х годов в течение ~70-80 лет отмечено постепенное уменьшение средних площадей 6- и 7-балльных изосейст, а также средних отношений величин R_6/R_4 и R_7/R_4 для всего района Тянь-Шаня. Кроме того, часто после сильных близких землетрясений в течение определенного времени ($\Delta T \sim 1$ - 25 лет) имеет место резкое уменьшение площадей 6- и 7-балльных изосейст как относительно средней площади для изосейсты, соответствующей данной магнитуде, так и по отношению к площади 4-балльной изосейсты для данного землетрясения. Следует отметить согласие данных, полученных независимыми методами, а также достаточно высокие коэффициенты корреляции в формулах (3), (5) и, особенно, (6), что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Из таблицы 1 следует, что величины R_6 для большей части рассматриваемых землетрясений (примерно 2/3 из них) составляет менее 100 км, и, кроме того (за исключением двух землетрясений с M>8.0 и одного с M=7.0), не превышают 200 км. Это означает, что объемные волны, обеспечивающие на поверхности сотрясения с интенсивностью 6 баллов (что соответствует средним ускорениям сильных движений ~ 0.05 g [5]), распространяются в земной коре, в основном – в верхней ее части, на глубинах менее 10 км. Величины R_7 для 70% землетрясений – менее 60 км; следовательно, объемные волны в 7-балльной зоне, соответствующей ускорениям ~0.12 g [5], распространяются в самых верхах земной коры.

Заметим, что очаги сильнейших землетрясений (M≥7.0) имеют вертикальную протяженность несколько десятков км. В связи с этим волны, излучаемые самыми нижними элементами разрыва, естественно, распространяются и в более глубоких горизонтах земной коры. Однако можно полагать, что максимальная мощность короткопериодного некогерентного излучения, порождаемого «скрипом» на разрыве [15], соответствует самым верхним элементам очага, поэтому качественно данный эффект должен сохраниться и для самых сильных событий. В то же время 4-балльные изосейсты формируются волнами, в большинстве случаев проникающими в верхи мантии. Резкое уменьшение радиуса данной изосейсты (при прочих равных условиях) свидетельствует о существенном увеличении затухания короткопериодных сейсмических волн, в первую очередь, поперечных, которые доминируют на малых эпицентральных расстояниях.

В [7,9] на основании анализа параметра Lg/Pg на трассах от Семипалатинского полигона через Казахскую платформу и различные районы Тянь-Шаня, показано, что поглощение поперечных волн в земной коре существенно изменяется во времени для очаговых зон сильных землетрясений (M≥7.0) и их близких окрестностей. Это может свидетельствовать

о миграции флюидов, поднявшихся из верхней мантии в земную кору после сильных тектонических событий [8,10,12,13], в горизонтальном направлении. Эффекты постепенного снижения величин R^1_6 и R^1_7 и увеличения R_4/R_6 и R_4/R_7 в течение 70-80 лет после серии сильнейших землетрясений на рубеже 20-го века в целом для района Тянь-Шаня, а также резкого изменения этих параметров для большинства землетрясений, произошедших через сравнительно небольшие интервалы времени после близких сильных событий, служат дополнительными аргументами в пользу вывода о расплывании флюидов из очаговых зон. В этой связи заметим, что одно лишь растрескивание пород в результате сильных землетрясений и последующей афтершоковой деятельности не способно обеспечить такие эффекты, поскольку трещины образуются в основном в 9- и 8-балльных зонах. Кроме того, увеличением плотности трещин трудно объяснить уменьшение средних значений параметров R^1_6, R^1_7, R_6/R_4 и R_7/R_4 в 1912-1949 гг., несмотря на наблюдавшийся в этот период дефицит достаточно сильных землетрясений с $M \geq 7.0$. Следует добавить, что процессы дегидратации горных пород [16,18] также не могут объяснить обнаруженные эффекты, поскольку в самих очаговых зонах, где тепловой поток должен возрастать сильнее всего, поглощение поперечных волн после сильных событий постепенно уменьшается [9], что свидетельствует о снижении доли свободных флюидов. И, наконец, тепловые процессы очень инерционны, поэтому заметное увеличение температуры горных пород, необходимое для их дегидратации [18], в результате кондуктивной теплопередачи может происходить только в течение очень больших интервалов времени, несопоставимых с рассматриваемыми в данной работе. В этом случае достаточно высокие величины R^1_6 и R^1_7 и низкие величины R_4/R_6 и R_4/R_7 в конце 19-го – начале 20-го веков естественным образом объясняются относительной «сухостью» коры Тянь-Шаня, где до этого времени в течение нескольких сотен лет не было тектонических событий с магнитудой $M \geq 8.0$ (согласно данным, приведенным в монографии [3], с начала 13 века до конца 1880-х годов, наиболее сильным здесь, повидимому, было Аксуйское землетрясение 1716 г. с $M \sim 7.5$). Интересно, что длительность интервала уменьшения величин R^1_6 и R^1_7 и увеличения R_4/R_6 и R_4/R_7 для всего района Тянь-Шаня не противоречит оценкам времени расплывания флюидов из очаговых зон землетрясений с $M \geq 8.0$ по изменению параметра Lg/Pg, сделанным в [8]. Очень быстрый рост параметра R_4/R_7 по сравнению с R_4/R_6 (с высоким коэффициентом корреляции) до середины 1970-х годов можно объяснить гораздо более интенсивным насыщением флюидами самой верхней части земной коры, характеризующейся наиболее высокой проницаемостью пород [16,17].

Относительно причин существенного увеличения параметров R^1_6 и R^1_7 с конца 1970-х годов можно высказать следующую гипотезу. В [19] показано, что в 1997 - 2005 гг. наблюдался резкий всплеск сейсмической активности в районе Центральной Азии: здесь произошли четыре землетрясения с Ms=7.5-8.0 (два – в районе Северного Тибета, а также в районах Алтая и Кашмира). Важно, что все эти события имели сдвиговый тип механизма. Столь высокий уровень сейсмичности в круговой области радиусом 1500 км с центром в точке 43° N, 76° E (район Северного Тянь-Шаня) наблюдался впервые за 100 - 110 лет [18]. Учитывая это, можно предположить, что уменьшение поглощения в верхней части земной коры Тянь-Шаня и Памира с конца 1970-х годов обусловлено перераспределением флюидов, связанным с подготовкой серии крупнейших землетрясений в Центральной Азии. Возможно, что флюиды могут мигрировать по крупным разломным зонам на значительные расстояния к областям относительного растяжения, где формируются очаги сильных сейсмических событий сдвигового типа [20]. Не исключено, что с этим же эффектом связано и резкое падение уровня сейсмической активности Тянь-Шаня в конце 20-го – начале 21 века, где с 1993 по 2006 гг. не зарегистрировано землетрясений с $M \geq 7.0$, в то время как, например, в 1887-1911 гг. произошло сразу 7 таких событий [3,19]. Как следует из рисунка 6, аналогичный эффект наблюдался в районах Тянь-Шаня и Памира в 1912-1931 гг. перед сильнейшим Монголо-Алтайским землетрясением (Ms=7.9), механизм которого также представлял почти чистый сдвиг (событие имело наибольший сейсмический момент в рассматриваемой круговой области Центральной Азии за последние 110 лет).

Рассмотрим теперь возможные причины уменьшения величин R^1_6 после сильных гиндукушских землетрясений. Очевидно, что этот эффект вряд ли может быть объяснен миграцией флюидов из мантийной зоны глубокофокусной сейсмичности на большие расстояния. Здесь должен существовать качественно иной механизм. Ранее [11] были получены данные, свидетельствующие о том, что нередко в течение 4,5 месяцев после сильнейших гиндукушских землетрясений с $M \geq 6.7$ в обширном регионе Центральной и Южной Азии, ограниченном координатами 30^o-50^o N и 50^o-90^o E, происходят коровые землетрясения с $M \geq 7.0$ (вероятность случайного появления таких пар ничтожно мала). Кроме того, приведены многочисленные данные, свидетельствующие о переходе флюидного поля в крупных разломных зонах на больших эпицентральных расстояниях до и после сильнейших гиндукушских событий в «возбужденное» состояние, что выражалось в вариациях поля поглощения поперечных волн, скорости деформации, дебита водных источников, гидрогеохимических параметров и др. Явления интерпретировались как следствие распростра-

нения медленно затухающих уединенных волн деформации [21], передающихся по разломным зонам от Гиндукуша и стимулирующих подъем флюидов, находящихся под литостатическим или даже сверхлитостатическим давлением, из нижней в верхнюю кору по крупным разломным зонам. Поднявшиеся в верхнюю кору флюиды часто не имеют гидродинамической связи с приповерхностными подземными водами. В этом случае они, как правило, находятся под сверхгидростатическим давлением [16], поэтому могут сравнительно быстро расплываться в горизонтальном направлении, что, в конечном счете, и обусловливает резкое уменьшение размеров площади высших изосейст при сильных коровых землетрясениях.

Наблюдающаяся в некоторых случаях резкая анизотропия макросейсмического поля, не связанная с обычной вытянутостью изосейст вдоль горных хребтов (рисунок 2б), также может быть объяснена высокой концентрацией флюидов в определенных локальных областях. В случае с очагом Сусамырского землетрясения более сильное затухание изосейст в северном и северо-восточном направлениях согласуется с очень низкими скоростями S-волн в верхнем 15-километровом слое земной коры в районе Киргизского хребта, что связывается с высоким содержанием свободной воды [22].

Отметим еще, что о миграции ювенильных флюидов в земной коре свидетельствуют имеющиеся геохимические данные. Как известно, повышенное содержание изотопа ^{3}He служит доказательством присутствия в подземных водах мантийных флюидов [23]. В [10] показано, что в близких окрестностях очаговых зон целого ряда сильных землетрясений в различных районах земного шара наблюдаются существенно повышенные величины изотопного отношения ^{3}He/^{4}He. Этот эффект интерпретировался как свидетельство диффузии ювенильных вод от очагов сильных тектонических событий.

На основе полученных данных (таблицы 1, 2) проведена оценка в первом приближении минимальной скорости миграции флюидов в верхней части земной коры (V_f). Для этого использована формула:

$$V_f = \Delta R / \Delta T, \qquad (3)$$

где $\Delta R = \Delta r + R_6$ - радиус области, в которую внедрились дополнительные объемы флюидов.

Для трех землетрясений: Кеминского, Хаитского и Дараут-Курганского (таблица 2) получена величина V_f , варьирующаяся в диапазоне 13-43 км/год. Ранее для районов Центрального Хонсю и Центральных Апеннин нами была получена оценка скорости миграции флюидов в верхней части земной коры по данным о пространственно-временных вариациях параметра ^{3}He/^{4}He после землетрясений с $M \leq 6.8$ [10]: $V_f \sim 40 - 100$ км/год. Можно полагать, что эти оценки не противоречат друг другу.

В заключение отметим, что через достаточно большой интервал времени (судя по полученным данным, это ~ 25-30 лет), видимо, происходит заметное уменьшение содержания свободных флюидов и, возможно, частичное залечивание трещин в самих очаговых зонах и их близких окрестностях (скорее всего, в результате процессов гидратации горных пород, которые, как правило, сопровождаются увеличением их объема [18]). Это приводит к резкому уменьшению затухания амплитуд сильных движений.

Литература

1. Федотов, С.А. Макросейсмическое описание Итурупского землетрясения 7 ноября 1958 г./ С.А. Федотов // Труды ИФЗ АН СССР. - 1961. - № 17 (184).
2. Медведев, С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности / С.В. Медведев // Сейсмическое районирование СССР. - М.: Наука. - 1968.
3. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР./ Отв. ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин - М.: Наука. - 1977. - 535 с.
4. Ананьин, И.В. Сейсмичность Северного Кавказа. / И.В. Ананьин - М.: Наука. - 1977.
5. Aptikaev, F.F. Project of the standart for earthquake intensity estimation / F.F. Aptikaev, T.Zh. Zhunusov, N.N. Mikhailova [et al.]// Aseismic construction. – Moscow: VNIINTPI. - 1996. - Issue 5. - P. 12 - 19.
6. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации структуры поля поглощения поперечных волн в районе Семипалатинского полигона / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли. - 2001. - № 11. - С. 73 - 86.
7. Копничев, Ю.Ф. Изучение вариаций поля поглощения поперечных волн в районе Центральной Азии по записям ядерных и химических взрывов на Семипалатинском испытательном полигоне / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизика и проблемы нераспространения / Вестник НЯЦ РК. - 2003. - Вып.2. - С. 8 3- 88.
8. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации поля поглощения S-волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Физика Земли. - 2003б. - № 7. - С. 35 - 47.
9. Копничев, Ю.Ф. Анализ пространственно-временных вариаций поля поглощения поперечных волн в очаговых зонах сильных землетрясений Тянь-Шаня по записям подземных ядерных взрывов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. - 2004. - Т.395. - № 6.- С. 818 - 821.
10. Копничев, Ю.Ф. Подъем мантийных флюидов в районах очагов сильных землетрясений и крупных разломных зон: геохимические свидетельства / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – Вып. 2(22). – С. 147-155.
11. Копничев, Ю.Ф. Пары сильных землетрясений и геодинамические процессы в районе Центральной и Южной Азии / Ю.Ф. Копничев, И. Баскутас, И.Н. Соколова. // Вулканология и сейсмология. - 2002. - № 5.- С. 49 - 58.

12. Husen, S. Postseismic fluid flow after the large subduction earthquake of Antofagasta, Chile / S. Husen, E. Kissling // Geology. 2001. v. 29. N 9. P.847-850.
13. Koerner, A. A model of deep crustal fluid flow following the Mw=8.0 Antofagasta, Chile, earthquake / Koerner A., Kissling E., S. Miller // J. Geophys. Res. - 2004. - V. 109. - N B6. DOI 10.1029/2003JB002816.
14. Копничев, Ю.Ф. Пространственно-временные вариации макросейсмических эффектов сильных землетрясений в районах Тянь-Шаня и Памира / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. - 2004. - Вып.3. – С. 104 - 110.
15. Копничев, Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. / Ю.Ф. Копничев - М : Наука. - 1985. - С. 176.
16. Киссин, И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность / И.Г. Киссин // Физика Земли. - 1996. - № 4.- С. 30 - 40.
17. Ingebritsen, S. Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust / S. Ingebritsen, C. Manning // Geology. - 1999. - V.27. No 12. P.1107-1110.
18. Калинин, В.А. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. / В.А. Калинин, М.В. Родкин, И.С. Томашевская - М.: Наука. - 1989.- С. 157.
19. Копничев, Ю.Ф. Новые данные о геодинамических процессах в аномальной зоне Северного Тянь-Шаня: возможная подготовка сильного землетрясения / Ю.Ф. Копничев, Н.Н. Михайлова, И.Н Соколова., И.Л. Аристова // Вестник НЯЦ РК. - 2006. - Вып. 2 (26). - С 60 - 70.
20. Аптикаева, О.И. Неоднородности литосферы и астеносферы в очаговой зоне Рачинского землетрясения 1991 г. / О.И. Аптикаева, С.С. Арефьев, С.И. Кветинский, Ю.Ф. Копничев, В.Н. Мишаткин //Докл. РАН. - 1995. - Т.344. - № 4. - С. 533 - 538.
21. Николаевский, В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн / В.Н. Николаевский // Докл. РАН. - 1995. - Т.341. - № 3. - С. 403 - 405.
22. Винник, Л.П. Литосфера Тянь-Шаня по данным о функциях приемника для P и S волн / Л.П. Винник, Г.Л. Косарев, С.И. Орешин и др // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. - Москва-Бишкек. - 2003. - С. 94 - 105.
23. Поляк, Б.Г. Тепломассопоток из мантии в главных структурах земной коры / Б.Г.Поляк. - М.: Наука. - 1988. - 191 с.

ТЯНЬ-ШАНЬ ЖӘНЕ ПАМИР АУДАНДАРЫНДА ЖЕР ҚЫРТЫСЫНДАҒЫ ҚАТТЫ ЖЕРСІЛКІНУЛЕРДІҢ МАКРОСЕЙСМИКАЛЫҚ ӘСЕРЛЕРІНІҢ КЕҢІСТІК-УАҚЫТТЫҚ ВАРИАЦИЯЛАРЫ: ЮВЕНИЛЬДІ ФЛЮИДТЕР ЖЫЛСТАУЫНЫҢ АЙҒАҚТАРЫ

[1,2)]Копничев Ю.Ф., [2)]Соколова И.Н.

[1)]РҒА О.Ю.Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресесй
[2)]ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

1885-1992 ж.ж. Тянь-Шань және Памир аудандарында өткен 32 қатты (M≥6.0) жерсілкінулердің макросейсмикалық әсерлерінің кеңістік-уақыттық вариациялары талдауда. 6-7 баллды изосейсталардың орта радиустері магнитудасы M=7.0 келтірілген (R^1_6 және R^1_7), сондай-ақ 4-баллды изосейстаның орта радиусы 6- және 7-баллды изосейсталардың орта радиусына қатынастарындай (R_4/R_6 және R_4/R_7). параметрлері қаралған. 1800 жылдар аяғынан 1970-1975 ж.ж. дейін R^1_6 және R^1_7, сондай-ақ R_4/R_6 және R_4/R_7 параметрлердің біртіндеп төмендеуі, ал 1975 ж. кейін шұғыл үлкейгені анықталған. Одан басқа, жер қыртысындағы жақын қатты жерсілкінулерден және тереңкөзді гиндукуштік оқиғалардан кейін R^1_6 және R^1_7 шамалары шұғыл төмендейтіні, ал R_4/R_6 және R_4/R_7 шамалары орта есебімен үлкеетіні анықталған. Табылған әсерлердің түсіндіруі жер қыртысындағы қатты жерсілкінулердің ошақ белдемдерінде жоғарғы жер қыртысына, сондай-ақ қатты терең көзді оқиғалардан кейін ірі жарылымды белдемдерінде ювенильді флюидтер көтерілуімен және олардың, қатты қозғалыстардың амплитудалары өшуі үлкеюіне келтіретін, горизонталь бағытында жылыстауымен байланыстырылады. Қолдағы геофизикалық және геохимиялық деректері осындай пайымдауына қайшы келмейді.

SPATIO-TEMPORAL VARIATIONS OF INTENSITY EFFECTS FROM LARGE SHALLOW EARTHQUAKES IN THE REGIONS OF TIEN SHAN AND PAMIR: EVIDENCE OF JUVENILE FLUIDS MIGRATION

[1,2)]Yu.F. Kopnichev, [2)]I.N. Sokolova

[1)]Institute of Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2)]Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper contains analysis for spatio-temporal variations of intensity effects for 32 large earthquakes (M≥6.0) in the regions of Tien Shan and Pamir, occurred in 1885-1992. The following parameters: mean radii of 6 and 7 intensity zones, normalized to magnitude M=7.0 (R^1_6 and R^1_7), and also ratio of mean radius of 4 intensity zone to the radius for

6 and 7 intensity zones (R_4/R_6 и R_4/R_7) are considered. A gradual decrease of values R^1_6 and R^1_7 , and also R_6/R_4 и R_7/R_4 since the end of 1800-s till 1970-1975 and later sharp increase are observed. Moreover, frequently, after the large shallow earthquakes and deep focus hindukush events, the R^1_6 and R^1_7 values decrease essentially, and the R_4/R_6 and R_4/R_7 values increase on average. An interpretation of these effects is suggested, which connected with an ascent of juvenile fluids in source zones of large earthquakes, and also in large deep fault zones after strong deep-focus events and further fluid migration in horizontal direction, which lead to an increase of strong motion amplitude attenuation. The earlier obtained geophysical and geochemical data do not contradict such interpretation.

УДК 550.34:621.039.9

ВЫДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМЫХ ТРЕЩИННЫХ ЗОН НА УЧАСТКЕ БАЛАПАН ПО ДИСПЕРСИИ НАБЛЮДЕННОГО СИГНАЛА В МЕТОДЕ СРЕДИННОГО ГРАДИЕНТА ВЫЗВАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Кабайлов А.Н.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Показана возможность повышения достоверности картирования проницаемых структур методом срединного градиента вызванной поляризации на основе изучения дисперсии наблюденного сигнала. Предложена методика для оценки мощности низкоомных отложений чехла без привлечения многоразносных установок или многочастотных измерений.

ВВЕДЕНИЕ

При оценке реальной степени риска распространения радионуклидов из полостей подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и наиболее вероятных направлений их движения, одной из актуальных задач является выявление и картирование обводненных трещинных зон в скальном фундаменте. Такие зоны, сопряженные с полостями ПЯВ, могут представлять потенциальные пути миграции радионуклидов в подземные трещинно-поровые и грунтовые воды. Традиционные способы картирования обводненных трещинных зон базируются на результатах геологических и геофизических съемок. Среди последних наиболее перспективной является электроразведка, которая диагностирует ослабленные водонасыщенные структуры по повышенной электропроводности. Однако, аномальные значения электропроводности при проведении работ методами электроразведки - зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), мелкомасштабного заряда (ММЗ), срединного градиента вызванной поляризации (СГВП) [4], - могут быть получены от осложняющих «породных» факторов, обладающих повышенной электропроводностью, таких, например, как углефицированные литологические разности, электропроводящий терригенный комплекс. Для повышения информативности и достоверности электроразведки при площадном картировании трещинных структур на участке Балапан выполнена амплитудно-фазовая съемка методом срединного градиента (ВПСГ) с определением не только кажущегося сопротивления (ρк), но и фазового параметра поляризации (φвп) [2, 3]. Результаты этой съемки с использованием оригинальной методики обработки данных приводятся в настоящей работе.

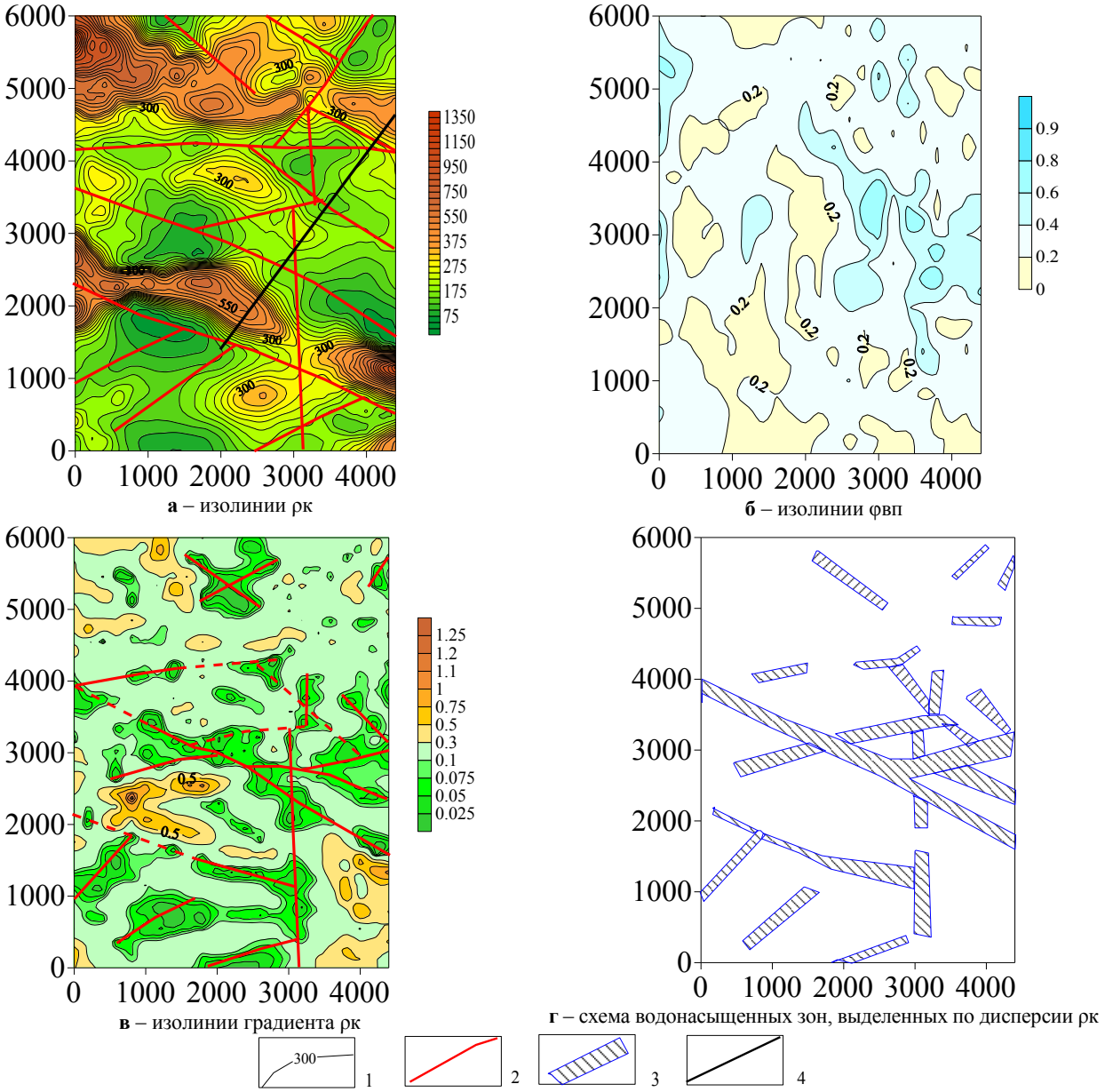
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Площадное картирование проницаемых трещинных зон

Работы методом электрических сопротивлений по схеме срединного градиента проведены в 2005 г. на двух площадках участка Балапан. Размер площадок 6×4,4 км, сеть наблюдений 200х100 м, расположение профилей – меридиональное. Длина питающей линии (АВ) составляла 3000 м, приемной (MN) – 100 м. При одной расстановке линии АВ съемки проводились на планшете размером 2000х2200 м. Использовались генератор ГЭР 2 и измерители ВПФ-210Мн (2 прибора) и ВПФ 209 (1 прибор) [4]. Измерения проведены на частоте 0,3 Гц.

По данным профилирования ВПСГ были рассчитаны значения кажущегося сопротивления и построены карты изолиний ρк и φвп (рисунок 1а, б). Кроме того, был рассчитан параметр дисперсии, характеризующий степень изрезанности наблюденного поля ρк. Расчет этого параметра был выполнен исходя из следующих соображений. Рыхлые отложения, как правило, отличаются от коренных пород пониженными значениями удельного электрического сопротивления и оказывают «сглаживающее» действие на наблюденный сигнал, являясь своеобразным фильтром высоких частот. Кора выветривания, так же как и рыхлые отложения, могут отличаться от неизмененных пород пониженным значением ρэф и играть аналогичную роль. Чем больше мощность электропроводящих пород (глубже высокоомный объект в коренных неизмененных породах), тем больше сглажены графики ρк, полученные по результатам измерений на дневной поверхности. С учетом этого, по значениям ρк, наблюдаемым вдоль профилей съемки, рассчитаны средние значения градиента ρк (абсолютная величина) в интервале 200 м (скользящим окном по 3 точкам). В том же интервале рассчитано нормированное среднее значение кажущегося электрического сопротивления, которое в первом приближении отражает мощность низкоомных отложении. По результатам расчетов построена карта изолиний нормированного градиента ρк (рисунок 1в).

На карту изолиний ρк вынесены тектонические нарушения, предполагаемые по результатам съемки (рисунок 1а). Критерии выделения этих структурных элементов общеизвестны [1, 4]: линейные зоны высоких значений градиентов ρк, зоны пониженных значений, резкое изменение простирания изолиний ρк.



а – изолинии ρк

б – изолинии φвп

в – изолинии градиента ρк

г – схема водонасыщенных зон, выделенных по дисперсии ρк

1 - изолинии электрического сопротивления; 2 -тектонические нарушения по данным СГВП;
3 - проницаемые водонасыщенные зоны, выделенные по дисперсии ρк. 4. Профиль ЗСБ

Рисунок 1. Участок Балапан. Выделение ослабленных водонасыщенных зон по данным электроразведки методом СГВП

Как можно видеть из рисунка 1, в пределах площадки выявляется серия разнонаправленных тектонических нарушений, в узлах пересечения которых следует ожидать повышения мощности линейных кор выветривания, как правило, характеризующихся повышенной водопроницаемостью. По карте градиентов ρк (рисунок 1в), отражающих дисперсию наблюденного сигнала, протрассированы линейно вытянутые области пониженных значений, отвечающие линейным зонам кор выветривания вдоль тектонических нарушений (рисунок 1г). Сопоставляя пространственное положение тектонических зон, выделенных на карте изоом ρк и линеаментов, выявленных на карте градиента ρк, можно видеть, что большая часть из них совпадает, хотя имеются и различия. Так, в северной и южной частях площадки наблюдается изометричная зона пониженного градиента ρк на фоне высоких значений (ПР 2000 ПК 5500 и ПР 2000 – 2700 ПК 700 – 750). В остальном линеаменты, выявленные по значениям градиента ρк, соответствуют положению тектонических зон, выделенных на карте изолиний ρк традиционными методами.

Весьма интересной представляется субмеридиональная линейная зона пониженных значений градиента ρк (ПР 3200), имеющая разрывы по латерали в районе ПК 500 – 1500 и ПК 2000 – 2500. По параметру φвп в пределах этой зоны наблюдается относи-

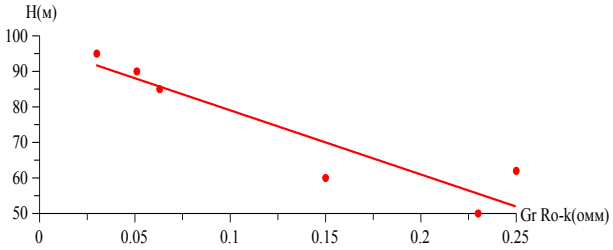
тельное понижение поляризуемости, что может быть связано с повышением солености подземных вод.

В целом полученные данные показали, что привлечение параметра дисперсии ρк позволяет более обоснованно, по сравнению с традиционными приемами интерпретации поля ρк, выделить проницаемые трещинные структуры за счет исключения субъективного фактора при истолковании результатов съемки. Для широкого применения этого способа интерпретации данных площадных съемок ρк необходимо его усовершенствование.

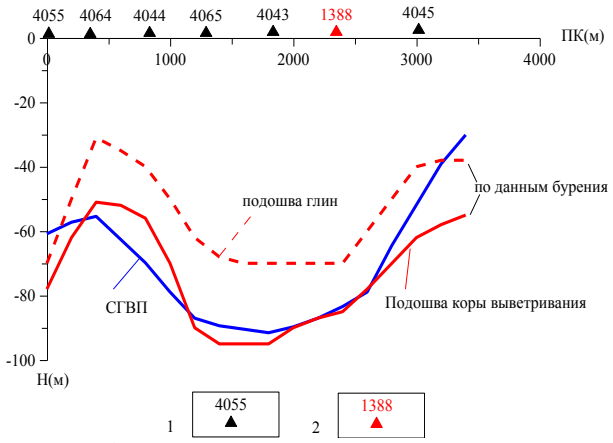
Оценка возможности определения мощности низкоомных покровных отложений по данным СГВП

Как указывалось выше, для выявления зон повышенной водонасыщенности использован параметр, оценивающий изрезанность поля ρк как отражение степени фильтрации наблюденного сигнала ρк породами чехла (включая коры выветривания). Для количественной оценки мощности низкоомных отложений по экспериментальным данным электроразведки СГВП, построена корреляционная зависимость между глубиной залегания кровли скального фундамента и значениями нормированного градиента ρк (рисунок 2а). По полученной зависимости рассчитана мощность низкоомных отложений в пределах фрагмента профиля, отработанного электроразведкой методом ЗСБ. Результаты этих расчетов, в сопоставлении с данными бурения приведены на рисунке 2б.

Как видно из рисунка 2б, наименьшее расхождение (менее 10%) между данными бурения и электроразведки отмечается между пикетами 1000 – 2500, тогда как по краям профиля расхождение в определении глубины залегания скального фундамента (мощности низкоомных пород) доходят до 25-50 %. Такое расхождение вызвано, наиболее вероятно, неадекватностью реальных условий рассчитанному уравнению регрессии для малых глубин залегания скального фундамента. При уточнении этой зависимости возможно получение более достоверных данных, что позволит сократить затраты на привлечение дорогостоящих многочастотных наблюдений с многоразносными установками.



а – корреляционная зависимость градиента ρк и мощности пород чехла



1 - гидрогеологическая скважина, ее номер;
2 - боевая скважина, ее номер

б – глубина залегания неизмененных пород фундамента по геологическим и электроразведочным данным

Рисунок 2. Оценка возможности определения мощности низкоомных покровных отложений по данным электроразведки СГВП

Выводы

Приведенные результаты исследований свидетельствуют о достаточно высокой информативности метода СГВП при картировании тектонически ослабленных зон повышенной водонасыщенности.

Анализ дисперсии наблюденного сигнала ρк позволяет в определенной степени повысить достоверность их выявления и, кроме того, оценить мощность низкоомных отложений чехла.

Представляется целесообразным дальнейшие работы по усовершенствованию предлагаемой методики и разработка комплексного геофизического параметра, позволяющего ранжировать объект изучения.

Планируемые дальнейшие работы позволяют надеяться на успешное решение задач, поставленных перед электроразведкой.

Литература

1. Вешев, А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе / А.В. Вешев. – Л.: Недра, 1980. – 391 с.
2. Куликов, А.В. Фазовые измерения в методе вызванной поляризации на переменном токе (методическое пособие) / А.В.Куликов, В.Д. Жильников, В.Ф. Сарбаш. - Алма-Ата: КазВИР, 1975. – 125 с.
3. Мельников, В.П. Основы амплитудно-фазовых измерений вызванной поляризации / В.П. Мельников, Б.И. Геннадиник, Л.З. Бобровников. – Якутск: Якутское книжное издательство, 1974. – 222 с.
4. Электроразведка: Справочник геофизика. Отв. ред. А.Г. Тархов - М.: Недра, 1989. – 518 с.

ШАҚЫРЫЛҒАН ҮЙЕКТЕЛУІНІҢ ОРТА ГРАДТЕНТІ ӘДІСІНДЕ БАЙҚАЛҒАН СИГНАЛДЫҢ ДИСПЕРСИЯСЫ БОЙЫНША БАЛАПАН БӨЛІКШЕСІНДЕ ӨТКІЗГІШТІ ЖАРЫҚШАҚТЫ БЕЛДЕМДЕРІН АНЫҚТАУ

Кабайлов А. Н.

ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

Байқалған сигналдың дисперсиясын зерделеу негізінде өткізгішті құрылымдарын шақырылған үйектелінуінің орта градиенті әдісімен карталауының шүбәсіздігін жоғарылату мүмкіншілігі көрсетілген. Көп ұзындық қондырғыларын немесе көп жиіліктік өлшеулерін тартпай тыстың төмен омды түзілімдердің қалындығын бағалау үшін әдәсі табыс етілген.

ALLOCATION OF PERMEABLE FRACTURED ZONES ON BALAPAN SITE BY OBSERVED SIGNAL DURING THE MEAN GRADIENT METHOD GENERATED BY THE POLARIZATION

A.N. Kabaylov

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper contains the possibility to improve the reliability of mapping for permeable structures by the mean gradient method generated by the polarization on the basis of observed signal dispersion study. The method for the assessment of sedimentary cover of low-resistivity without electrode spacing and multifrequency measurements is offered.

УДК 550.34:621.039.9

ИЗУЧЕНИЕ ГОРИЗОНТОВ ТРЕЩИННО-ПОРОВЫХ ВОД НА УЧАСТКЕ БАЛАПАН ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Жолдыбаев А.К.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

По данным вертикального сейсмического профилирования и наземных сейсмических наблюдений обоснована технология, обеспечивающая выявление и изучение горизонтов трещинно-поровых вод на участке Балапан на основе соотношения скоростей продольных и поперечных волн.

Трещинно-поровые воды на участке Балапан развиты в зонах экзогенной трещиноватости кровли пород фундамента, платформенных отложений, а также в мезозойских корах выветривания под неогеновыми глинами. Водоносный горизонт имеет мощность порядка 20 м и, как правило, гидравлически связан с поверхностными и глубинными трещинными водами. Наличие такой связи в сочетании с водопроницаемыми структурами, сопряженными с полостями подземных ядерных взрывов (ПЯВ), создают в пределах участка условия для развития активных гидродинамических процессов и миграции техногенных радионуклидов в составе подземных вод с выходом на окружающие территории. Поэтому для оценки реальной степени риска распространения радионуклидов, определения наиболее вероятных направлений и скорости их движения одной из актуальных задач является изучение трещинно-поровых вод с оценкой их мощности и фильтрационных свойств. Традиционно эти задачи решаются по данным бурения, опытных откачек и геофизических исследований в гидрогеологических скважинах. Однако при обследовании больших площадей, таких, как участок Балапан, потребуются значительные объемы дорогостоящего бурения, надежная корреляция электрических свойств и водопроницаемости пород в разрезах, что может быть обеспечено совместным использованием большим объемов откачек и каротажа. Для оптимизации решения данной задачи и не исключая традиционных приемов, применительно к участку Балапан применены сейсмические методы, эффективно используемые при решении многих задач, в том числе связанных с изучением фильтрационных свойств геологической среды [1, 2].

Водопроницаемость геологических пород, как известно [3], может быть представлена в виде зависимости упруго-деформационных свойств – скорости продольных и поперечных волн в среде, - от пористости. Согласно уравнению среднего времени [4], скорость продольных волн зависит от восприимчивости к деформациям сжатия как среды (скелета породы), так и количества материала (в данном случае воды), заполняющего поры. Поэтому в проницаемых образованиях, где структурные связи скелета минимальны, водонасыщенность влияет на скорость продольных волн сильнее, чем в глинах и скальных породах. Для значений скорости поперечных волн определяющим параметром является восприимчивость к деформациям сдвига, то есть, жесткость скелета горной породы и практическая независимость от степени водонасыщенности. Очевидно, что для водопроницаемых отложений, в которых водонасыщение влечет большее увеличение скорости продольных волн, чем в водоупорных породах, соотношение Vp/Vs будет максимальным. Указанные зависимости скорости упругих волн от пористости и особенностей структурных связей, определяющих упругие свойства горных пород, положены в основу технологии определения водопроницаемости горных пород. При этом соотношение скоростей продольных (Vp) и поперечных (Vs) волн использовано в качестве основного однозначного критерия. С учетом этого, проблема объемного картирования горизонтов трещинно-поровых вод на изучаемой территории сводится к возможно более точному определению скоростных характеристик разреза с заданной детальностью.

Принципиальная возможность и технологии выявления водопроницаемых структур на участке Балапан оценивались по результатам применения скважинных (вертикальное сейсмическое профилирование) и наземных сейсмических зондирований методом преломленных волн [1-3, 6].

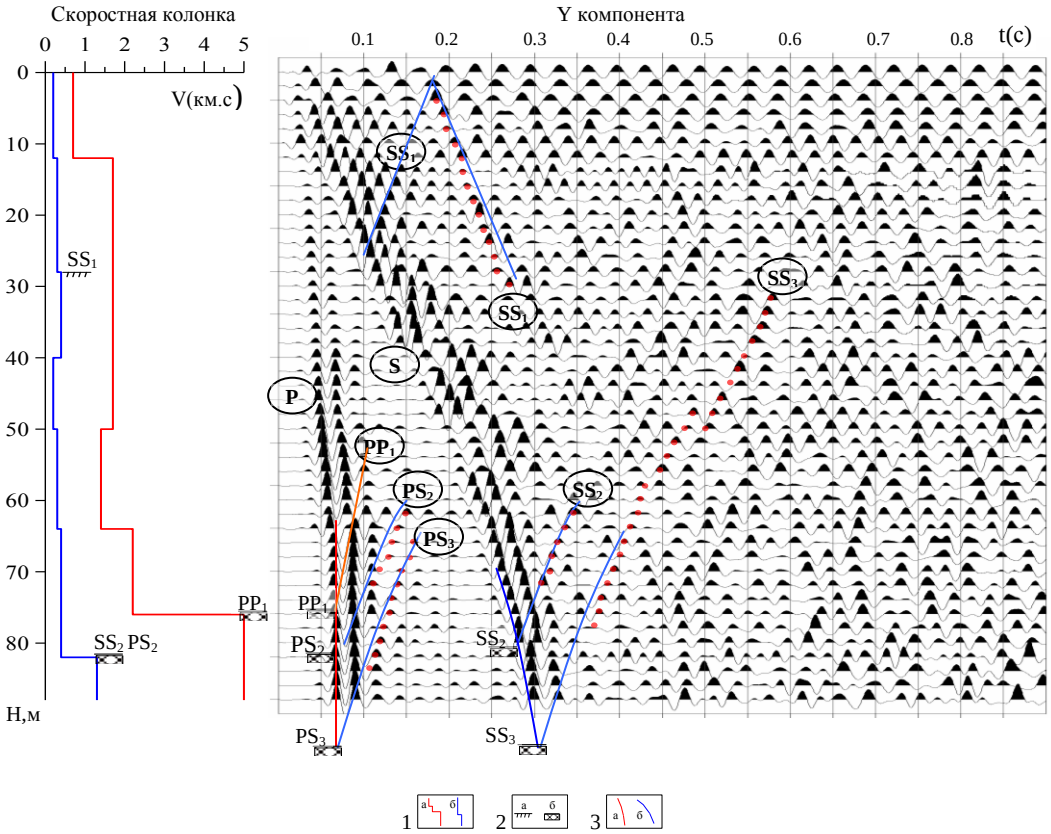
ВЕРТИКАЛЬНОЕ СЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ (ВСП)

ВСП применено для определения скоростей продольных и поперечных волн пород разреза, а также для выявления и установления природы сейсмических границ как в терригенном комплексе, так и в скальном фундаменте. При этом особенно важным было получение значений скорости поперечных волн как наименее изученной на участке Балапан.

При проведении полевых измерений возбуждение упругих колебаний осуществлялось на дневной поверхности вблизи устья скважины с помощью ударов кувалдой массой порядка 8 кг. Прием – трехкомпонентной симметричной скважинной установкой сейсмоприемников типа DF-8. Шаг наблюдений по скважине 2 м. Регистрация - цифровая, с накоплением сигнала от 4-5 ударов. Обработка данных включала расчет вертикальной и горизонтальных составляющих волнового поля с использованием специализированного программного комплекса для ВСП, расшифровку наблюденных волновых полей и определение интервальных скоростей по скважине. На рисунке 1 приведен пример результатов измерений скважине 4043.

Как видно из рисунка 1, зарегистрированные первые вступления прямой продольной волны (P) имеют ось синфазности, которая характеризуется наиболее четкими изломами на трех глубинах - порядка 50, 64 и 76 м. Скачкообразно изменяются значения интервальной скорости продольной волны с 1.7 до 1.4 км/с на верхней границе, с 1.4 до 2.4 км/с на средней границе и с 2.4 до 5.0 км/с на нижней границе. Наиболее жесткой сейсмической границей, способной возбуждать вторичные отраженные (PP1) продольные (на горизонтальной компоненте прослеживаемые лишь фрагментарно), а также головные (преломленные) волны, является граница на глубине 76 м, соответствующая положению кровли скального фундамента.

Для поперечной падающей волны (S) максимальный излом оси синфазности отмечен на глубине 82 м, ниже которой интервальная скорость возрастает с 0.4 до 1.3 км/с, а выше, вплоть до отметки 20 м, прослеживается восходящая ось синфазности, соответствующая отраженной волне. Характерной особенностью этой границы является то, что она расположена на 6 м, ниже чем кровля скального фундамента, определенная по данным бурения и по распределению скорости продольных волн. Это свидетельствует о том, что повышение скорости продольных волн по кровле фундамента, главным образом, обусловлено водонасыщенностью слагающих его трещиноватых пород, составляющих кору выветривания. С глубины 82 м, на которой возрастает скорость поперечных волн, залегают менее выветрелые породы, но, судя по значению интервальной скорости (1.3 км/с), все еще водопроницаемые образования, кровля которых является отражающей границей (SS2). Выявленная восходящая ось синфазности SS3 обусловлена отражением волн от сейсмической границы на глубине порядка 100 м позволяет предположить, что на этой глубине залегают наименее измененные выветриванием породы скального фундамента, характеризующиеся, согласно [5], скоростью поперечных волн порядка 2.5-2.7 км/с. Важной особенностью поля поперечных волн является наличие в нем кратно-отраженных волн, самая первая из которых (SS1S), прослеживаемая практически до глубины 88 м, сформировалась при отражении от границы земля-воздух волны SS1, являющейся первично отраженной от границы в толще терригенного комплекса.



1- интервальная скорость волн по скважине: а- продольных, б – поперечных; 2 – сейсмические границы продольных и поперечных волн: а – в терригенных породах, б – в скальном фундаменте; 3 – фрагменты годографов волн: а- продольных падающей и отраженной, б- поперечных падающих и отраженных. Обозначения волн: S – падающие продольная и поперечная; PP_1 – продольная отраженная от кровли фундамента; SS_1 – поперечная отраженная от границы терригенного комплекса; SS_2 и PS_2 – поперечные монотипная и обменная, отраженные от подошвы выветрелой части скального фундамента; SS_1S – вторичная падающая поперечная волна; SS_3 и PS_3 – поперечные- монотипная и обменная, отраженные предположительно от подошвы коры выветривания скального фундамента

Рисунок 1. Скоростная характеристика и горизонтальная (Y)составляющая волнового поля по данным вертикального сейсмического профилирования в скважине 4043 участка Балапан

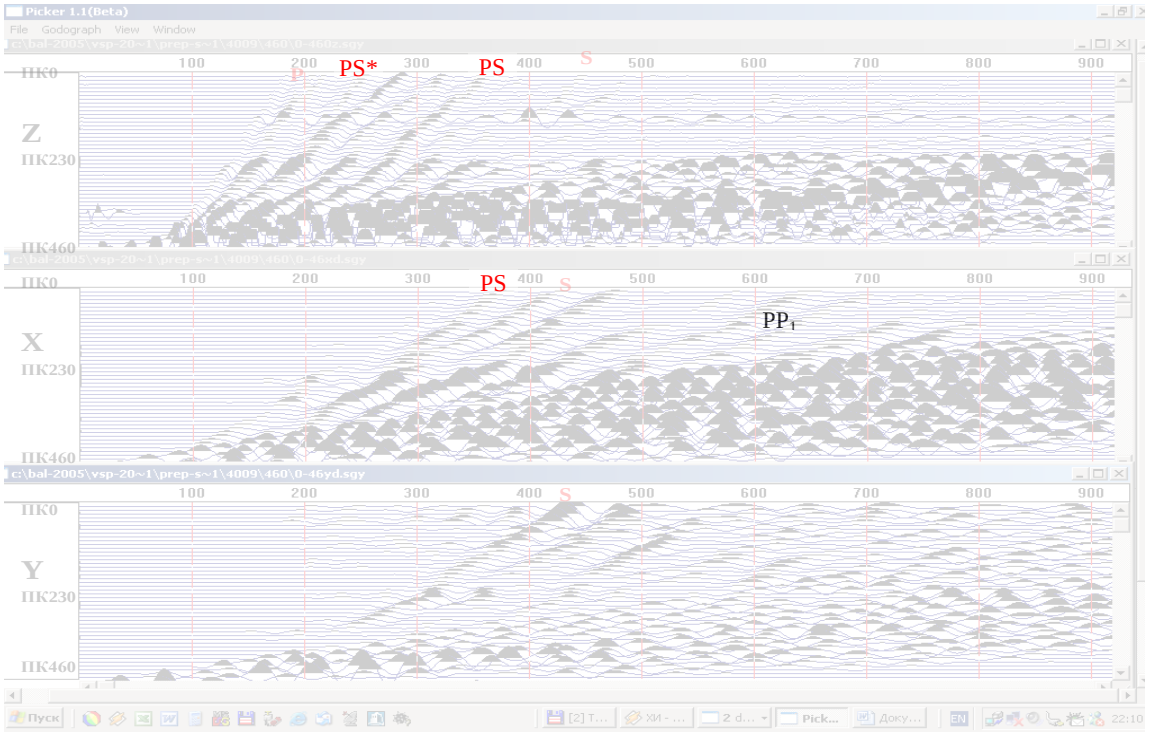
Такое многообразие вторичных волн следует ожидать и учитывать при идентификации целевых отраженных и преломленных поперечных волн при наземных сейсмических наблюдениях.

В целом, по результатам скважинных сейсмических измерений на участке Балапан следует отметить, что подтверждена природа высокоскоростной сейсмической границы (кровли фундамента) в продольных волнах. Впервые в поле поперечных волн получены сведения о наличии и глубине залегания сейсмических границ не только в терригенном комплексе, но и в обводненной части скального фундамента. При этом с использованием полей продольных и поперечных волн по разности глубин залегания первых сейсмических границ в фундаменте представляется возможным оценить мощность наиболее водопроницаемых пород, являющихся горизонтом трещинно-поровых вод.

НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сейсмические наземные исследования проведены для проверки предпосылок, установленных по данным ВСП, относительно картирования горизонта трещинно-поровых вод. Сейсмические наблюдения проведены методом преломленных (рефрагированных) волн (КМПВ) [4, 6]. Для изучения продольных волн использована технология возбуждения упругих колебаний установкой «падающий груз» с энергией порядка 12 Кдж и регистрации волн вертикальными сейсмоприемниками DF-8 с шагом 10 м вдоль линии наблюдения. Для отработки технологии возбуждения и приема поперечных волн проведена серия экспериментов, включающих возбуждение упругих колебаний установкой «падающий груз», прием – горизонтальными сейсмоприемниками СВ-20, ориентированными вдоль линии наблюдений и ортогонально к ней. Регистратор – цифровой, шаг квантования сигнала 1 мс, длина записи 1.5 с. Обработка данных проведена с использованием специализированного программного пакета VISTA (корреляция первых вступлений, построение годографов, расчет граничных и средних скоростей), а также ПМО, предназначенного для обработки головных волн (GAETAN). Примеры волновых полей, полученных при наземных наблюдениях, приведены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, вертикальные сейсмоприемники (Z) регистрируют четко идентифицируемые первые вступления продольной волны (P). Далее ее сменяет группа интенсивных кратно-преломленных и обменных (PS) волн, на фоне которых преломленная поперечная волна (S) проявляется слабо. Записи поперечных волн с лучшим разрешением получены при регистрации горизонтальных составляющих волнового поля (X и Y).



Z, X , Y – компоненты, регистрируемые сейсмоприемниками DF-8 (Z), СГ-20 (X – вдоль линии наблюдений, Y – вкрест линии наблюдений). P, S – продольная и поперечная преломленные волны от кровли слабо измененного скального фундамента; PS – обменная волна. PS*– кратно отраженно-преломленная волна. Устье скважины – ПК230

Рисунок 2. Волновые поля преломленных продольных (P) и поперечных волн (S) по наземному сейсмическому профилю в районе скважины 4009 участка Балапан

При этом наилучшее соотношение сигнал/помеха достигнуто в случае ориентации оси чувствительности сейсмоприемников ортогонально линии наблюдений (Y). Именно эти волновые поля использованы для определения глубины залегания преломляющих границ в поле поперечных волн и расчета граничных скоростей. Таким образом, проведенный эксперимент показали возможность в условиях участка Балапан регистрировать целевые поперечные волны без осуществления специальных приемов их возбуждения, основанных на сложно осуществимых боковых ударах.

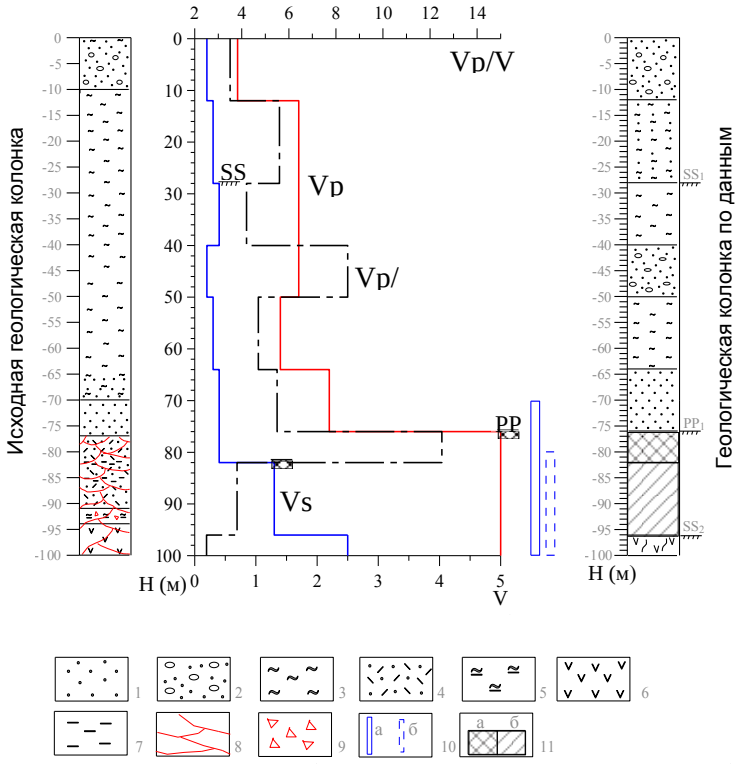
РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Результаты комплексной интерпретации данных ВСП и наземных сейсмических зондирований, выполненных в районе скважины 4043, приведены на рисунке 3.

Геологический разрез, вскрытый скважиной 4043, имеет значительную мощность осадочного чехла, верхняя часть которого (до глубины 11 м), представлена песками, супесями и гравием и характеризуется наиболее низкими значениями скорости поперечных волн (Vs) – 0.2 км/с и продольных волн (Vp) - 0.7 км/с. Ниже этой границы отмечено резкое повышение скорости Vp - до 1.7 км/с, тогда как для Vs возрастание составляет порядка 0.1 км/с. При общей тенденции увеличения значений Vp и Vs с глубиной, терригенная толща характеризуется неоднородностью по скоростным свойствам (особенно в продольных волнах). При этом, как показано выше, наибольшие изменения скоростей Vp и Vs связаны с наличием в разрезе обводненной корой выветривания пород скального фундамента. Среднее значение соотношения Vp/Vs в терригенном комплексе не более 5, интервал 40-50 м характеризуется повышенной величиной этого параметра (Vp/Vs=8.5), что интерпретируется, согласно [6], как интервал с наиболее водопроницаемыми породами.

В породах фундамента максимальные и повышенные значения параметра Vp/Vs по данным ВСП и наземных зондирований отмечены в интервале глубин 75 - 95 м, т.е. в трещиноватых породах коры выветривания. При этом, кровля коры выветривания проявилась резким увеличением скорости продольных волн, а подошва (кровля неизмененных пород фундамента) – повышением скорости поперечных волн. Именно в этом интервале разреза по данным бурения и откачек установлены максимальное обводнение пород и водоприток.

Результаты сейсмических исследований на участке Балапан подтвердили уже доказанную эффективность сейсморазведки КМПВ при картировании кровли скального основания. Новым результатом является возможность наземной сейсморазведки при совместном использовании скоростей продольных и поперечных волн выявлять водоносные комплексы как в терригенных породах, так и в коре выветривания.



1 – песок; 2 - песок с гравием, галькой» 3 – глины; 4 - туфопесчаники; 5 - кремнистые сланцы; 6 - порфириты; 7 - алевролиты; 8 - зоны трещиноватости; 9 - зоны брекчирования пород; 10 - интервал обводненной части пород (а) и водопритока (б) по гидрогеологическим данным; 11 - интервал обводненных максимально трещиноватых (а) и трещиноватых (б) пород по данным сейсморазведки

Рисунок 3. Скважина 4043 участка Балапан. Результаты комплексной интерпретации данных сейсморазведки

Как следует из полученных данных, для решения этой задачи при наземных наблюдениях необходимо раздельное возбуждение и регистрация продольных и поперечных волн. При этом, неотъемлемой составной частью работ, особенно на стадии опытно-методических исследований, должны быть скважинные наблюдения (ВСП), в задачу которых ставится уточнение скоростных характеристик разреза, определение природы регистрируемых волн и их глубинная привязка.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что совместное использование продольных и поперечных волн обеспечивает существенное расширение информационных возможностей сейсморазведки при выявлении и прослеживании трещинно-поровых вод в скальных породах. На основании данных вертикального сейсмического профилирования и наземных наблюдений обоснована технология сейсмических исследований, обеспечивающая выявление и изучение горизонтов трещинно-поровых вод, как одной из актуальных задач, подлежащих решению при оценке реальной степени риска распространения радионуклидов и наиболее вероятных направлений их движения на участке Балапан.

Литература

1. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии / Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Недра, 1985. – 184 с/
2. Огильви, А.А. Основы инженерной геофизики / Огильви А.А/ – М.: Недра, 1990. - 500 с.
3. Горяинов, Н.Н. Сейсмические методы в инженерной геологии / Н.Н. Горяинов, Ф.М. Ляховицкий. - М.: Недра, 1979. – 43 с.
4. Интерпретация данных сейсморазведки: Справочник / Отв. ред. О.А. Потапов.- М.: Недра, 1990. – 448 с.
5. Беляшова, Н.Н. Изучение влияния ядерных взрывов на окружающие горные породы и морфологию поверхности с целью разработки методов Инспекции на местах / Н.Н. Беляшова, Л.А. Русинова, А.В. Беляшов, А.А Смирнов // Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2000. – Вып. 2. – С. 105 – 110.
6. Сейсморазведка: Справочник геофизика / Отв. ред. И.И. Гурвич, В.П. Номоконов. – М.: Недра, 1981. – 464 с.

СЕЙСМОБАРЛАУ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША БАЛАПАН БӨЛКШЕСІНДЕГІ ЖАРЫҚШАҚ-КЕУЕКТІК СУЛАРЫН ЗЕРДЕЛЕУ

Жолдыбаев А.К.

Балапан бөлікшесіндегі вертикаль сейсмикалық кескіндеу және жер бетіндегі бақылау деректері негізінде, қума және көлденең толқындарының қатынасы бойынша жарықшақ-кеуектік сулар горизонттарын анықтауын және зерделеуін қамтамасыз ететін, сейсмобарлау технологиясы негізделнен.

INTERSTITIAL WATER STUDY AT BALAPAN SITE ACCORDING SEISMIC EXPLORATION DATA

A.K. Zholdybaev

Seismic exploration method providing with detection and interstitial water study according to the ratio of velocities for P- and S-waves was proved on the basis of data of vertical seismic profiling and ground observations at Balapan site.

УДК 591.524 (574.41)

СОСТАВ И РАЗВИТИЕ СООБЩЕСТВА МИКРОРАКООБРАЗНЫХ В ВОДОЕМАХ ЗОНЫ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА ПО МАТЕРИАЛАМ 2003-2004 гг.

Стуге Т.С.

Институт зоологии МОН РК, Алматы, Казахстан

Исследован осенний зоопланктон некоторых водоемов зоны Семипалатинского полигона в условиях падения уровня воды и повышения её минерализации по сравнению с периодом 1993, 1995 г. Описывается видовой состав микроракообразных, фаунистические комплексы, структурные характеристики и количественные показатели развития сообщества и их изменения по водоемам и годам. Состояние сообщества по ряду информационных показателей оценивается как благополучное в верховье р.Шаган и водотоках площадок Д2 и Д3. В остальных водоемах экологическая ситуация приближается к экстремальной.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ

Полевые исследования проводили в сентябре-октябре 2003 г. и октябре 2004 г. Осенью 2003 г. пробы зоопланктона отбирали в верховье р. Шаган, водохранилище Шаган, Атомном озере, а также на водотоках горного массива Дегелен: р. Узунбулак с притоком, водотоке на площадке Д-2 и водоемах площадки Д-3, осенью 2004 г. – в верховье р. Шаган, р. Узунбулак, водоёмах площадки Д-3. Всего собрано 20 количественных и 4 качественные пробы.

При отборе проб пользовались стандартными методами [1]. Для получения количественных проб процеживали 100 литров воды через планктонную сеть Апштейна (мельничный газ № 72). Тотальные ловы не применяли из-за сильного обмеления водоемов и водотоков. Собранных беспозвоночных животных фиксировали в 4% формалине. Камеральную обработку проб вели в условиях лаборатории. Идентификация видового состава ракообразных проводилась под микроскопом “Opton” с использованием соответствующих определителей [2,3] . Количественный учет проводили в камере Богорова. Животных просчитывали в трех порциях, отобранных штемпель-пипеткой из пробы, доведенной до определенного объема (50, 75 или 100 $см^3$), с дальнейшим пересчетом на кубометр. Редкие и крупные формы просчитывались во всей пробе. Проводили измерение длины тела ракообразных по отдельным видам и стадиям развития. Для расчета биомассы использовали формулы линейно-весовой зависимости [4] .

Для характеристики состояния сообщества использовали ряд информационных показателей [5-7]: коэффициент видового разнообразия Маргалефа, индекс Шеннона-Уивера (в двух модификациях, по численности и биомассе), показатель трофической структуры Вх/Вм (где Вх и Вм – показатели биомассы хищников и фильтраторов). Сапробность воды устанавливали по видам-индикаторам и индексу сапробности Пантле-Букка [8]. Фаунистические комплексы выделяли по индексу плотности видов [9] . Сравнение видового состава ракообразных из водоемов зоны СИП проводили с использованием индекса видового сходства Серенсена по формуле Кс = 2C · 100% /A+B, где A и B – количество видов в сравниваемых водоемах, C – количество общих видов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первичное обследование зоопланктона водоемов зоны СИП в осенний период было проведено в 1993 и 1995 гг. при температуре воды 8.0-17.0^oC и минерализации воды в р. Шаган 0.79-0.90 г/л, в р. Узунбулак 0.27 г/л, в водохранилище Шаган 7.0-17.9 г/л [10,11]. При этом видовое разнообразие ракообразных составляло в р. Шаган 26 видов, в водохранилище Шаган – 18, в р. Узунбулак – 9. Максимум показателей количественного развития был зарегистрирован в водохранилище – 104.18 - 110.96 тыс. экз./$м^3$ и 6.57-7.89 г/$м^3$. В р. Шаган показатели варьировали от 0.21 до 12.26 тыс. экз./$м^3$ и от 0.012 до 0.37 г/$м^3$, в р. Узунбулак численность составляла 1.9 тыс. экз./$м^3$, биомасса 0.074 г/$м^3$. Преобладающей группой повсюду были веслоногие рачки с абсолютным доминантом Arctodiaptomus salinus (Daday).

Минерализация воды в верховье р.Шаган в 2003-2004 гг. (0.83-0.90 г/л) была на уровне предыдущих лет, в водохранилище Шаган она возросла по сравнению с этапом исследований 1993, 1995 гг. в пять раз, с осенью 2002 г. более, чем на треть (с 41.04 до 67.11 г/л), в Атомном озере увеличилась незначительно с 12.97 до 13.31 г/л. В водотоках массива Дегелен наиболее высокая минерализация воды – 0.57 г/л – отмечена в притоке Узунбулака при вдвое меньших показателях в основном русле – 0.25-0.28 г/л. В водотоке Д-2 показатели минерализации (0.48 г/л) были сопоставимы с данными 2001-2002 гг. (0.47-0.49 г/л), во впервые обследованных водоемах участка Д-3 наблюдались низкие показатели минерализации – 0.28-0.32 г/л в 2003 г и 0.37-0.39 г/л в 2004 г.

Температура воды в октябре (5.5-12.0^o C) была наиболее низкой за весь период наших исследований на полигоне и находилась на уровне нижней границы существования теплолюбивых видов ветвистоусых ракообразных.

Однако, несмотря на такие низкие температуры воды, осенняя фауна низших ракообразных оказалась довольно разнообразной и по числу таксонов в

2003 г.(42) наиболее богатой за все время исследований (в 1993 – 16, в 1995 – 32, в 2002 – 30 видов). Из 42 выявленных таксонов 24 вида относились к ветвистоусым ракообразным (Cladocera), 16 – к веслоногим (Copepoda), 2 – к ракушковым (Ostracoda) (таблица 1). В качестве новых для полигона указываются 7 видов: D. lacustris, D. curvirostris, S. vetuloides, M. aurita, S. kingi, C. sphaericus alexandrovi, P. similis, из них последние три встречены в бассейне р. Баканас на территории, прилегающей к полигону. В 2004 г. видовое разнообразие ракообразных понизилось до 23 таксонов. Сходство видового состава с материалами 1993, 1995 гг. было очень низким, коэффициент Кс = 36.6%.

Таблица 1. Видовой состав микроракообразных водоемов зоны СИП, осень 2003-2004 гг.

Название таксона	р.Шаган, верховье	В-ще Шаган	Атомное озеро	р.Узун-булак	Водоток Д-2	Водоёмы Д-3
Cladocera						
Diaphanosoma lacustris Korinek, 1981 *						+
Daphnia pulex Leydig, 1860				+	+	+
D. curvirostris Eulm., 1887 em. John., 1952 *					+	+
Simocephalus expinosus (De Geer, 1778)						+
S. vetulus (O.F.Muller, 1776)					+	+
S. vetuloides Sars, 1898 *						+
Scapholeberis kingi Sars, 1888 *	+					
S. rummneri Dumont, Pensaert, 1983					+	
Scapholeberis sp.	+					
Ceriodaphnia quadrangula (O.F.Muller, 1785)	+					
C. dubia Richard, 1894						+
Megaphenestra aurita (S. Fischer, 1849) *						+
Moina mongolica Daday		+	+			
Moina sp.	+				+	+
Biapertura affinis (Leydig)	+			+		
Alona rectangula Sars, 1862	+			+		
A. costata Sars, 1862	+					
A. guttata Sars, 1862	+					
A. quadrangularis (O.F.Muller, 1785)	+			+		
Alonella nana (Baird, 1850)	+		+			
A. excisa (Fischer, 1854)	+					+
Pleuroxus aduncus (Jurine, 1820)				+		+
P. trigonellus (O.F.Muller, 1875)				+		+
P. similis Vavra, 1900 *						+
Pleuroxus sp.	+			+		
Chydorus sphaericus sphaericus (O.F.M., 1785)				+	+	+
C. s. alexandrovi Poggenpol, 1874 *						+
Bosmina longirostris O.F.M, 1785	+			+		
Copepoda						
Ectocyclops phaleratus (Koch, 1893)	+		+	+		
Paracyclops fimbriatus (Fischer, 1853)						+
Eucyclops serrulatus (Fischer, 1851)				+	+	+
E. macrurus (Sars, 1863)	+					+
E. speratus (Lilljeborg, 1901)						+
Eucyclops sp.	+					
Megacyclops viridis (Jurine, 1820)			+		+	+
Acanthocyclops sp.			+			+
Diacyclops bisetosus (Rehberg, 1880)			+			
D. bicuspidatus (Claus, 1857)				+		
Diacyclops sp.						+
Microcyclops sp.						
Apocyclops dengizicus (Lepeschkin, 1900)	+	+		+		
Mesocyclops leuckarti (Claus, 1857)	+					+
Arctodiaptomus salinus (Daday, 1885)			+			
Diaptomus sp.	+					+
Cletocamptus retrogressus (Shmank., 1875)		+	+			
Harpacticoida	+					+
Ostracoda 1	+	+	+	+	+	+
Ostracoda 2				+		+
Всего 48	24	4	9	15	9	27
*- вид впервые указывается для зоны полигона						

По видовому разнообразию в самом конце вегетационного сезона в сообществе преобладали веслоногие из сем. Cyclopidae – 28.5% от общего числа видов, из них 16.6% приходилось на долю представителей п/семейства Cyclopinae, 11.9% - на представителей п/семейства Eucyclopinae. Однако и ветвистоусые ракообразные, несмотря на очень низкие температуры воды, сохранили свое значение в сообществе, преобладали среди них представители семейства Chydoridae (23.8% от общего числа видов), несколько уступали им рачки семейства Daphniidae (21.4% от общего числа видов). Представленность других групп была очень слабой (2.4-4.7%). Во второй год исследований преобладающей группой по числу видов стали мелкие хидориды – 14 видов (60.87%).

Наиболее широко были распространены ракушковые рачки – 87.5% встречаемости. Из других ракообразных наибольшей частотой встречаемости характеризовались ветвистоусые C. sphaericus sphaericus и циклопы E. serrulatus (по 37.5%), D. pulex и M. viridis (по 31.2%), A. nana и P. trigonellus (по 25.0%). Встречаемость других видов была ниже – от 6.2 до 18.7%, половина видов из общего списка встречены лишь на одной станции.

Различие экологических условий в исследованных водоемах обуславливало существенную разницу в видовом составе и количественных показателях развития ракообразных.

В водоемах системы реки Шаган в начале октября фауна ракообразных была представлена разными комплексами. В отличие от осени 2002 г., когда в верхнем течении р. Шаган доминировал комплекс “D. longispina” с очень высоким индексом значимости - от 108.6 до 877.03, в исследованный период 2003 г. в верховье развивался комплекс “A. nana” с низким индексом значимости доминирующего вида – 18.09, с субдоминантами M. leuckarti (7.65) и A. rectangula (5.81). В 2004 г. в плесе верховья р. Шаган развивался комплекс “A. dengizicus” с индексом значимости доминанта – 15.05. Субдоминировали B. longirostris (9.46) и Ostracoda (8.02). В заводи р. Шаган выявлен комплекс “A. harpae (14.19) – B. affinis (13.63)” с субдоминантами A. nana (12.03) и A. dengizicus (11.53).

В водохранилище Шаган в связи с резким возрастанием солености произошла смена доминантного комплекса “M. mongolica – A. salinus”, развивающегося в этом водоеме на протяжении десяти лет наших наблюдений. Диаптом A. salinus в 2003 г. выпал из состава планктофауны, второй доминант галофил M. mongolica присутствовала осенью только в виде эфиппиальных яиц. Вместо них руководящее значение в водохранилище приобретает фаунистический комплекс характерного представителя фауны континентальных соленых водоемов харпактикоидного рачка “Cletocamptus retrogressus” с высоким значением индекса значимости 399.46. Индекс значимости субдоминирующих Ostracoda на порядок ниже, чем у доминанта – 14.03.

В нижележащем по течению реки Шаган Атомном озере, в условиях стабильной в последние два года солености (12-13 г/л), сохраняет руководящее положение фаунистический комплекс “A. salinus”, хотя индекс значимости доминирующего вида снижается по сравнению с летом 2002 г. с 673.4 до 242.36. В число субдоминантов, наряду с M. mongolica (индекс значимости 68,28), входит и C. retrogressus с индексом значимости 59.24.

На Дегелене в основном русле р. Узунбулак в 2003 г. развивался комплекс “D. bicuspidatus”, в ядро которого входили субдоминанты P. trigonellus и Ostracoda. Индексы значимости доминантного вида и субдоминантов были чрезвычайно низки и составляли, соответственно, 6.75, 4.27 и 3.49. В 2004 г. здесь обитал комплекс “A. dengizicus (11.53) - C. sphaericus (7.71)” с субдоминантами Ostracoda (6.11) и E. phaleratus (6.07). В притоке р. Узунбулак преобладающим в 2003 г. являлся комплекс “Ostracoda» с субдоминантами Eucyclops sp. и D. pulex. Индексы значимости всех названных видов здесь также очень низки – 8.73, 5.94 и 4.90, соответственно.

В водотоке площадки Д-2 осенью 2003 г. преобладал фаунистический комплекс “D. curvirostris” с индексом значимости доминирующего вида 55.29. Прошлогодний доминант S. vetulus в 2003 г. входил в ядро фаунистического комплекса в качестве первого субдоминанта (индекс значимости 25.08), вторым субдоминантом становится E. serrulatus (19.39).

На впервые обследованной площадке Д-3 в водоёмах в 2003 г. выявлен фаунистический комплекс “M. viridis – E. serrulatus” (индексы значимости доминантов невысоки – 22.73 и 20.05). Субдоминируют Ostracoda (19.58) и два вида дафний со сходными величинами индексов значимости, у D. pulex – 16.38, у D. curvirostris – 16.03. В 2004 г. при более высоких величинах биомассы здесь развивался фаунистический комплекс “M. viridis” с высокими показателями индекса значимости доминанта – 167.63 – и субдоминантов C. sphaericus (116.88) и Ostracoda (106.48). Таким образом, в целом в водотоках Дегелена развиваются практически одни и те же виды, образующие, благодаря их разному соотношению, различающиеся по названию фаунистические комплексы.

Ниже приводится более детальная характеристика развития сообщества ракообразных по всем исследованным водоемам.

Р. Шаган, верховье. В верхнем течении р. Шаган осенью 2003 г. выявлено 12 видов_ракообразных, что сходно с результатами предыдущей осенней съемки (14 видов). В группе ветвистоусых ракообразных, как и в 2002 г., по численности доминировал мелкий вид из семейства хидорид A. nana со средней численностью 1455 экз/м^3. Численность других семи видов Cladocera на два порядка ниже и не превышает десятков особей на кубометр.

Наиболее высокие показатели из них имели хидориды A. rectangula – 72 экз./м^3, A. guttata – 50 экз./м^3 и A. excisa – 42 экз./м^3. По биомассе также преобладали алонеллы – 3.27 мг/м^3, доминировавшие в летний период дафнии в начале октября уже не присутствовали в планктоне, поэтому общая биомасса ветвистоусых была очень низка и изменялась по станциям от 3.75 до 5.12 мг/м^3.

Численность веслоногих ракообразных была очень низка, составляя в среднем 110 экз./м^3, преобладали копеподитные стадии мезоциклопов. Взрослые особи циклопов M. leuckarti и E. macrurus встречены единичными особями, не превышая вкупе 10 экз./м^3. Численность остракод также была мизерна – 5-20 экз. /м^3. В целом в самом конце вегетационного сезона (начало октября) в верховье реки по численности и биомассе преобладали кладоцеры (92.8 и 81.4%), тогда как, по данным съемки 2002 г., в первой половине сентября на этом участке реки по численности доминировали копеподы (71.4%).

Осенью 2004 г. для верховья р. Шаган отмечено 16 видов ракообразных В группе ветвистоусых в плесе реки сохраняет руководящее положение вид A. nana, но численность его понижается на порядок по сравнению с 2003 г. – 130 экз./м^3. Примерно такую же численность поддерживает и циклоп A. dengizicus – 160 экз./м^3.Другие виды имеют в конце вегетационного сезона ещё более низкие показатели – от 10 до 40 экз./м^3. В заводи реки, где глубины были больше, чем в плесе, алонелла имела более высокую численность – 690 экз./м^3 с биомассой 1.45 мг/м^3. По биомассе выделялись виды A. dengizicus (1.26 мг/м^3) и B. affinis (1.86 мг/м^3).

Водохранилище Шаган. Осенью 2003 г. видовое разнообразие в водохранилище сократилось в сравнении с предыдущими годами и составляло всего 4 вида. Из состава фауны водохранилища полностью выпали солелюбивые виды диаптомид, составлявшие в прежние годы основу копеподного комплекса - A. salinus и E. affinis. В 2002 г. при солености в 41 г/л арктодиаптомус ещё имел высокую численность до 10.5 тыс. экз./м^3. Имеются данные о существовании этого вида при 50 г/л [12], однако зарегистрированный к осени 2003 г. уровень минерализации воды выше 60 г/л, повидимому, находится выше верхнего предела солености для этого вида. Теплолюбивые ветвистоусые M. mongolica, верхний предел соленостной толерантности которых гораздо выше, чем у арктодиаптомуса, до 90 г/л [13], также не были обнаружены в октябрьских пробах, так как закончили свою вегетацию, отложив покоящиеся яйца, которые присутствовали в планктонных пробах.

Основным компонентом зоопланктона в начале октября в водохранилище был C. retrogressus, составлявший 98.9% общей численности сообщества и 99.6% его биомассы. Общая численность вида в водоёме была 73.0 тыс. экз. /м^3, биомасса 1595,69 мг/м^3. Популяция представлена на 79% самками, на самцов и копеподитов приходится по 16.4 и 4.6 %, науплиальные стадии в это время года отсутствовали в планктоне. Самки клетокамптуса имели среднюю длину, несколько превышающую указанную в литературе – 0.86 мм против 0.77 мм [14]. Из копепод также был обнаружен единичными особями (до 10 экз. /м^3) циклоп A. dengizicus, представленный копеподитными стадиями развития. Численность ракушковых рачков – 160 экз. /м^3 – была на уровне минимальных показателей прошлого года.

Атомное озеро. Набор видов в этом водоеме увеличился более, чем вдвое, по сравнению с летом 2002 г. (с 4 до 9), в основном за счет выявленных в этом году новых для водоема видов циклопов M. viridis, E. phalerastus, D. bisetosus, Acanthocyclops sp. В озере, в отличие от водохранилища Шаган, ветвистоусый рачек M. mongolica еще продолжает обитать в толще воды с численностью 634 экз. /м^3, биомассой 46.62 мг/м^3. До 35% численности популяции моины составляют эфиппиальные самки, но присутствует и молодь – 16-25% от общей численности вида. В восточной части озера найдена A. nana, достигающая здесь довольно высокой численности в 500 экз./м^3.

Доминирующей группой в водоеме являются копеподы с абсолютным доминантом A. salinus (71.1-88.2% общей численности и 75.6-90.6% биомассы зоопланктона). Популяция вида в начале октября представлена всеми стадиями развития (таблица 2), преобладают половозрелые особи; количество самок с яйцевыми мешками невелико, они составляют от 4.3 до 7.4% от общего числа особей в популяции арктодиаптомуса. Повсеместно обнаружены харпактициды C. retrogressus, их численность изменялась по акватории от 1330 до 1513 экз./м^3, т.е. распределение по водоему было равномерным, а доля в сообществе довольно заметной – от 6.6 до18.7% по численности и от 4.1 до 8.8% по биомассе. Размеры половозрелых особей были ещё крупнее, чем в водохранилище Шаган, так, длина самок вариировала от 0.8 до 1.0 мм при среднем значении 0.93 мм, что на 20% превышает параметры, приведенные в литературе [14]. Подобное увеличение размеров рачков было отмечено нами для A. salinus из водохранилища Шаган [10].

Таблица 2. Состав популяции A. salinus в Атомном озере, экз. /м^3.

Станции	♀♀	♂♂	Копепо-диты	Науплии	♀♀ : ♂♂	Ad : juv	Общая числен.
1	2220	835	1500	500	1 : 0.37	1 : 0.65	20167
2	8667	3500	5500	2500	1 : 0.40	1 : 0.66	5055
среднее	5443	2167	3500	1500	1 : 0.39	1 : 0.65	12611

В озере выявлено 5 видов циклопов, но взрослые особи были найдены только у D. bisetosus, у остальных видов обнаружены лишь копеподитные стадии. Численность циклопов была невелика – от 60 до 130 экз. /м^3 вкупе, в северной части водоема найден только 1 вид – D. bisetosus, в восточной части разнообразие циклопид возрастало до четырех видов. Численность ракушковых рачков в водоеме была очень мала – 20-60 экз. /м^3.

Р. Узунбулак. В 2003 г. в р. Узунбулак с притоком зарегистрировано 10 таксонов ракообразных. В основном русле ручья обитали 6 видов, такое же низкое видовое разнообразие отмечено нами и летом 2002 г. В притоке р. Узунбулак оно несколько выше – 8 видов. В основном русле максимальное обилие наблюдалось лишь на одной станции в месте впадения водотока штольни 104, здесь найден один вид ветвистоусых P. trigonellus численностью 90 экз. /м^3 и два вида циклопов – D. bicuspidatus, представленный всеми стадиями развития (общая численность 60 экз. /м^3) и Eucyclops sp., представленный личиночными стадиями – 30 экз. /м^3. Кроме них присутствовали две формы ракушковых рачков, определение которых до вида не проводили, - 40 экз. /м^3. На других станциях в русле ручья фауна была ещё беднее, там найдены единичные особи C. sphaericus и личиночных стадий циклопов.

В притоке р. Узунбулак в водоемчике со стоячей водой видовое разнообразие ветвистоусых было выше (4 вида) и состав осенней фауны кладоцер был сходен с таковым в верховье р. Шаган, численность отдельных видов хидорид была очень низкой – 10-30 экз. /м^3. По биомассе, тем не менее, ветвистоусые составляли более половины (54.46%) общей массы сообщества за счет крупной формы D. pulex. По численности доминировали копеподы (50.0%), среди которых преобладали эуциклопы – 80 экз. /м^3, но по биомассе они , как сказано выше, уступали кладоцерам. Ракушковые рачки развивались в притоке р. Узунбулак повсеместно в небольших количествах (50-70 экз. /м^3), составляя на участке со стоячей водой 22.7% от общей численности зоопланктона, а на станции в русловой части до 77.7% численности и 96.8% биомассы.

В 2004 г. видовое разнообразие ветвистоусых в основном русле Узунбулака не превышало четырех видов, численность их была мизерна – 10-20 экз./м^3, у веслоногих зарегистрировано всего два вида циклопов – A. dengizicus (90 экз./м^3) и E. phaleratus (30 экз./м^3).

Водоток площадки Д-2. Зоопланктофауна водотока в начале октября включала 9 видов ракообразных: 6 видов Cladocera, 2 – Copepoda и один вид ракушковых рачков. В пробах найдены также эфиппиальные яйца ветвистоусых рачков р. Moina.Ветвистоусые рачки занимают преимущественное положение как по видовому разнообразию, так и по количественному развитию. Доминирует по численности S rummneri – 150 экз. /м^3. Немного уступает по этому показателю S. vetulus – 110 экз. /м^3. По биомассе преобладали немногочисленные, но крупные дафнии D. curvirostris. Заметной численности достигал также летний доминант C. sphaericus – 40 экз. /м^3. В целом по численности ветвистоусые составляли 67.3% от общего количества ракообразных, по биомассе – 80.9%.

Веслоногие ракообразные были представлены половозрелыми особями двух видов E. serrulatus (60 экз. /м^3) и M. viridis (10 экз. /м^3). Доля веслоногих не превышала 13.4% от общего числа ракообразных. Роль ракушковых рачков была более существенна, при численности в 100 экз. /м^3 они составляли около 20 % от общего числа ракообразных. В целом видовой состав и показатели количественного развития были сходны с результатами, полученными осенью 2002 г.

Водоёмы площадки Д-3. В 2003 г. обследованы разные по гидрологическим условиям участки. В водотоках зарегистрировано максимальное число видов в этом сезоне – 27. Оно колеблется по исследованным станциям от 6 до 15. Группа ветвистоусых представлена 15 видами рачков, треть из них – это крупные ракообразные из семейства Daphniidae, дафнии и симоцефалы, столько же видов приходится на мелких рачков из семейства Chydoridae. Веслоногие представлены 10 видами, из них 8 – циклопы, 1 – диаптом, 1 – харпактикоидный рачок. Из кладоцер высокой численности на отдельных участках достигает C. sphaericus alexandrovi – 90-560 экз. /м^3 (16.2-25.6%), P. trigonellus – 80 экз./м^3 (28.5%), D. curvirostris – 90 экз. /м^3 (11.7%), численность остальных видов гораздо ниже и колеблется от 10 до 40 экз. /м^3. В целом роль кладоцер по отдельным участкам неравнозначна, их численность составляет от 32.5 до 47.6% от общей численности ракообразных, биомасса от 39.3 до 82.2%.

У копепод наиболее массовыми видами являются E. serrulatus – 250-490 экз. /м^3 (19.82 – 39.8% по численности, 6.35-33.1% по биомассе) и M. viridis – 60-360 экз. /м^3 (16.5-23.1% по численности , 33.2-38.0% по биомассе). Кроме них, заметной численности на отдельных станциях достигает придонный вид P. fimbriatus – до 88 экз./м^3 и E. macrurus – до 80 экз./м^3. Diaptomus sp. в количестве 20 экз./м^3 обнаружен лишь на одной станции, на том же уровне находится развитие харпактицид, акантоциклопов и мезоциклопов. Доля копепод изменяется по участкам водотока, составляя от 33.3 до 53.6% по численности и от 6.6 до 51.3% по биомассе. Повсеместно обнаружены остракоды, их обилие колеблется от 40 до 480 экз. /м^3.

В 2004 г. число видов на площадке Д-3 в начале октября было втрое меньше, чем в 2003 г. (8 против 27). Из крупных ветвистоусых ракообразных зарегистрирован всего один вид S. vetulus (180 экз./м^3 и

29.29 мг/м^3). В правом притоке водотока Д-3 высокую численность создавал мелкий рачок хидорус с двумя подвидами – 8330 экз./м^3 с биомассой 136.61 мг/м^3. Группа веслоногих была представлена всего двумя видами M. viridis – 3210 экз./м^3 и 281.02 мг/м^3 и E. serrulatus – 2000 экз./м^3 и 25.64 мг/м^3. В массовых количествах развивались ракушковые рачки – 6810 экз./м^3. В левом притоке, напротив, в период наших исследований, были найдены только остракоды в количестве 30 экз./м^3.

Полная картина количественного развития сообщества низших ракообразных в водоемах зоны СИП показана в таблице 3.

Как и во все годы исследований, максимум количественного развития сообщества зарегистрирован в водохранилище Шаган. Однако, при переходе водоема в категорию гипергалинных показатели биомассы ракообразных понизились в 6-7 раз по сравнению с осенними показателями в 1993 и 1995 гг. и были наименьшими за весь период наблюдений. Относительно высоки были показатели развития и в другом солоноводном водоеме – Атомном озере, от 0.31 до 1.03 г/м^3. В реке Шаган показатели развития сообщества были очень низкими, не превышая 6.2 мг/м^3. Они также были ниже на 1-2 порядка по сравнению с осенними данными за девяностые годы. Самые низкие значения численности и биомассы зарегистрированы в р. Узунбулак (0.2-4.7 мг/м^3). В других водотоках на Дегелене (водотоки Д-2 и Д-3) показатели были на порядок выше, чем в Узунбулаке, различаясь по станциям от 3.3 до 99.05 мг/м^3. Впервые полученные данные по водотоку Д-3 позволили расширить диапазон данных для включения в систему мониторинга территории СИП по гидробиологическим показателям.

В таблице 4 показаны расчисленные значения традиционно используемых нами информационных индексов, характеризующих состояние сообщества. Наиболее благополучное состояние сообщества в исследованное время отмечено для водотока Д-3, где коэффициенты видового разнообразия Маргалефа и Шеннона-Уивера имели наибольшие значения. Стабильность сообщества сохранялась в верховье р. Шаган, здесь показатели коэффициентов имели значения, сходные с прошлогодними. В водотоке Д-2 показатели улучшились по сравнению с осенью 2002 г. (индекс Маргалефа с 0.67 до 1.12, индекс Шеннона с 1.69 до 2.22). В р.Узунбулак, особенно в его притоке, индексы разнообразия повысились вдвое относительно 2001-2002 гг., но все еще были характерны для водоемов с низким уровнем стабильности сообщества. В водохранилище Шаган сложилось специфическое сообщество, характеризуемое наиболее низкими показателями индексов видового разнообразия (меньше единицы), свойственными для водоемов с экстремальной экологической ситуацией [7]. Аналогичные показатели наблюдались и в Атомном озере, хотя их абсолютные значения были несколько выше, чем в водохранилище.

Трофическая структура была благоприятной во всех исследованных водоемах, мирные формы-фильтраторы преобладали над хищниками. Степень органического загрязнения на станциях, определенная по индексу Пантле-Букка, оставалась на уровне прошлогодних значений для осеннего зоопланктона – 1.37-1.92. Наиболее слабый уровень загрязнения (олиго-бетамезосапробный) был выявлен в верховье р. Шаган (среднее значение 1.57). Всем остальным водотокам был свойственен бета-мезосапробный уровень загрязнения (1.69-1.87). Уровень сапробности воды в водохранилище Шаган и Атомном озере остается невыясненным, так как развивающиеся в них в массовых количествах галофильные ракообразные не указаны в шкале сапробных видов [8].

Таблица 3. Численность (Ч, тыс.экз./м^3) и биомасса (Б, мг/м^3) низших ракообразных в водоемах зоны влияния СИП осенью 2003-2004 гг.

Водоемы	Cladocera		Copepoda		Ostracoda		Всего	
	Ч	Б	Ч	Б	Ч	Б	Ч	Б
I	1.3-1.9 1.64	3.7-5.1 4.44	0.11-0.1 0.11	0.7-1.0 0.85	0.005-0.02 0.012	0.06-0.23 0.14	1.5-2.04 1.76	4.7-6.2 5.43
II	0.3-1.1 0.71	3.3-7.05 5.18	0.2-0.23 0.20	1.3-2.3 1.81	0.03-0.04 0.035	0.34-0.64 0.49	0.6-1.33 0.94	6.2-1.3 7.48
III	0.57	2.88	73.01	1595.89	0.16	1.97	73.74	1600.7
IV	0.6-1.2 0.88	47.1-47.2 47.19	6.4-21.7 14.06	268.4-985.8 627.12	0.02-0.06 0.04	0.13-0.4 0.26	7.1-22.9 14.98	316.0- 1033.1 674.57
V	0.35	30.57	0.07	4.65	0.10	2.56	0.52	37.78
VI	0.1-0.8 0.33	1.7-38.9 19.69	0.07-0.9 0.40	0.8-50.8 15.01	0.04-0.5 0.19	0.77-9.2 3.97	0.2-2.2 0.93	3.3-99.0 38.68
VII	0-8.6 4.305	0-168.8 84.40	0-5.2 2.61	0-306.6 153.33	0.03-6.8 3.42	0.5-113.3 56.91	0.03-20.6 10.33	0.5-588.8 294.64
VIII	0.03-0.1 0.04	0.25-2.02 0.76	0.02-0.1 0.50	0.04-1.97 0.71	0.01-0.07 0.032	0.4-1.15 0.53	0.02-0.2 0.12	0.25-4.7 2.02
IX	0.05	1.10	0.12	0.89	0.02	0.37	0.19	2.36

Примечание: I- р. Шаган, верховье, 2003г.; II- р. Шаган, верховье, 2004г.; III- в-ще Шаган, 2003г.; IV- Атомное озеро, 2003 г.; V- водоток Д-2, 2003 г.; VI- водоемы площадки Д-3, 2003г.; VII- водоемы площадки Д-3, 2004г.; VIII- р. Узунбулак, 2003г.; IX- р. Узунбулак, 2004г.; (числитель – колебания численности и биомассы, знаменатель – средние значения)

Таблица 4. Информационные показатели сообщества ракообразных водоемов зоны влияния СИП, октябрь 2003 – 2004 гг.

Водоемы	Число видов, n	Индекс Маргалефа d'	Нч, бит/особь	Нб, бит/мг	Вх/Вф	Индекс Пантле-Букка, S
Верховье р. Шаган, 2003 г.						
плес	9	1.09	1.26	2.23	0.177	1.77
заводь	11	1.31	0.95	1.96	0.132	1.37
среднее		1.20	1.11	2.09	0.151	1.57
Верховье р. Шаган, 2004 г.						
плес	10	1.42	2.89	3.31	0.568	1.43
заводь	13	1.67	2.51	2.97	0.178	1.36
среднее		1.55	2.70	3.14	0.373	1.39
В-ще Шаган	4	0.18	0.03	0.02	0.00012	
Атомное озеро						
ст.1	9	0.79	0.50	0.24	0.007	1.53
ст.2	5	0.45	1.22	1.07	0.005	
среднее		0.62	0.86	0.65	0.006	
Водоток Д-2	8	1.12	2.22	2.12	0.140	1.87
Водотоки площадки Д-3, 2003						
ст.1	15	1.96	2.98	2.30	0.751	1.64
ст.2	10	1.35	3.01	1.84	0.063	1.92
ст.3	13	1.56	2.73	2.64	0.921	1.71
ст.4	11	1.79	3.39	2.39	0.599	1.57
ст.5	6	0.93	2.49	2.17	0.275	1.65
среднее		1.52	2.92	2.27	0.522	1.70
Водоток пло- щадки Д-3, 2004	8	0.73	1.94	1.96	1.086	1.72
Р. Узунбулак, основное русло, 2003						
ст.1	1	0.33				
ст.2	1	0.29				
ст.3	5	0.74	2.02	1.92	0.673	1.55
Р. Узунбулак, приток, 2003						
ст. 1	8	1.29	2.56	2.44	0.44	1.71
ст. 2	2	0.22	0.76	0.20	0.033	1.85
среднее для Узунбулака		0.57	1.78	1.52	0.382	1.71
Узунбулак, осн. русло, 2004	7	1.14	2.28	2.60	0.557	1.51

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В мезопланктоне водоемов зоны СИП по результатам двух съемок в осенний период выявлено 48 таксонов низших ракообразных: ветвистоусых (Cladocera) – 28 видов, веслоногих (Copepoda) – 18, ракушковых (Ostracoda) – 2. Распределение видов по годам исследований неравномерное: в 2003 г – 42 вида, в 2004 г. – 23 вида. По видовому разнообразию преобладали веслоногие ракообразные из семейства Cyclopidae – 28.5% от общего числа видов. Высокую представленность имели также ветвистоусые рачки из семейств Chydoridae – 23.8% и Daphniidae – 21.4%.

Распределение видового состава по исследованным участкам неравномерное. Повсеместно встречались ракушковые рачки – 100% встречаемости. Высокую частоту встречаемости (50%) имели семь видов ракообразных – D. pulex, Moina sp., C. sphaericus sphaericus, E. phaleratus, E. serrulatus, M. viridis, A. dengisicus. Встречаемость большинства видов была низкой – 17-33%.

Наибольшее видовое разнообразие выявлено в водотоках площадки Д-3 (27 видов) и в верховье р. Шаган (24 вида). Наиболее низким было видовое разнообразие в водохранилище Шаган. В результате увеличения уровня минерализации в течение 10 лет с 15 до 67 г/л число видов в водохранилище сократилось вчетверо, с 16 до 4 таксонов.

Численность и биомасса ракообразных вариировали по участкам в широких пределах – от 0.12 до 73.74 тыс. экз./м^3 и от 2.02 мг/м^3 до 1.6 г/м^3. Максимум количественного развития сообщества, как и во все годы наших исследований, начиная с 1993 г., наблюдался в водохранилище Шаган. Однако, при переходе в категорию гипергалинных водоемов показатели биомассы здесь понизились в 6-7 раз по сравнению с 1993 и 1995 годами. Минимальные показатели численности и биомассы отмечались в оба года исследований в р. Узунбулак: 0.12-0.19 тыс. экз./м^3 и 2.02-2.36 мг/м^3. По сравнению с 1993 г. (1.9 тыс. экз./м^3 и 74.05 мг/м^3) показатели развития в этом водотоке снизились на порядок величин.

На всех исследованных участках наблюдалось изменение структуры фаунистических комплексов и доминирующих видов по годам, обусловленное разницей в составе ракообразных и подвижками в количественном развитии отдельных видов. Так, в верховье р. Шаган в 2002 г. доминировал комплекс "D. longispina" с высокими показателями индекса значимости (от 108.6 до 877.03 на отдельных станциях). В 2003 и 2004 гг. здесь развивались комплексы "A. nana", "A. dengisicus", "A. harpae – B. affinis" с низкими показателями индексов значимости доминантов – 13.6 – 18.9. В водохранилище Шаган, где на протяжении 10 лет наблюдений развивался комплекс "M. mongolica – A. salinus", в 2003 г.

доминировал комплекс "C. retrogressus" с высоким значением индекса значимости – 399.46. Прежний доминант A. salinus после 2002 г. выпал из состава фауны в связи с резким повышения уровня солености в течение года с 41.04 до 67.11 г/л. В Атомном озере комплекс "A. salinus" сохранил руководящее положение, так как соленость этого водоема в 2002-2003 г. оставалась стабильной (12-13 г/л), но, по сравнению с 2002 г. индекс значимости доминанта снизился почти в три раза с 673.4 до 242.36.

Анализ многолетнего массива данных (1993-2004 гг.) показывает, что в девяностые годы фауна водотоков горного массива Дегелен имела большее сходство с фауной бассейна р. Шаган, в обоих участках доминировал комплекс "A. salinus" с разными значениями индекса плотности доминирующего вида. В настоящее время в водотоках Дегелена при более или менее постоянном наборе доминирующих видов развиваются отличающиеся по названиям фаунистические комплексы, что обусловлено меняющимися соотношениями в количественном развитии отдельных видов. Так, в р. Узунбулак в 2003 г. развивался комплекс "D. bicuspidatus", в 2004 г. – "C. sphaericus – A. dengizicus" и "Ostracoda", на площадке Д-2 в 2003 г. преобладал комплекс "M. viridis – E. serrulatus", в 2004 г. - "M. viridis". Индексы значимости лидирующих видов в связи с особенностями количественного развития изменялись в р. Узунбулак от 4.3 до 11.5, в водотоке Д-2 возрастали до 55.3, на площадке Д-3 колебались по годам от 20.05 до 167.6.

По величинам индексов видового разнообразия наиболее высокая устойчивость сообщества в 2003-2004 гг. наблюдалась в водотоках площадки Д-3, а также сохранялась в верховье р. Шаган, где индексы Маргалефа и Шеннона были сходны с показателями предыдущих лет. В водотоке площадки Д-2 показатели улучшились по сравнению с 2002 г., в р. Узунбулак также отмечено возрастание индексов разнообразия вдвое по сравнению с 2001-2002 гг.,но их величины все еще характерны для водоемов с низким уровнем стабильности. В водохранилище Шаган и Атомном озере сложились специфичные сообщества, характеризующиеся низкими показателями индексов видового разнообразия (меньше единицы), свойственными водоемам с экстремальной экологической ситуацией.

Трофическая структура была благоприятной во всех исследованных водоемах, мирные формы преобладали над хищниками. Степень органического загрязнения на станциях, определенная по индексу Пантле-Букка, оставалась на уровне значений прошлых лет для осеннего зоопланктона – 1.37-1.92. Наиболее слабый уровень загрязнения (олиго-бета-мезосапробный) был выявлен в верховье р. Шаган (среднее значение 1.57). Всем остальным водотокам был свойственен бета-мезосапробный уровень загрязнения (1.69-1.87). Уровень сапробности воды в водохранилище Шаган и Атомном озере остается невыясненным, так как развивающиеся в них в массовых количествах галофильные ракообразные не указаны в шкале видов – индикаторов сапробности.

Выводы

1. В составе сообщества низших ракообразных водоемов территории СИП в осенние сезоны 2003-2004 гг. выявлено 48 таксонов, из них ветвистоусых рачков (Cladocera) – 28, веслоногих (Copepoda) – 18, ракушковых (Ostracoda) – 2. Впервые для территории полигона указываются 7 видов: D. lacustris, D. curvirostris, S. vetuloides, M. aurita, S. kingi, C. sphaericus alexandrovi, P. similis. По сравнению с 1993, 1995 гг. видовой состав сообщества существенно изменился, сходство с прежней фауной составляет 36.6%.
2. Наибольшее видовое разнообразие зарегистрировано в водотоках площадки Д-3 горного массива Дегелен – 27 видов и в верховье р. Шаган – 24 вида. Наименьшее количество видов (4) отмечено в водохранилище Шаган.
3. Численность ракообразных по исследованным участкам изменялась от 0.12 до 73.74 тыс. экз./м^3, биомасса вариировала от 2.02 до 1600.74 мг/м^3, максимум отмечен в водохранилище Шаган, минимум – в р. Узунбулак. В р. Шаган и на площадках Д-2 и Д-3 по численности и биомассе преобладали ветвистоусые рачки, в водохранилище Шаган и Атомном озере – веслоногие.
4. В водоемах на территории полигона за два осенних сезона зарегистрировано 11 фаунистических комплексов, в большинстве водоемов они менялись по годам в соответствии с изменениями видовой структуры сообщества и количественного развития отдельных видов.
5. По структурно-информационным показателям состояние сообщества ракообразных характеризуется как благополучное в верховье р. Шаган, водотоках площадок Д-2 и Д-3, уровень устойчивости сообщества понижается в р.Узунбулак, в водохранилище Шаган и Атомном озере стабильность сообщества нарушается.
6. Индикация качества воды по уровню загрязнения водоемов зоны полигона органикой по Пантле-Букку была в пределах 1.37-1.92. Наиболее слабый, олиго- бетамезосапробный уровень загрязнения выявлен в верховье р. Шаган, в остальных водотоках он повышался до умеренного, бетамезосапробного. В соленых водоемах водохранилище Шаган и Атомном озере оценка качества воды не возможна из-за отсутствия в их фауне видов – индикаторов сапробности.

Благодарности. Благодарю сотрудников лаборатории гидробиологии и экотоксикологии Института зоологии МОН РК: Магда И.Н. за проведение отбора проб зоопланктона в водоемах зоны СИП, Акбердину Г.Ж. за предоставленные мне данные по минерализации водоемов.

Литература

1. Винберг, Г. Г. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зоопланктон и его продукция / Г. Г. Винберг, Г. М. Лаврентьева. - Л. : ГосНИОРХ, 1984. – 34 с.
2. Смирнов Н.Н. Chydoridae фауны мира. Фауна СССР. Ракообразные. Т. I, вып. 2 / Н. Н. Смирнов. - Л. : Наука, Ленинград. отд-ние, 1971. – 532 с.
3. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2. Ракообразные / В. Р. Алексеев [и др.] - Санкт-Петербург : ЗИН РАН, 1995. - 632 с.
4. Балушкина Е. В. Зависимость между длиной и массой тела у планктонных ракообразных / Е. В. Балушкина, Г. Г. Винберг // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. - Л. : ЗИН АН СССР, 1979. – С. 58-79.
5. Хеллауэлл Д. М. Сравнительный обзор методов анализа данных в биологическом надзоре / Д. М. Хеллауэлл // Научные основы контроля качества вод по гидробиологическим показателям. - Л. : Гидрометеоиздат, 1977. – С. 109-123.
6. Познанскене Д. А. Таблица для подсчета индекса видового разнообразия Шеннона-Уивера / Д.А. Познанскене, В. Ю. Жилюкас ; АН Лит ССР. – Вильнюс, 1983. – 10 с. - Деп. в ЛитНИИНТИ. 18.03.83. № 1035 Ли-Д83.
7. Андроникова И. Н. Использование структурно-функциональных показателей зоопланктона в системе мониторинга / И. Н. Андроникова // Гидробиологические исследования внутренних вод. - Л. : Наука, Ленингр. отд-ние, 1989. - С. 47-53.
8. Унифицированные методы исследования качества вод. Часть III. Методы биологического анализа вод. - М. : Изд. Управ. делами секретариата СЭВ, 1975. - 176 с.
9. Пидгайко М. Л. Зоопланктон водоемов Европейской части СССР / М. Л. Пидгайко. - М. : Наука, 1984. – 208 с.
10. Стуге Т. С. Об осеннем зоопланктоне водоемов зоны влияния Семипалатинского полигона / Т. С. Стуге // Вестник НЯЦ РК. – 2000. - Вып. 3. - С. 73-77.
11. Стуге Т. С. Особенности состава и структуры сообщества планктонных ракообразных в водоемах зоны влияния Семипалатинского полигона / Т. С. Стуге, С. А. Матмуратов // Сб. работ Министерства экологии и биоресурсов РК. – Алматы, 1997. - С. 97-110.
12. Хусаинова Н. З. Култуки восточного побережья Аральского моря и их жизнь / Н. З. Хусаинова // Вестник АН КазССР. - 1960. - № 6. - С. 34-42.
13. Суханова Е. Р. Moina microphthalma (Cladocera, Daphniidae) в ультрагалинных условиях на Северном Кавказе / Е. Н. Суханова // Зоол. журн. -1971. - Т. 50, вып. 2. – С. 285-287.
14. Боруцкий Е. В. Harpacticoida пресных вод. Фауна СССР. Ракообразные. Т III, вып. 4 / Е. В. Боруцкий. – М. – Л. : Наука, 1952. – 426 с.

2003-2004ЖЖ. МАТЕРИАЛДАР БОЙЫНША СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫ АЙМАҒЫНДАҒЫ МАЙДА ЩАЯНТӘРІЗДІЛЕР ҚАУЫМДАСТЫҚТАРЫНЫҢ ҚҰРАМЫ ЖӘНЕ ДАМУЫ

Стуге Т.С.

ҚР БҒМ Зоология институты, Алматы, Казақстан

Семей сынақ полигоны аймағындағы сулардағы күздік зоопланктон 1993, 1995жж. су деңгейінің төмендеуі және минерализациялық құрамының артуы жағдайы кезеңімен салыстырып зерттелінді. Шаянтәрізділердің түрлік құрамы, фаунистикалық комплексі, қауымдастықтың құрылымдық және сандық сипаттамасы және олардың сулар мен жылдар бойынша өзгерісі сипатталып жазылды. Зоопланктон қауымдастығының жағдайы хабарламалық көрсеткіштері жағынан Шаған өзені жоғарғы бойы мен $Д_2$ және $Д_3$ су алаңдарында қалыпты деп бағаланады. Қалған сулардағы экологиялық жағдай экстремальдылыққа жақындап келеді.

COMPOSITION AND DEVELOPMENT OF THE MICROCRUSTACEAN COMMUNITY IN WATERBODIES OF SEMIPALATINSK TEST RANG ZONE ON DATA 2003-2004

T.S. Stuge

Institute of Zoology, Ministry of Education and Science, Almaty

The autumn zooplankton of some waterbodies of Semipalatinsk test range zone was investigated in conditions of water level fall and water mineralization increase in comparative with 1993, 1995 years. The species composition, faunistic complexes, structural and quantitative characteristics of crustacean community and its changes in different years are described. The state of zooplankton community by number of some information indexes was evaluated as normal in Shagan river and waterbodies of ground D2 and D3/ In the others waterbodies the ecological situation was closed to extreme.

СПИСОК АВТОРОВ

Konishi K., 48
Kotake S., 48
Koyama K., 48
Kubo S., 48
Sato J.I., 48
Айтхожин Э.С., 23
Алейников Ю.В., 43, 71
Антонюк В.И., 16, 28
Бажажин А.Г., 60
Бакланов В.В., 89
Бердалиев Д.Т., 23
Буртебаев Н., 60
Васильев Ю.С., 48
Верещак М.Ф., 28
Вурим А.Д., 48
Гайдайчук В.А., 48
Горлачев И.Д., 16
Дерявко И.И., 89
Ермаков Е.Л., 37
Жолдыбаев А.К., 108
Зарифов Р.А., 60
Исабекова Г.С., 60
Кабайлов А.Н., 104
Кадыржанов К.К., 28
Кадыржанов К.К., 16
Казбекова Б.К., 75
Керимкулов Ж.К., 60
Кимолаев Ж.Б., 43, 71
Кислицин С.Б., 16, 37
Колодешников А.А., 48
Колтыгин О.В., 81
Копничев Ю.Ф., 94
Корахужаев А.А., 60
Кошелов А.М., 60
Кукушкин И.М., 89
Логачев Ю.В., 48, 81
Лотов А.Б., 7
Максимкин О.П., 23
Малышева Е.В., 89
Манакова И.А., 28
Маринин А.С., 48
Мартынов С.Б., 81
Налтаев А., 23
Нуркенов С.А., 16
Оразгулыев Б., 64, 75
Осипов И.С., 23
Павлова Н.Н., 7, 60
Пахниц А.В., 48
Пахниц В.А., 48
Полтавцева В.П., 37
Пономарев В.А., 81
Попов Ю.А., 43, 71
Потребеников Г.К., 7
Прозоров А.А., 71
Рахашев Б.К., 23
Русаков В.С., 16, 28
Сатпаев Н.К., 60
Сейтимбетов А.М., 60
Сергеева Л.С., 28
Соколова И.Н., 94
Стуге Т.С., 113
Сушков В.А., 43, 71
Тажибаева И.Л., 43
Таймуратова Л.У., 64
Такибаев Ж.С., 5, 7
Токтаганов М.О., 71
Шаповалов Г.В., 48
Шестаков В.П., 43

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 А4 (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 к.ф.-м.н. М.К. Мукушева
тел. (095) 745-54-04, (322-51) 2-33-35, E-mail: MUKUSHEVA@NNC.KZ

Технический редактор А.Г. Кислухин
тел. (322-51) 2-33-33, E-mail: KISLUHIN@NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Ленина, 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.

