

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/277952583>

Экспериментальные комплексы исследовательского ядерного реактора ИРТ МИФИ (Experimental installations of nuclear research reactor IRT of MEPhI)

Book · August 2013

CITATIONS

0

READS

2,308

38 authors, including:



[Fridrikh S. Dzheparov](#)

Institute for Theoretical and Experimental Physics

149 PUBLICATIONS 512 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[G. V. Tikhomirov](#)

National Research Nuclear University MEPhI

144 PUBLICATIONS 507 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Nanofluids for nuclear applications [View project](#)



Neutron physics studies of fundamental problems of statistical mechanics [View project](#)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИРТ МИФИ



Москва 2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИРТ МИФИ

Монография

Москва 2013

УДК 621.039
ББК 31.46
Э41

Экспериментальные комплексы исследовательского ядерного реактора ИРТ МИФИ. Монография. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. - 100 с.

Авт.: Ю.Г. Абов, Т.Б. Алеева, Д.Ю. Акимов, В.П. Алферов, А.И. Болотдыня, А.В. Бушуев, А.В. Горбунов, В.И. Графутин, А.Д. Гулько, Ф.С. Джепаров, О.Н. Ермаков, Ю.В. Ефременко, К.Н. Зайцев, В.Н. Зубарев, В.А. Камнев, Е.А. Крамер-Агеев, А.Ф. Кожин, Э.Ф. Крючков, С.П. Кузнецов, В.Н. Кулаков, А.А. Липенгольц, Д.В. Львов, С.М. Ляпунов, О.В. Мищерина, Е.В. Петрова, В.Ф. Петрунин, В.Д. Попов, А.А. Портнов, В.К. Сахаров, В.В. Сосновцев, Ю.В. Стогов, Г.В. Тихомиров, В.С. Трошин, Ю.В. Фунтиков, В.Ф. Хохлов, И.И. Шагурин, И.Н. Шейно, М.В. Щуровская

В данной книге представлены описания экспериментальных комплексов для проведения нейтронно-физических исследований на исследовательском ядерном реакторе ИРТ МИФИ. В основу книги легли материалы научного семинара ИРТ-2013, проведенного 29 января 2013 г. физико-техническим факультетом и сотрудниками Атомного центра НИЯУ МИФИ. Основная задача издания – информировать об экспериментальных возможностях реактора ИРТ МИФИ и способствовать повышению качества подготовки специалистов в области ядерной физики и технологий, развитию у студентов, аспирантов и молодых специалистов практических навыков работы с современным ядерно-физическим оборудованием, обеспечению профессорско-преподавательского состава НИЯУ МИФИ условиями для проведения исследовательских работ, а также привлечения научных центров и предприятий Росатома к участию в совместных исследованиях.

Данное издание может быть использовано в качестве пособия для совершенствования системы подготовки и переподготовки специалистов для ведущих научных центров атомной отрасли России.

Рецензенты: доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН, *Г.В. Данилян*,
доктор физ.-мат. наук *С.В. Степанов*

ISBN 978-5-7262- 1859-5

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2013

Подписано в печать 14.08.2013 . Формат 60х84 1/16.

Уч.-изд. л. 6,25. Печ. л. 6,25. Изд. № 028-2. Заказ № .

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Типография НИЯУ МИФИ. 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Оглавление

Предисловие.....	4
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР	
ИРТ МИФИ	5
1.1 Основные устройства и элементы реактора	5
1.2 Экспериментальные устройства	7
1.3 Программа экспериментальных работ	8
1.4 Основные характеристики	9
1.5 Сравнение ИРТ МИФИ с другими установками	11
ГЛАВА 2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
2.1 Порошковый дифрактометр.....	13
2.2. Времяпролетный спектрометр ОХН	17
2.3. Бета-ЯМР спектрометрия на поляризованных нейтронах	20
2.4. Позитронная аннигиляционная спектроскопия	26
2.5. Эмиссионный двухфазный детектор РЭД-1	28
2.5.1 Принцип работы и описание эмиссионного двухфазного детектора	30
2.5.2. Нейтронный пучок	34
ГЛАВА 3. ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	36
3.1. Измерительный комплекс для исследования функциональных и метрологических характеристик аппаратуры СУЗ	36
3.2. Подкритический стенд ВВЭР	39
3.3. Устройства контроля выгорания топлива исследовательских реакторов	43
3.3.1. Установка контроля выгорания топлива	43
3.3.2. Определение выгорания топлива ИРТ методом повторного облучения отработавших ТВС	45
3.3.3. Определение выгорания топлива по интенсивности гамма-излучения ¹³⁷ Cs методом сканирования отработавших ТВС	47
3.3.4. Определение остаточного содержания делящихся материалов в отработавших ТВС исследовательских и транспортных реакторов	49
3.4. Облучательные устройства с варьируемым спектром нейтронов и гамма-излучения	51
3.5. Инструментальный нейтронно-активационный анализ	55
3.6. Экспериментальный комплекс НЗТ	58
3.7. Количественное определение бора и гадолиния для НЗТ	66
ГЛАВА 4. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ	72
Список использованной литературы	74

Предисловие

Среди научных центров России особое место занимает Атомный центр Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), который создан как учебно-научно-методический комплекс для проведения научных исследований, обучения студентов и переподготовки специалистов для ведущих научных центров. В составе Атомного центра НИЯУ МИФИ действует исследовательский ядерный реактор ИРТ МИФИ. На европейской части России ИРТ МИФИ является единственным функционирующим реактором в составе многопрофильного учебного заведения. При этом следует заметить, что доля университетских реакторов среди исследовательских реакторов в странах Запада превышает 50 %.

Успешная эксплуатация и освоение реактора как мощного источника излучения позволили на базе ИРТ создать университетский центр подготовки высококвалифицированных специалистов для атомной энергетики и экспериментальной физики, успешно развивать исследования по актуальным направлениям науки и техники.

Широкое привлечение студентов, аспирантов и преподавателей к научной работе на реакторе существенно повысило качество подготовки специалистов, способствовало повышению научной и педагогической квалификации преподавателей института, приобретению практических навыков выпускниками МИФИ.

В данной монографии предлагается развернутое описание технических возможностей и доступных на ИРТ МИФИ технологий для проведения учебных и научно-исследовательских работ. В продолжение этой публикации планируется издать описание конкретных учебных и учебно-исследовательских работ, которые могут выполняться на исследовательском реакторе НИЯУ МИФИ.

Авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам НИЯУ МИФИ и коллегам из родственных организаций, без чьей ежедневной помощи невозможно было бы подготовить материал для данной публикации, сотруднику Центра ядерной медицины НИЯУ МИФИ Д.В. Гуссу за содействие в издании монографии, а также Лаборатории экспериментальной ядерной физики за финансовую поддержку, благодаря гранту правительства Российской Федерации в рамках контракта с Министерством образования и науки №11.G34.31.0049 от 19 октября 2011 года.

Глава 1. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР ИРТ МИФИ

Лабораторной базой МИФИ является ИРТ – серийный исследовательский типовой реактор бассейнового типа.

Реактор оснащен современной системой управления и защиты, на практике, продемонстрировавшей высокую надежность и эргономичность. Система радиационного контроля обеспечивает эффективность защитных радиационных барьеров и допустимые уровни дозовых нагрузок персонала и населения. Эксплуатируется круглосуточно циклами до 100 часов в неделю с годовым временем использования до 3000 часов. Реактор находится под контролем государственных органов надзора и МАГАТЭ.

Коллектив ИРТ проводит большую работу по модернизации и реконструкции реактора, совершенствованию его безопасной эксплуатации.

1.1. Основные устройства и элементы реактора

Реактор ИРТ МИФИ (рис.1.1) относится к универсальным исследовательским ядерным реакторам средней мощности [1, 2, 3].

ИРТ является гетерогенным водо-водяным реактором на тепловых нейтронах бассейнового типа со стационарным потоком нейтронов.

В реакторе используются тепловыделяющие сборки (ТВС) ИРТ-3М.

В состав активной зоны реактора входят следующие основные элементы:

- корпус активной зоны реактора;
- тепловыделяющие сборки (ТВС);
- блоки отражателя;
- рабочие органы СУЗ;
- замедлитель и теплоноситель.

Замедлителем и частично отражателем служит химически очищенная вода бассейна реактора, которая одновременно является теплоносителем и биологической защитой.

Технологическая схема охлаждения реактора, по существу, трехконтурная. Нулевой контур охлаждения замкнут в самом бас-

сейне реактора (активная зона – бассейн) за счет применения эжектора. Вода в бассейне находится под гидростатическим давлением. Первый контур служит для охлаждения воды бассейна, а второй – для охлаждения воды первого контура в теплообменных аппаратах. При этом в нормальных условиях эксплуатации давление в первом контуре меньше, чем давление во втором контуре.



Рис. 1.1. Общий вид исследовательского реактора ИРТ МИФИ

Запас реактивности реактора и суммарная эффективность органов компенсации реактивности обеспечивают возможность его эксплуатации без остановки на перегрузку до энерговыработки 140 МВт-сут.

1.2. Экспериментальные устройства

Для вывода пучков реакторного излучения на установки, размещенные в экспериментальном зале реактора, предназначены горизонтальные экспериментальные каналы (ГЭК на рис. 1.2), а также вертикальный канал (ВЭК) для вывода "очень холодных нейтронов". Восемь ГЭК выполнены из трубы 110×5 мм с приваренным доньшком толщиной 6 мм. ГЭК-4 диаметром 150 мм выполнен из трубы 160×5 мм. На базе ГЭК-1 создается специализированный канал для целей нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей. Материалом для труб и доньшек ГЭК и ВЭК служит сплав на основе алюминия.

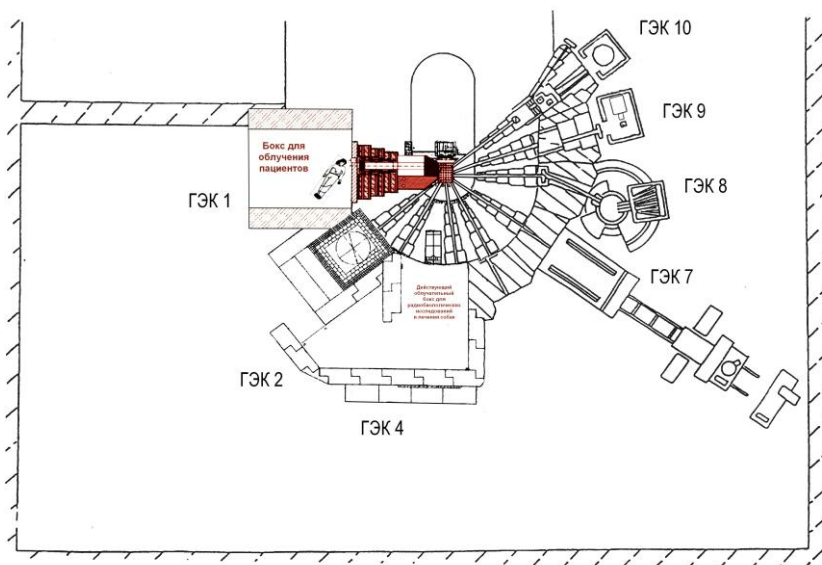


Рис.1.2. Расположение экспериментальных устройств на горизонтальных экспериментальных каналах

1.3. Программа экспериментальных работ

На ИРТ МИФИ проводятся работы по следующим направлениям:

- исследование особенностей структуры ультрадисперсных материалов – нанокристаллов;
- разработка методик определения параметров в легководных решетках с уран-ториевым и уран-гадолиниевым топливом, выявление закономерности изменения функционалов в зависимости от состава исследуемых решеток;
- исследование воздействия реакторного излучения на современную и перспективную полупроводниковую элементную базу с целью разработки методов и средств расчетно-экспериментального моделирования радиационных эффектов в новых изделиях электронной техники;
- исследование дефектов в конденсированных тонких диэлектрических пленках;
- экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия очень холодных нейтронов с крупномасштабными надмолекулярными структурами и скрытыми поверхностями раздела фаз;
- исследование сверхтонких и диполь-дипольных взаимодействий бета-активных ядер в конденсированных средах с помощью бета-ЯМР спектрометра на поляризованных нейтронах;
- исследования свойств конденсированных сред методами позитронной спектроскопии;
- испытания ионизационных камер для систем управления и защиты ядерных реакторов;
- разработка и испытания широкодиапазонных преобразователей сигналов ионизационных камер деления для перспективных систем управления и защиты ядерных реакторов;
- проведение нейтронно-активационного анализа различных образцов и биологических тканей;
- экспериментальное определение выгорания ТВС ИРТ;
- проведение предклинических экспериментов по терапии злокачественных опухолей методом нейтрон-захватной терапии.

1.4. Основные характеристики

Активная зона реактора ИРТ МИФИ имеет следующие типовые нейтронно-физические характеристики.

Время жизни нейтронов оценивается величиной от 30 до 60 мкс.

Температурный коэффициент реактивности в интервале температур от 35 до 45°C $\alpha_T = -(1,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/K$.

Мощностной коэффициент реактивности $\alpha_N = -5,1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф}/\text{МВт}$.

Минимальные критические массы для ТВС ИРТ-3М по расчетным оценкам и экспериментальным результатам составляют:

- для загрузки с боковым бериллиевым отражателем – 1,3 кг U-235 (8 ТВС);

- для загрузки с водяным отражателем – 2,1 кг U-235 (12 ТВС).

Основные параметры ИРТ МИФИ для одной из рабочих загрузок активной зоны приведены в табл. 1.1. На рис.1.3 приведена картограмма загрузки активной зоны ИРТ МИФИ на 01.10.07. Основные характеристики рабочих органов СУЗ приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.1. **Основные параметры исследовательского реактора ИРТ МИФИ**

№	Наименование	Значение
1	Мощность реактора, МВт	2,5
2	Полное число ТВС в реакторе для одной из загрузок, шт.	16
	из них: 8-трубные	6
	6-трубные с каналом СУЗ	10
3	Поверхность теплоотдачи активной зоны, м ²	23,0
4	Масса урана-235 в загрузке, кг	3,0
5	Исполнительные органы СУЗ, шт.:	
	аварийной защиты	3
	компенсирующие	6
	автоматического регулятора	1
6	Максимальная плотность теплового потока, кВт/м ²	280
7	Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны	2,2

№	Наименование	Значение
8	Расход воды 1 контура через теплообменники, т/ч	160
9	Перепад давления на активной зоне, мм вод. ст.	900
10	Средняя скорость теплоносителя в зазорах ТВС, м/с	0,95
11	Температура воды на входе в активную зону, °С, не более	45
12	Максимальная расчетная температура стенки твэла без учета отклонений параметров, определяющих режим, °С	81
13	Расчетная температура начала кипения в наиболее напряженной точке, °С	126
14	Максимальная плотность потока быстрых нейтронов (с $E > 0,8$ МэВ) в активной зоне, нейтр./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$)	$4,510^{13}$
15	Максимальная плотность потока тепловых нейтронов, нейтр./($\text{см}^2 \cdot \text{с}$): в активной зоне в отражателе	$4,5 \cdot 10^{13}$ $6,5 \cdot 10^{13}$

Таблица 1.2. Характеристики рабочих органов СУЗ

Рабочий орган СУЗ	Количество стержней в группе	Эффективность групп, $\beta_{\text{эф}}$	
		не менее	не более
АЗ - 1	1	2,0	-
АЗ - 2	1	2,0	-
АЗ - 3	1	2,0	-
АР	1	-	3,0
КС - 1	2	-	12,0
КС - 2	2	-	12,0
КС - 3	2	-	12,0

1	2	3	4	5	6	7	8
УХН H ₂ O	Be	Be	Be 30×30 H ₂ O	Be/ВЭК 30×30 H ₂ O	Be	Be	РВ/ВЭК H ₂ O d54
Be	Be	ИРТ-3М 185 41,9	ИРТ-3М КС-2 152 14,2	ИРТ-3М 147 19,3	ИРТ-3М АР 154 5,4	Be	Be
Be	Be	ИРТ-3М КС-3 156 4,6	19К КС-3 009.91 48,4	19К А3-2 007.91 53,1	ИРТ-3М 187 38,7	Be H ₂ O d40	Be
Be ВЭК 4	Be	ИРТ-3М 146 16,7	19К А3-3 010.91 43,9	19К А3-1 008.91 44,9	ИРТ-3М КС-1 151 20,6	Be	Be
Be	Be	ИРТ-3М 186 35,8	19К КС-2 005.91 55,2	ИРТ-3М 131 26,3	ИРТ-3М КС-1 153 11,1	Be	H ₂ O d54 ВЭК-25
Al	Al	Al H ₂ O d25	Al “Инди- ...”	Al	Al	Al + Be Be d40	Be

Рис. 1.3. Картограмма активной зоны на 02.10.2007

1.5 Сравнение ИРТ МИФИ с другими установками

Реактор ИРТ МИФИ, построенный по типовому проекту, в настоящее время имеет ряд отличий от аналогичных установок,

которые обусловлены повышением требований к решению вопросов безопасности и выбором конкретных путей их реализации.

Мощность реактора относительно небольшая, и применение ТВС с хорошо развитой поверхностью теплоотвода практически исключает оплавление ТВС при проектных авариях, связанных с потерей теплоносителя. Скорость потери теплоносителя при разрушении горизонтального канала существенным образом уменьшается за счет автоматического закрытия шиберов при появлении сигнала о снижении уровня воды в бассейне реактора, наличия специальных заглушек на выходе горизонтальных каналов, подъемно-опускного участка коллектора спецвентиляции каналов и организации системы сбора и возврата теплоносителя в бассейн реактора.

Использование системы управления и защиты УЗОР на базе каналов “МИРАЖ” обеспечивает надежный контроль и управление реактором в широком диапазоне изменения мощности, в том числе при потере внешнего электроснабжения, за счет малой энергоемкости ($\sim 0,5$ кВт).

Многократное параллельно-перекрестное резервирование логической части системы УЗОР позволяет обеспечить как надежное функционирование системы при единичных отказах, так и удобство эксплуатации и возможность ремонта блоков на работающем реакторе.

Относительно небольшой максимальный запас реактивности ($9\beta_{эф}$), наличие трех групп исполнительных органов аварийной защиты, достаточно большая суммарная эффективность компенсирующих органов ($>17\beta_{эф}$) обеспечивают безопасность при проведении перегрузочных работ и глубокую подкритичность при остановке реактора.

Система теплотехнического контроля обеспечивает не только контроль параметров технологических систем, но и возможность автоматизированной записи и восстановления процесса, в том числе при отклонениях от режимов нормальной эксплуатации.

Наличие в комплексе ИРТ МИФИ станции обработки жидких радиоактивных отходов и системы возврата очищенных стоков в систему 1 контура позволяет вести замкнутый технологический цикл без сброса жидких р/а отходов. При этом обеспечено резервирование необходимого количества воды (около 50 м^3) для проектных аварий с потерей теплоносителя.

Опыт эксплуатации реактора ИРТ МИФИ на мощности до 5 МВт в течение 7500 ч (1983–1985 гг.) подтвердил наличие достаточного запаса по теплосъему, осуществляемому системой охлаждения реактора и непревышение радиационных пределов безопасности.

Глава 2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Порошковый дифрактометр

Порошковый дифрактометр на ГЭК-8 представляет собой модернизированный прибор английской фирмы "Джон Каррен" с суперпозиционной многодетекторной системой регистрации тепловых нейтронов (рис. 2.1) для изучения атомной и магнитной структуры, микронеоднородностей конденсированных сред с различной степенью порядка в кристаллическом, аморфном и ультрадисперсном состояниях [4].

Нейтроны регистрируются шестнадцатью гелиевыми счетчиками, что повышает эффективность на порядок по сравнению с однодетекторным вариантом.

Основные характеристики

Монохроматор	Cu (111), мозаичность $\eta = 20'$
Апертура выходящего пучка, мм	13×73
Расходимость:	
горизонтальная, мин	32
вертикальная, град	3,3
Максимальный размер образца, мм	10×70
Длина волны (постоянная), Å	1,07
Вклад вторых порядков, %	<1,0
Диапазон углов рассеяния, град	-10–135
Детектор	16 гелиевых счетчиков CHM-30
Фон без образца, имп/мин-канал	1
Расстояния:	
центр активной зоны — монохроматор, м	3,15

монохроматор-образец, м	2
образец-детектор, м	1,2
Монитор	СНМ-14
Расходимость коллиматоров, мин·град.:	
первый - многоселевой, соллеровского типа	16·3,3
второй - односелевой	36·3,9
третий - односелевой	15·8,5
Гелиевый криостат	

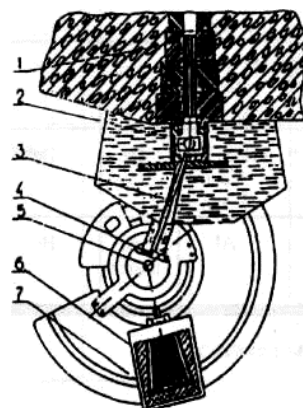


Рис. 2.1. Общий вид и схема дифрактометра с суперпозиционной многодетекторной системой регистрации тепловых нейтронов:
1 – коллиматор в секциях шибера; 2 – кристалл-монохроматор; 3 — второй коллиматор; 4 – мониторный счетчик нейтронов; 5 – исследуемый образец;
6 – блок третьих коллиматоров; 7 – блок нейтронных счетчиков

Достоинства дифракции нейтронов для структурного анализа.

1. Благодаря соизмеримости амплитуд когерентного рассеяния тяжелых и легких атомов можно разделять вклады в интерференционные максимумы от соответствующих атомов. Высокая чув-

ствительность к легким атомам (кислорода) дает возможность локализовать их местоположение, например сверхстехиометрических атомов кислорода в соединениях с атомами урана, а также определять их среднеквадратичные смещения.

2. Отсутствие угловой зависимости (форм-фактора) амплитуды когерентного рассеяния облегчает измерение дифракционных максимумов с большими индексами Миллера, когда их интенсивность спадает с возрастанием угла из-за отсутствия или невысокой степени дальнего порядка.

3. Большая проникающая способность нейтронов позволяет изучать структуру наноматериалов во всем ее объеме. По этой причине, с одной стороны, можно получать данные о структуре материала во всем его объёме, а не только на поверхности (как в случае рентгенографии); с другой стороны, можно исследовать образцы без взаимодействия с окружающей средой – воздухом (например, в герметичных металлических контейнерах из Ti-Zr-сплава с нулевой матрицей рассеяния нейтронов), что удобно методически не только в случае наноматериалов, подверженных окислению, но и в случае радиоактивных материалов.

На установке проведены исследования особенности атомно-кристаллической структуры большого количества твердых тел различного типа (металлов, сплавов и соединений) при малых (< 100 нм) размерах частиц ультрадисперсных (нано-) порошков.

Определены возможные отличия атомного строения наночастиц ультрадисперсных (нано-) материалов от структуры традиционных крупнокристаллических: изменение средних межатомных расстояний (периодов решетки); увеличение среднеквадратичных смещений атомов (динамических и статических); микроискажения, характерные для неоднородной деформации; концентрационная неоднородность распределения атомов примеси по радиусу частицы в твердых растворах; фазовая неоднородность в двух- (много-) фазных частицах; стабилизация высокотемпературных (метастабильных) фаз, разупорядочение (аморфизация) с уменьшением размера. Неоднородность функции атомного распределения по радиусу наночастицы характеризует промежуточный (между аморфным и кристаллическим) характер ее строения.

Неоднородная деформация малых частиц приводит, по существу, к такому распределению атомной плотности (монотонному изменению от центра частицы к поверхности), которое отлично от распределения плотности в кристаллах и аморфных телах (рис. 2.2). По этому признаку Л.Д. Ландау ансамбли из наночастиц можно считать особым промежуточным классом материалов. Если в кристаллах порядок в расположении атомов сохраняется на очень больших ($L > 100 a$) расстояниях, в аморфных материалах – только на нескольких межатомных ($L < 10 a$) расстояниях, то в наноструктурных материалах – на нескольких десятках межатомных расстояний ($10 < L < 100 a$).

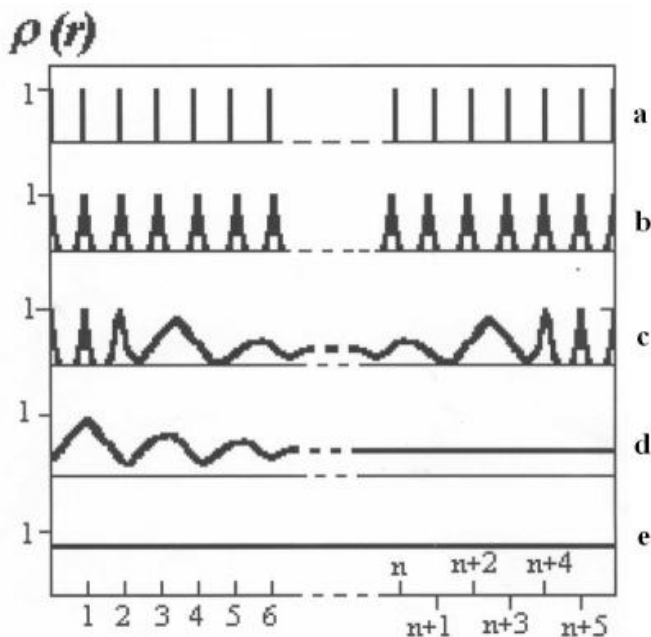


Рис. 2.2. Вид функции атомной плотности $\rho(r)$ в твердых телах с различным совершенством атомной структуры:

a – идеальный кристалл; b – реальный (частично разупорядоченный) поликристалл; c – ультрадисперсный (нано-) материал; d – аморфный (частично упорядоченный) материал; e – идеально аморфное (полностью разупорядоченное) вещество

2.2. Времяпролетный спектрометр ОХН

Времяпролетный спектрометр ОХН на ВЭК предназначен для исследования упорядоченных, квазиупорядоченных и неупорядоченных, магнитных и немагнитных наноструктур конденсированных сред (рис. 2.3 и 2.4).



Рис. 2.3. Общий вид спектрометра ОХН

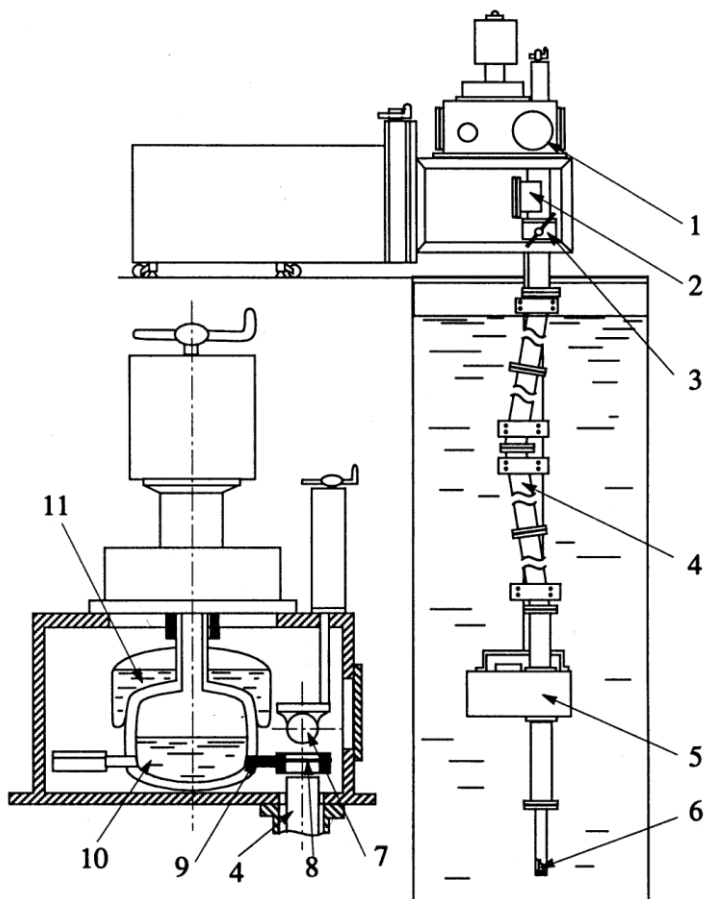


Рис. 2.4. Спектрометр ОХН:

- 1 – камера криостат; 2 – монитор; 3 – шиббер; 4 – нейтроновод; 5 – прерыватель;
 6 – конвертор; 7 – счетчик; 8 – образец; 9 – держатель образца;
 10 – низкотемпературная ванна; 11 – азотная рубашка

Основные характеристики

Диапазон длин волн, нм $4 \div 1,2 \times 10^2$
 Разрешение, % 8
 Плотность потока на выходе нейтроновода,
 нейтр./см²·с 5×10^3

Нейтроновод:

электрополированная труба из нержавеющей стали	
диаметр внутренний, мм	52
длина, м	8

Блок прерывателей потока нейтронов:

основной цилиндрический (ось прерывателя	
перпендикулярна потоку нейтронов):	
диаметр, мм	75
количество щелей	12
ширина щелей, мм	3,5

дополнительный дисковый с окном для	
пропускания потока нейтронов (ось прерывателя	
параллельна потоку нейтронов):	
диаметр, мм	356

Соотношение частот вращения прерывателей

(основной/дополнительный)	3
---------------------------------	---

Пролетная база, м

Частота нейтронных импульсов, Гц	0,89
--	------

Длительность нейтронного импульса, мс

Рабочий счетчик нейтронов пропорциональный	
--	--

диаметр, мм	31
наполнение	$^3\text{He} + 28\% \text{ Ar}$
давление смеси, Торр	220

Число загружаемых образцов

Максимальное расстояние от образца	
до рабочего счетчика, см	14

Конструкция камеры-криостата позволяет проводить измерения с образцами при различных температурах (вплоть до гелиевых), в магнитных полях (до -10^3 Э), размещать в ней контейнеры с жидкими и газообразными образцами. На спектрометре ОХН проводятся исследования наноструктур и динамических особенностей полимерных систем, жидких кристаллов, жидкостей, гидридов металлов, полупроводников, магнетиков, высокотемпературных сверхпроводников, композиционных материалов, стекол и др

При исследовании наноструктур разработанные методики позволяют в немагнитных средах определять размер и концентрацию неоднородностей, их геометрическую форму, ширины переходных слоев от неоднородности к матрице, перепады плотности на границе двух фаз. В случае упорядоченных, квазиупорядоченных сред –

тип сверхрешетки, параметр порядка, степень разупорядоченности, характерные размеры областей когерентности структуры. В магнетиках определяются такие параметры магнитных неоднородностей, как флуктуации магнитной индукции и длины корреляции.

При исследовании надмолекулярной структуры и динамики кристаллизующихся полимеров определены параметры надмолекулярной структуры этих полимеров, изучены особенности неупругого рассеяния нейтронов вблизи точек релаксационных переходов.

2.3. Бета-ЯМР спектроскопия на поляризованных нейтронах

Метод бета-ЯМР (ядерный магнитный резонанс и релаксация поляризации бета-активных ядер) возник вслед за открытием несохранения четности в слабых взаимодействиях. Методика бета-ЯМР – это экспериментальные исследования кинетики релаксации поляризации (продольной относительно направления внешнего магнитного поля) и ядерного магнитного резонанса поляризованных бета-активных ядер (бета-ядер).

Поляризованные бета-активные ядра в среде являются прекрасными зондами локальных полей различной природы, среди источников которых, в первую очередь, следует указать сверхтонкие магнитные и электрические взаимодействия, а также диполь-дипольные взаимодействия. Они несут информацию о строении вещества и о движениях в нем. Возможны исследования во всех типах конденсированных сред: кристаллах, стеклах, жидкостях и т.д.

Основные сведения о строении получаются из спектров бета-ЯМР, а движения проявляются в релаксации ядер, как продольной, так и поперечной относительно внешнего поля. Продольная релаксация наблюдается непосредственно, а поперечная – по формам линии ЯМР и кросс-релаксации. Результаты измерений, проведенных в бета-ЯМР спектроскопии, находят непосредственное применение в квантовохимических расчетах по строению веществ и в современной теории неравновесных процессов. Для структурных исследований и изучения дефектообразования и подвижности дефектов очень важно проводить измерения в широком температурном диапазоне, простирающемся от 4 К до 700 К и более. Метод

позволяет проводить также изучение пространственных и временных корреляций в различных фазовых переходах, в том числе в магнетиках, сегнетоэлектриках и сверхпроводниках.

Метод бета-ЯМР позволяет проводить неразрушающие исследования вещества и процессов в нем на пространственных масштабах от межатомных расстояний до нескольких нанометров. В частотно-временной области метод чувствителен к процессам, протекающим за времена от 10^{-7} с до 1 с и к магнитным и электрическим сверхтонким взаимодействиям с интенсивностью в интервале от 1 до 10^7 Гц. К ярким примерам исследований, проведенным этим методом можно отнести изучение процессов радиационного дефектообразования в литий-, фтор- и серебро-содержащих кристаллах, работы по исследованию ядерной спиновой динамики и исследование переноса ядерной поляризации в статически неупорядоченных средах.

Перечислим основные отличия бета-ЯМР от обычного ЯМР на стабильных ядрах.

1. Поляризация бета-ядер сразу после их образования не зависит от температуры образца и внешнего магнитного поля и при этом может достигать десятка процентов, что на 5-6 порядков превышает равновесную поляризацию при комнатной температуре, определяемую больцмановским фактором.

2. Бета-активные ядра-зонды присутствуют в образце в чрезвычайно малой концентрации (как правило, $<10^{-14}$) и могут рассматриваться как изолированные ядра (спиновая диффузия по ним отсутствует), количество этих бета-ядер определяется потоком поляризованных нейтронов и сечением захвата нейтронов при образовании бета-активных ядер. При этом бета-ядра принимают участие в установлении общего баланса поляризации в образце, что в ряде случаев приводит к нетривиальным временным зависимостям кинетики их деполяризации.

3. В ряде случаев бета-ядра обладают квадрупольным моментом, в то время как их соответствующие стабильные изотопы, используемые в обычном ЯМР, могут его не иметь.

4. В релаксационных бета-ЯМР измерениях нет необходимости использовать радиочастотное поле и можно использовать металлические образцы и контейнеры.

5. Типичные времена жизни бета-ядер, используемые в методе бета-ЯМР, достаточно велики ($T_{1/2} \sim 0,01-100$ с) чтобы не возникало дополнительного уширения линии ЯМР ($\sim \hbar / T_{1/2}$).

6. В процессе образования в (n,γ) -реакции бета-ядра испытывают отдачу, что приводит к возникновению дефектов кристаллической и электронной структуры, влияние которых сказывается на форме ЯМР спектров и кинетике их деполяризации.

7. Для применения метода бета-ЯМР необходим интенсивный поляризованный пучок тепловых нейтронов и наличие достаточно крупных образцов.

К настоящему времени бета-ЯМР уже применялся в исследованиях по следующим проблемам ядерной физики и физики конденсированных сред.

1. Измерение ядерных моментов и спинов.

2. Природа первичных радиационных дефектов в металлах, ионных кристаллах и полупроводниках. Кинетика их образования и отжига.

3. Исследование процессов спин-решеточной релаксации.

4. Кинетика фундаментальных процессов спиновой динамики.

Использовались следующие, получаемые в (n,γ) -реакции, бета-ядра-зонды: ^8Li (время жизни ядра 1,21 с, равно $T_{1/2}/\ln 2$), ^{12}B (29 мс), ^{20}F (16 с), ^{23}Ne (54 с), $^{24\text{m}}\text{Na}$ (29 мс), ^{28}Al (3,2 мин), ^{38}Cl (54 мин), ^{66}Cu (7,4 мин), ^{108}Ag (3,5 мин), ^{110}Ag (35 с), ^{116}In (20 с).

Принципиальная схема метода представлена на рис. 2.5.

Суть метода бета-ЯМР заключается в циклическом создании в исследуемых образцах с помощью реакции захвата тепловых поляризованных нейтронов ансамбля поляризованных бета-активных ядер с последующим наблюдением временной эволюции их поляризации путем измерения угловой (0-180)° асимметрии бета-излучения этих ядер. В частности, бета-ядра ^8Li получают в реакции $^7\text{Li}(\vec{n},\gamma)^8\vec{\text{Li}}$. Угловое распределение β -излучения $w(\vartheta) = 1 + \alpha \cos \vartheta$, где ϑ – угол между импульсом бета-частицы и спином ядра. Асимметрия бета-излучения есть разность числа частиц, вылетающих по и против направления спина, отнесенная к их сумме.

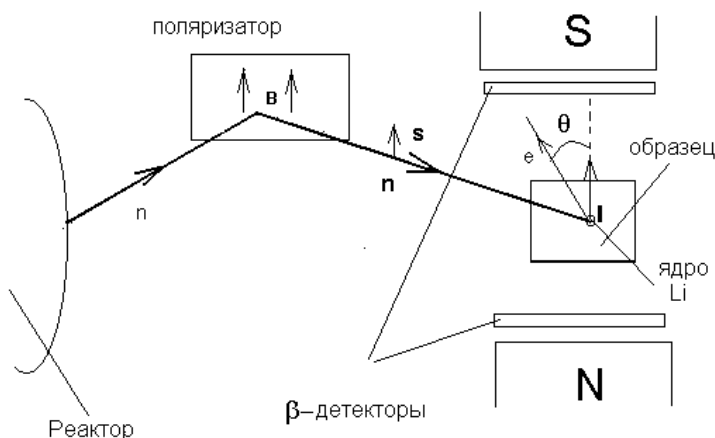


Рис. 2.5. Принципиальная схема метода

Бета-ЯМР спектрометр, установленный на ИРТ МИФИ (рис. 2.6), включает в себя два основных блока – устройство для получения и анализа поляризованного пучка тепловых нейтронов и устройство для измерения поляризации ансамбля бета-ядер (асимметрии электронов распада). В блок для получения поляризованных нейтронов входят: коллиматоры нейтронов; поляризаторы нейтронов; анализатор поляризации нейтронов; прерыватель пучка поляризованных нейтронов; спин-флиппер для переориентации направления поляризации пучка нейтронов, падающих на образец; детектор нейтронов. В измерительный блок асимметрии вылета электронов распада β -ядер входят: электромагнит; сцинтилляционные счетчики-телескопы для регистрации электронов распада, счётная электроника. Работа спектрометра и сбор информации осуществляется под управлением ЭВМ.

Параметры пучка поляризованных тепловых нейтронов – ширина 1,5 см, высота 10 см, плотность потока 8×10^5 нейтр./см²·с, степень поляризации $(92 \pm 2) \%$, эффективность реверса поляризации $(98 \pm 1) \%$.

В последнее время работа направлена на исследование ядерно-физическим методом бета-ЯМР фундаментального процесса переноса возбуждений в пространственно неупорядоченной среде – процесса, широко распространенного в природе, но до настоящего времени не имеющего точного универсального теоретического

описания. Именно с помощью этого метода оказалось возможным создать уникальную пространственно неупорядоченную ядерную систему, в которой перенос возбуждений (спиновых) происходит вследствие чисто диполь-дипольных взаимодействий, а измеряемой величиной, характеризующей этот перенос, является поляризации ядер, входящих в неупорядоченную систему.

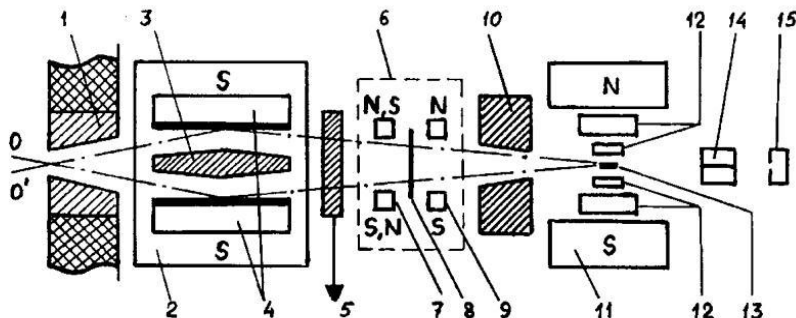


Рис. 2.6. Схема бета-ЯМР спектрометра на поляризованных нейтронах:

1 – коллиматор нейтронов из реактора; 2 – нижний полюс (S) постоянного магнита для поляризующего зеркала; 3 – пластина из немагнитного материала для поглощения прямого пучка из реактора; 4 – поляризатор тепловых нейтронов, состоящий из двух намагниченных кобальтовых зеркал, каждое длиной 200 см и высотой 11 см; их отражающие зеркальные поверхности обращены друг к другу; средний угол отражения 7 мин; поляризованные пучки нейтронов фокусируются на образец; 5 – прерыватель пучка поляризованных нейтронов из вольфрама для импульсного облучения образца; 6 – спин-флиппер для переориентации направления поляризации нейтронов относительно магнитного поля на образце; 7 – поворотный электромагнит, создающий магнитное поле, которое адиабатически поворачивает вектор поляризации пучка нейтронов на $\pm 90^\circ$ от вертикального направления; 8 – токовая «фольга», создающая на своей толщине быстрое «неадиабатическое» изменение направления ведущего магнитного поля на 180° ; 9 – электромагнит для создания горизонтального ведущего магнитного поля, параллельного полю на образце; 10 – коллиматор для формирования пучка на образце и уменьшения фона на бета-счетчиках; 11 – электромагнит с зазором 14 см для создания на образце постоянного внешнего магнитного поля; 12 – два сцинтилляционных счетчика-телескопа для регистрации электронов распада бета-ядер; они располагаются в зазоре электромагнита по обеим сторонам образца и регистрируют бета-электроны, испущенные бета-активными ядрами по и против направления ядерной (нейтронной) поляризации; каждый счётчик-телескоп состоит из толстого (20 мм) и тонкого (1 мм) сцинтилляционных детекторов, включенных на совпадения; 13 – образец, в котором при облучении поляризованными нейтронами образуются поляризованные бета-активные ядра; 14 – анализатор поляризации пучка нейтронов; 15 – счетчик нейтронов для измерения пространственного распределения нейтронного пучка и мониторингирования

Процесс изучается в специально приготовленной пространственно неупорядоченной ядерной подсистеме, состоящей из первоначально поляризованных примесных бета-активных ядер ^8Li с периодом полураспада 0,84 с и стабильных неполяризованных ядер ^6Li , в монокристаллах LiF . Миграция поляризации происходит в системе ядер ^8Li - ^6Li и инициируется магнитными диполь-дипольными взаимодействиями, моделируя процесс случайных блужданий в неупорядоченной среде. В эксперименте измеряется кинетика релаксации поляризации ансамбля поляризованных бета-активных ядер ^8Li , величина которой фиксируется по угловой асимметрии бета-излучения этих ядер. Кинетика процесса деполяризации бета-ядер ^8Li в образцах LiF измеряется в зависимости от величины внешнего магнитного поля при различных изотопических концентрациях изотопа ^6Li . Цель работы – детальная проверка путём сравнения с экспериментом теоретических предсказаний кинетики процесса в неупорядоченной системе, опубликованных в литературе и предсказывающих определённую зависимость процесса как от концентрации изотопа ^6Li , так и от внешнего магнитного поля. Предполагается, что это даст также возможность изучить динамику внутренних локальных магнитных полей в дипольной спиновой системе ядер в LiF .

В ИТЭФ на реакторе ТВР впервые был создан бета-ЯМР спектрометр, включающий в себя возможность проводить физические исследования при низких (до гелиевой) и высоких (до 500 °C) температурах образцов. Впервые (1-й цикл исследований) был получен ряд результатов, касающихся спинов и магнитных моментов некоторых бета-ядер, сверхтонких и диполь-дипольных взаимодействий примесных коротко-живущих бета-активных ядер в кристаллах, многоспиновых и многоквантовых резонансов бета-ядер, процессов образования и отжига радиационных дефектов, миграции спиновых возбуждений в пространственно-неупорядоченной среде.

На установке ИТЭФ в МИФИ завершён 2-й цикл исследования кинетики дипольного переноса возбуждений в неупорядоченных средах на основе измерения деполяризации бета-активных ядер ^8Li в модельной спиновой системе ^8Li - ^6Li в монокристаллах LiF . Измерения проведены в достаточно широком диапазоне концентраций изотопа ^6Li и величин внешнего магнитного поля. Впервые в мире экспериментально получены надёжные количественные результаты

по кинетике делокализации возбуждений при дипольном переносе в неупорядоченных средах в предасимптотической области. Они послужили основой для построения первого эффективного метода численного моделирования кинетики при произвольных временах.

2.4. Позитронная аннигиляционная спектроскопия

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) является современным методом изучения вещества. Ее суть состоит в имплантации в исследуемый образец позитронов, образующихся в результате бета-распада источника (например, ядер изотопа ^{64}Cu , получаемого в ВЭК ИРТ МИФИ), с последующей регистрацией характеристик аннигиляционного гамма-излучения.

Методы ПАС представляют собой информативное средство диагностики электронной и дефектной структуры твердого тела и относятся к числу неразрушающих методов исследования.

В позитронной спектроскопии позитрон выполняет функции зонда, аннигиляционные характеристики которого определяются свойствами окружающей его среды. В веществе процесс аннигиляции позитронов может протекать как в свободных соударениях с электронами среды, так и через образование связанных состояний позитронов с электронами, атомами, молекулами и различными дефектами, при этом каждый канал аннигиляции вносит свой специфический вклад в экспериментальный аннигиляционный спектр.

В настоящее время активно используются три основные разновидности ПАС:

1) регистрация временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ). Она состоит в измерении времени жизни каждого имплантированного в образец позитрона (e^+) (то есть интервала времени между регистрацией стартового гамма-кванта, испускаемого радиоактивным ядром – источником позитрона в момент бета $^+$ -распада, и одного из аннигиляционных фотонов с энергией 511 кэВ);

2) измерение углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ). В этом случае регистрируется отклонение от 180° угла разлета фотонов при 2γ -аннигиляции;

3) измерение доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ). Здесь измеряется отличие в энергии аннигиляционных фотонов (при 2γ -аннигиляции) от 511 кэВ.

Метод ВРАФ дает сведения об электронной плотности в месте аннигиляции позитрона, а методы УРАФ и ДУАЛ дают информацию о распределении импульсов электронов среды. В совокупности применение этих позитронных методик позволяет извлекать уникальную информацию относительно точечных вакансионных дефектов, а также радиационно-индуцированных повреждений размером до одного кубического нанометра. Порог чувствительности ПАС в отношении подобных дефектов составляет примерно 10^{14} дефектов/см³.

Методы позитронной диагностики интенсивно используются при исследовании электронной структуры металлов и сплавов. Это связано с тем, что метод аннигиляции позитронов позволяет определять такие важные характеристики металлов, как распределение электронов по импульсам, энергию уровня Ферми, число свободных электронов, приходящихся на один атом металла, и их концентрацию в зоне проводимости.

Особенности метода ПАС:

- исследование элементарных актов взаимодействия единичных частиц – позитронов и атомов позитрония;
- пренебрежимо малая глубина превращения исходного вещества;
- использование в качестве независимых эталонов времени ядерно-физических констант;
- определение механизма и измерение абсолютных констант скорости быстрых и сверхбыстрых физико-химических процессов;
- типичная независимость методики измерений от агрегатного состояния вещества.
- одновременная регистрация скоррелированных аннигиляционных гамма-квантов позволяет получать информацию о конфигурации объекта, содержащего позитронный источник.

Проведенные исследования способствуют накоплению знаний о радиационных повреждениях в конденсированных средах, развитию теоретических моделей, описывающих свойства и поведение

наноразмерных дефектов, а также процессов образования и эволюции позитронных состояний в исследуемых веществах [7].



Рис. 2.7. Угловой аннигиляционный спектрометр

2.5. Эмиссионный двухфазный детектор РЭД-1

Технология двухфазного эмиссионного детектора – это передовая технология, предложенная впервые в МИФИ, используемая в настоящее время для поиска редких событий в физике элементарных частиц [1]. В коллаборации РЭД (Российский Эмиссионный Детектор), в которую входят НИЯУ МИФИ, ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ КИ, НИЦ «Курчатовский институт», ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ КИ, НИЯФ МГУ и ИЯФ СО РАН развивается проект создания нейтринного детектора нового поколения РЭД-100, использующего эффект когерентного рассеяния нейтрино низких энергий на тяжелых ядрах для эффективной регистрации реакторных электронных антинейтрино [2]. В дальнейшем коллаборацией планируется создание детектора РЭД-3000 с активной массой ~ 3 т для по-

иска темной материи в виде тяжелых слабовазаимодействующих частиц (WIMPs – Weakly Interacting Massive Particles).

Для измерения отклика жидкого ксенона в субкилоэлектрон-вольтном диапазоне энергий ядер отдачи на исследовательском реакторе ИРТ МИФИ на горизонтальном канале ГЭК-10 собрана установка, в которой с помощью эмиссионного двухфазного детектора на жидком ксеноне РЭД-1 будет моделироваться рассеяние электронных антинейтрино от промышленного ядерного реактора с образованием ядер отдачи ксенона с помощью упругого рассеяния квази-монохроматических нейтронов килоэлектронвольтной энергии. Установка включает в себя двухфазный эмиссионный детектор РЭД-1 с защитой и интерференционный Fe-Al фильтр, установленный внутри экспериментального канала ГЭК-10 для получения квази-монохроматического нейтронного пучка с энергией $24 \pm 1,5$ кэВ (рис. 2.8).

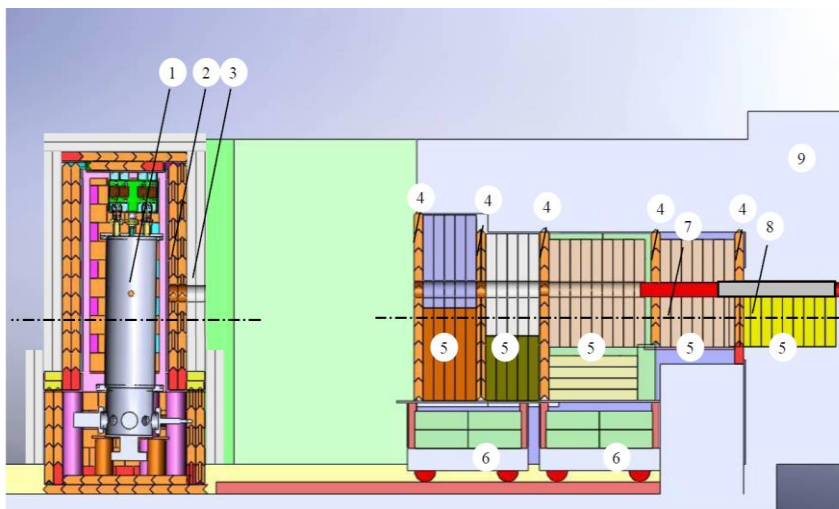


Рис. 2.8. Схематическое изображение экспериментальной установки РЭД-1 на исследовательском реакторе ИРТ МИФИ:

- 1 – 5-килограммовый двухфазный детектор на жидком ксеноне; 2, 3 – защитные слои из 10 см свинца и 10 см борированного полиэтилена соответственно;
- 4 – свинцовые слои толщиной по 5 см каждый; 5 – полиэтиленовые кирпичи,

выполненные из 5 см плит; 6 – парафин; 7, 8 – фильтр, включающий в себя 30 см Fe (7) и 70 см Al (8), установленный внутри горизонтального экспериментального канала ГЭК-10; 9 – бетонная защита реактора

2.5.1. Принцип работы и описание эмиссионного двухфазного детектора

Эмиссионный метод регистрации частиц предложен 40 лет назад [3]. Он сочетает уникальные детектирующие свойства жидкого благородного газа и усилительные свойства газовых детекторов. Ионизация, произведённая частицей в жидкой фазе детектора, регистрируется путём вытягивания электронов в газовую фазу с последующим детектированием произведённых в электрическом поле ультрафиолетовых фотонов электролюминесценции с помощью фотоумножителей. Сцинтилляционные фотоны от точки взаимодействия частицы в жидком ксеноне также регистрируются фотоумножителями. Данный метод чувствителен к предельно малой величине ионизации вплоть до одиночного ионизационного электрона и позволяет при этом иметь рабочую массу детектора до нескольких тонн.

Детектор, который будет использован в эксперименте на исследовательском ядерном реакторе МИФИ, ранее использовался в качестве созданного в ИТЭФ прототипа детектора темной материи ZEPLIN-III [4]. Матрица из семи ФЭУ погружена в жидкий ксенон и просматривает область чувствительности детектора (мишень) снизу вверх через прозрачный сетчатый катод (рис. 2.9).

Структура электродов, окружающих мишень, состоит из катода, промежуточного полезадающего кольца и зеркального анода. Также в непосредственной близости от фотокатодов ФЭУ расположен сетчатый электрод для защиты камер фотокатодов от сильного электрического поля, создаваемого катодом. Этот электрод находится под таким же напряжением, как и фотокатоды. Глубина жидкого ксенона между катодом и поверхностью жидкого ксенона составляет 22 мм, диаметр мишени – 105 мм, величина электролюминесцентного зазора (между поверхностью жидкого ксенона и анодом) составляет 5 мм. Все промежутки между электродами находятся в жидком ксеноне, что минимизирует возможность пробоя между электродами. Проверено, что разность потенциалов

между катодом и анодом может достигать 15 кВ. Высокое напряжение обеспечивается системой электродов высоковольтного ввода компании Ceramaseal. Количество жидкого ксенона в мишени ~0,6 кг, в то время как количество ксенона, необходимое для заполнения камеры, составляет 5 кг.

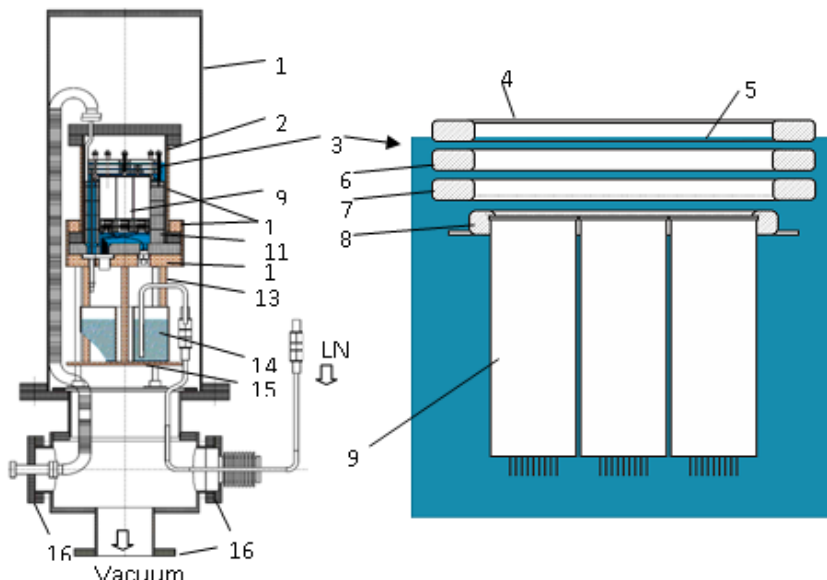


Рис. 2.9. Эмиссионный детектор РЭД-1 для исследования отклика жидкого ксенона в **суб-кэВном** диапазоне энергий ядер отдачи:

1 – вакуумный кожух; 2 – камера детектора; 3 – система электродов; 4 – зеркальный анод; 5 – поверхность жидкого ксенона; 6 – промежуточное полезадающее кольцо; 7, 8 – проволочный катод и экранирующий электрод соответственно (диаметр сетки 0,1 мм, шаг 1 мм); 9 – матрица ФЭУ; 10 – медный теплоуравняющий кожух; 11 – вытеснители жидкого ксенона из нержавеющей стали; 12 – медное основание; 13 – теплопроводящие медные пальцы; 14 – сосуд с жидким азотом; 15 – медное основание емкости с жидким азотом; 16 – вакуумные порты

Для регистрации сцинтилляционного света ксенона с длиной волны 175 нм используются чувствительные к ультрафиолету ФЭУ-181 с окном, выполненным из MgF_2 , произведенные компанией МЭЛЗ (Москва). ФЭУ этого типа имеют мультищелочные

фотокатоды (диаметром 30 мм). Измеренная квантовая эффективность фотокатода на 200 нм составляет 15 %, при этом в пределах 5 % точности сигнала она не меняется при понижении температуры от комнатной до -120 °С. Матрица семи ФЭУ имеет общий делитель, расположенный снаружи камеры.

Возможность регистрации эмиссионным двухфазным детектором предельно малой величины ионизации вплоть до одиночного ионизационного электрона была продемонстрирована в нескольких экспериментах, где такой детектор использовался [5-7].

В детекторе РЭД-1 была продемонстрирована возможность регистрации одиночных электронов, извлеченных из жидкой фазы ксенона в газовую. Выход электронов составил до 17 ± 2 на один электрон ионизации при $U_c = 10$ кВ, $U_a = 1,85$ кВ (рис. 2.10).

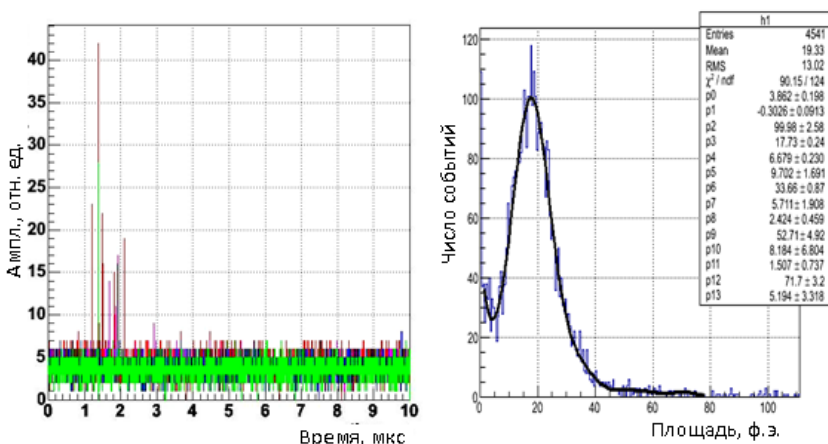


Рис. 2.10. Пример сигнала от одиночного ионизационного электрона (слева) и распределение площади такого сигнала, выраженное в единицах фотоэлектронов (справа)

Величина ионизационного сигнала от ядра отдачи, образованного в процессе упругого рассеяния нейтрона с энергией 24 кэВ на ядре ксенона и имеющего энергию < 0.7 кэВ, будет на уровне одного или нескольких электронов. Измерение ионизационного отклика жидкого ксенона будет выполнено путем сравнения полученного спектра заряда с ожидаемым, в котором величина электронного выхода будет свободным параметром.

Газовая система установки включает герметичные металлические вентили, манометры и вакуумметры, баллоны-хранилища высокого давления, турбомолекулярные и магнитоэрозийные вакуумные насосы, KNF циркуляционный насос, горячий металлический геттер Monotorr, а также контрольную камеру для мониторинга времени жизни свободных электронов в жидком ксеноне.

Сборка детектора и элементов системы очистки ксенона на экспериментальной площадке ГЭК-10 производится с помощью переносной чистой комнаты (рис. 2.11 и 2.12).



Рис. 2.11. Сборка детектора РЭД-1 на экспериментальной площадке ГЭК-10 в переносной чистой комнате

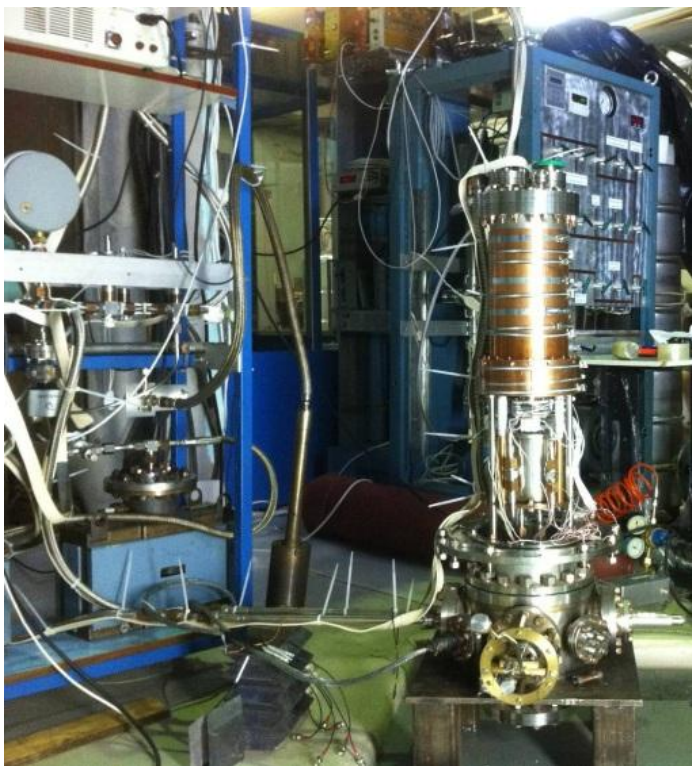


Рис. 2.12. Общий вид детектора без радиационной защиты и вакуумного криостата

2.5.2. Нейтронный пучок

Квазимонохроматический пучок нейтронов с энергией $24 \pm 1,5$ кэВ формируется из нейтронов от реактора с помощью фильтра диаметром 10 см, состоящего из 70 см алюминия и 30 см железа. Железный фильтр изготовлен из конструкционной стали и содержит в максимальном количестве изотоп железа с массовым числом 56, который имеет «провал» в полном сечении при 24 кэВ. Алюминий выбран в качестве дополнительного материала, поскольку он имеет резонансные пики в сечении при энергиях выше 24-кэВ. Спектры нейтронов до и после фильтра, а также сечения поглощения показаны на рис. 2.13.

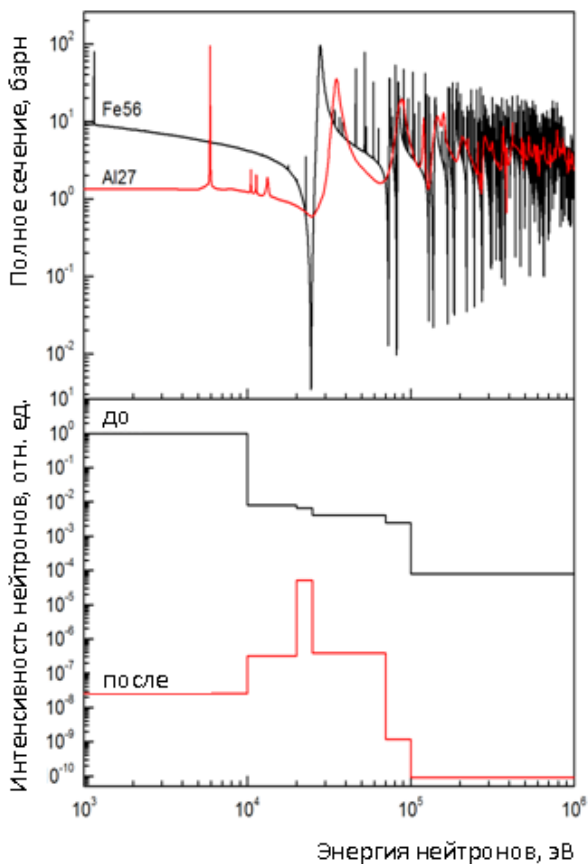


Рис. 2.13. Сечения взаимодействия нейтронов с ^{27}Al и ^{56}Fe (вверху) и полученные с помощью Монте-Карло расчеты спектры нейтронов от реактора до и после прохождения фильтра (внизу)

Фильтрованный нейтронный пучок, формируется комбинацией материалов фильтра и элементами пассивной защиты, как показано на рис. 2.8. Пассивная защита изготовлена из 32 слоев полиэтилена (толщина каждого 5 см), разделяющихся тонкой 1мм кадмиевой фольгой и 5 слоев свинца, толщина каждого из которых составляет 5 см. Вся конструкция (фильтр и защита) установлена внутри бетонной стены реакторной защиты после шибера канала ГЭК-10 реактора.

Достигнутые характеристики детектора, включающие время жизни свободных электронов ~ 10 мкс, позволяют проводить измерения в области энергий ядер отдачи менее 1 кэВ.

ГЛАВА 3. ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Измерительный комплекс для исследования функциональных и метрологических характеристик аппаратуры СУЗ

Разработка, испытания и внедрение аппаратуры "МИРАЖ" и системы УЗОР (рис. 3.1), выполненные на ИРТ МИФИ в 1980–1990 гг., позволили сформировать характеристики реакторной установки, а персоналу реактора накопить опыт, востребованные в последние 20 лет предприятиями, выпускающими аппаратуру контроля нейтронного потока (АКНП) для реакторов различных типов.



Рис. 3.1. Система управления и защиты ИРТ МИФИ (система УЗОР)

Основные характеристики системы УЗОР

Диапазон контроля мощности, Вт	от $6 \cdot 10^{-4}$ до $3,5 \cdot 10^6$ (от $1,2 \cdot 10^{-8}$ до 140 % номинала)
Диапазон работы системы автопуска и регулирования мощности, Вт:	
в режиме пуска	от 0,01 до $2,5 \cdot 10^6$
в режиме стабилизации	от 2 до $2,5 \cdot 10^6$
Линейность характеристики контроля мощности в системе регулирования не хуже, %	1

Цель испытаний устройств и каналов АKNП определяется в каждом конкретном случае местом испытаний в цикле разработки и выпуска изделий:

- исследование характеристик электронных устройств в процессе их разработки;
- определение чувствительности детекторов нейтронов к тепловым нейтронам;
- проведение межоперационного контроля параметров ионизационных камер, подвесок ионизационных камер в процессе их изготовления;
- исследование линейности каналов контроля нейтронного потока с ИК и ПИК разных типов.

В зависимости от цели проводятся лабораторные и/или реакторные испытания. Методика и некоторые результаты лабораторного исследования характеристик импульсных ионизационных камер приведены в [11].

При проведении реакторных испытаний детекторы нейтронов устанавливают в вертикальные экспериментальные каналы ВЭК-9 (180 мм), ВЭК-С (100 мм) и ВЭК-23 (50 мм), обеспечивая требуемые условия облучения с помощью специальных устройств.

Радиационные характеристики ВЭК на номинальной мощности (на уровне центра активной зоны) приведены в табл. 3.1.

Радиационные характеристики ВЭК-С зависят от места установки на отбойной решетке (рис. 3.2).

Таблица 3.1. Радиационные характеристики ВЭК

Радиационные характеристики	ВЭК-9	ВЭК-23
Плотность потока тепловых нейтронов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$8,0 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{11}$
Плотность потока нейтронов с $E > 0,1 \text{ МэВ}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{12}$	
Плотность потока нейтронов с $E > 2 \text{ МэВ}$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{11}$	
Мощность поглощенной дозы γ -излучения, Гр/с	$1,4 \cdot 10^2$	1

Позиция ВЭК-С, $N_{\text{гориз.}}, N_{\text{верт}}$	Средняя плотность потока тепловых нейтронов на 1 кВт мощности реактора, $10^6 \text{ нейтр.}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кВт})$
0	520
1.2	23
1.4	12
1.7	58
2.2	9,3
2.5	3
4.3	1,2
4.4	0,75
5.3	0,58
6.4	0,21

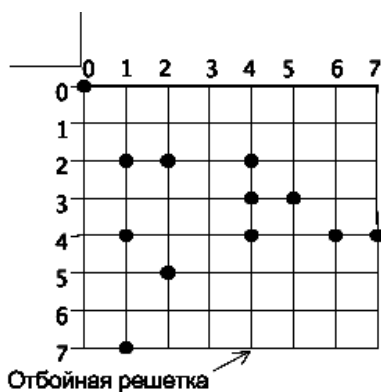


Рис. 3.2. Радиационные характеристики ВЭК-С

Для исследования относительных характеристик и определения абсолютной чувствительности ИКД к тепловым нейтронам на дно ВЭК-9 устанавливается контейнер, изображенный на рис. 3.3. Для исследования относительных характеристик и определения абсолютной чувствительности ИКД диаметром 5 мм к тепловым нейтронам в ВЭК-С погружается установка, изображенная на рис. 3.3. При этом центр чувствительного объема камер оказывается вблизи максимума распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте канала.

Испытываемые устройства могут снабжаться нагревателями, позволяющими исследовать характеристики при температурах до 600 °С.

Для проверки характеристик подвесок ИК после набора флюенса облучение может быть проведено при высокой температуре на мощности реактора до 2,5 МВт.

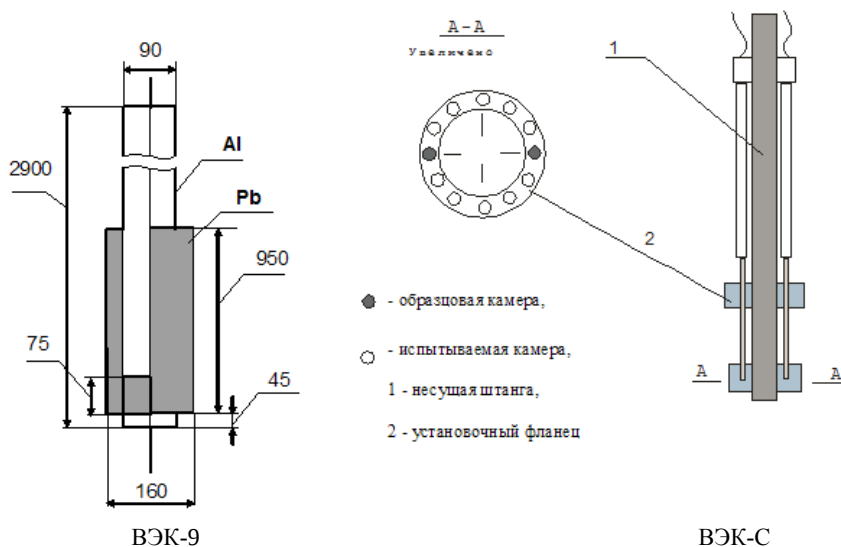


Рис. 3.3. Внутриканные устройства для испытаний ИК и ПИК

Определение радиационных характеристик ВЭК производится периодически по мере изменения загрузки активной зоны. При этом контролируют следующие характеристики:

- положение максимума распределения плотности потока тепловых нейтронов по высоте ВЭК;
- влияние фотонного излучения и эпитепловых нейтронов на ток ИК, помещаемой в ВЭК.

Определение абсолютной чувствительности ИК к тепловым нейтронам осуществляется путем измерения выходного тока ИК и плотности потока нейтронов на поверхности ИК. Плотность потока нейтронов определяется с помощью активационных детекторов,

спектрометрической установки и программы обработки, имеющих соответствующие свидетельства ВНИИФТРИ.

Параметры реактора ИРТ МИФИ, его экспериментальных устройств и СУЗ позволяют проводить испытания АKNП в широком диапазоне изменения нейтронного потока путем размещения детекторов нейтронов испытываемой аппаратуры в разных позициях экспериментальных каналов.

3.2. Подкритический стенд ВВЭР

В области физики и техники реакторов на подкритическом стенде ВВЭР (рис. 3.4а и 3.4б), размещенном на ГЭК-2, проводятся исследования по физике уран-легководных реакторов с целью повышения технико-экономических характеристик ВВЭР [1-8].

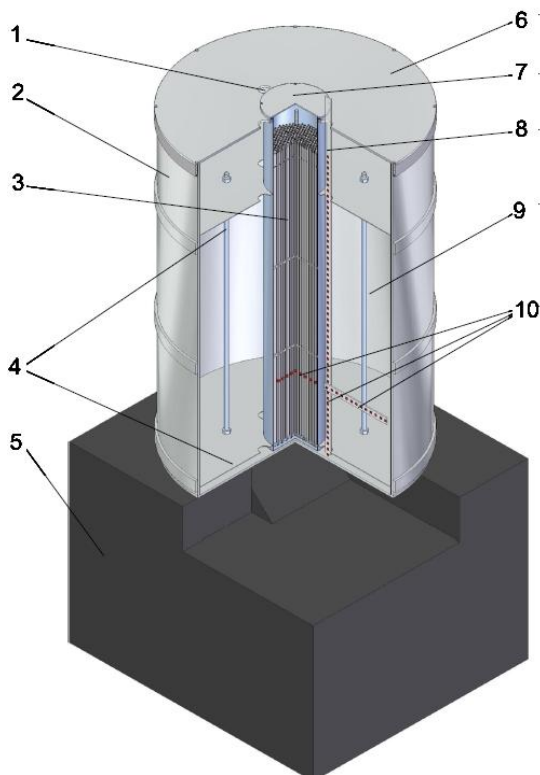


Рис. 3.4а. Подкритический стенд ВВЭР:

1 – отверстие для технологического канала контроля нейтронного потока в отражателе (3 шт.); 2 – внешний бак; 3 – активная зона сборки; 4 – диски центрирующие (2 шт.); 5 – преобразователь пучка нейтронов из ГЭК реактора; 6 – крышка внешнего бака; 7 – крышка внутреннего бака; 8 – оснастка для размещения активационных детекторов в заданных позициях в отражателе; 9 – стержень с резьбой (4 шт.) для крепления дисков центрирующих; 10 – экспериментальные образцы

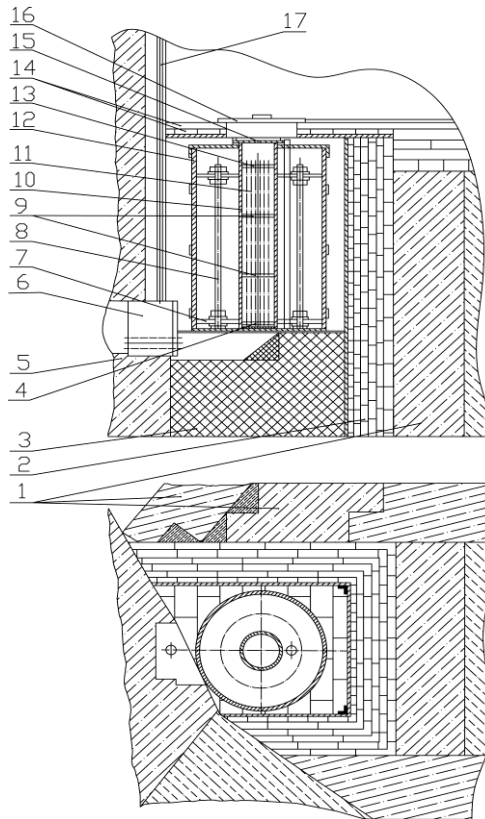


Рис. 3.4б. Схема подкритического стенда ВВЭР:

1 – защитные блоки из бетона; 2 – защитная стенка из свинца и борированного полиэтилена; 3 – преобразователь пучка нейтронов из ГЭК реактора; 4, 9, 13 – дистанционирующие решетки; 5 – защита реактора; 6 – шибер ГЭК; 7 – диск центрирующий; 8 – стержень с резьбой для крепления дисков центрирующих; 10 – внутренний бак; 11 – твэлы экспериментальные;

12 – внешний бак; 14 – блоки свинцовые; 15 – крышка внутреннего бака;
16 – блок защиты съемный (борированный полиэтилен); 17 – привод шибера ГЭК

Установка предназначена для проведения экспериментов по определению реперных параметров решеток с топливом: UO_2 , ThO_2 , $(\text{UO}_2\text{-ThO}_2)$, $(\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3)$, $(\text{UO}_2\text{-Er}_2\text{O}_3)$ при разных водо-топливных отношениях.

Полученные экспериментальные данные используются для обоснования методов нейтронно-физического расчета, ядерных констант и ядерной безопасности действующих и перспективных реакторов.

Основные характеристики установки

Шаг расположения твэлов, мм	12,7
Топливо	UO_2
Обогащение.....	6,5 % по ^{235}U
Диаметр активной зоны, мм	235
Длина твэла по топливу, см	125
Диаметр твэла по топливу, см	0,76
Штатное число твэлов, шт.	253
Вес урана, кг	125
Эфф. коэффициент размножения нейтронов	0,88
	(расчетное значение)
Критическое число твэлов	440
	(эксперим. значение)
Плотность потока тепловых нейтронов на высоте 20 см от нижней опорной плиты, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$7\cdot 10^7$

Для проведения экспериментов с жидким замедлителем удобно использовать вертикальный пучок нейтронов, поэтому было принято решение разработать специальный преобразователь горизонтального пучка нейтронов в вертикальное направление. Созданный преобразователь представляет собой призму из графита с полостью для вывода пучка нейтронов из реактора.

Подкритическая сборка размещена на верхнем торце преобразователя и представляет собой систему из двух коаксиальных баков: внешнего и внутреннего. Сверху внешний и внутренний баки закрыты алюминиевыми крышками. Активная зона подкритиче-

ской сборки размещается внутри малого бака. В качестве замедлителя в сборке используется химически обессоленная вода, которая служит отражателем нейтронов. Диаметр активной зоны подкритической сборки определяется диаметром внутреннего бака. Для удовлетворения требований ядерной безопасности в соответствии с экспериментами и расчетами диаметр внутреннего бака выбран так, чтобы при любых изменениях решетки подкритической сборки для UO_2 -твэлов данного обогащения 6,5 % нельзя достигнуть критического состояния.

3.3. Устройства контроля выгорания топлива исследовательских реакторов

3.3.1. Установка контроля выгорания топлива

Выполненные методические разработки нашли применение для контрольных измерений ТВС исследовательских и других реакторов, использующих высокообогащенное топливо.

Для изготовления ТВС исследовательских реакторов применяют уран высокого обогащения, поэтому данные об остаточном содержании в них делящегося материала представляют особое значение для обеспечения ядерной безопасности и контроля за ядерными материалами. Достигнутая глубина выгорания топлива – один из главных показателей, определяющих экономическую эффективность работы ТВС в реакторе.

Получение экспериментальных данных о выгорании ОТВС может помочь решению нескольких задач:

- повысить точность расчетов, используя результаты экспериментов для их проверки и коррекции;
- получить надежные данные о количестве делящихся материалов в отработавших ТВС;
- осуществлять выходной и входной контроль при перемещениях ОТВС с объекта на объект.

В течение последних лет были выполнены несколько серий экспериментов 3–6 с отработавшими топливными сборками с разной глубиной выгорания. Целью этих экспериментов было создание методик определения выгорания, основанных на пассивных и

активных неразрушающих измерениях с применением гамма-спектрометрической аппаратуры.

Экспериментальная установка для измерений гамма-излучения облученной ТВС состоит из штатного перегрузочного контейнера, системы коллиматоров, устройства вращения ТВС в процессе измерения и измерительной спектрометрической системы (рис. 3.5). Исследуемая ТВС 3 помещается в перегрузочное ведро 9 и через перегрузочный канал 5 устанавливается внутри перегрузочного контейнера 2 на заданной высоте с точностью в 1 мм с помощью лебедки 1, находящейся на верхней плоскости контейнера. Гамма-излучение из ТВС через систему коллиматоров 6 в стенке перегрузочного контейнера и в свинцовой защите детектора 7 попадает на HPGe-детектор 8, расположенный на расстоянии 7 м от контейнера. Чтобы устранить неопределенность азимутального расположения ТВС относительно коллиматора, а также возможное различие в глубине выгорания топлива на разных сторонах отработавших ТВС, ее вращали во время измерения с помощью специального поворотного устройства 4 с дистанционным управлением (рис. 3.6 и 3.7).

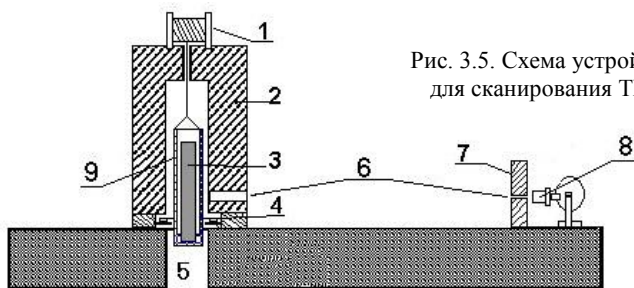


Рис. 3.5. Схема устройства для сканирования ТВС

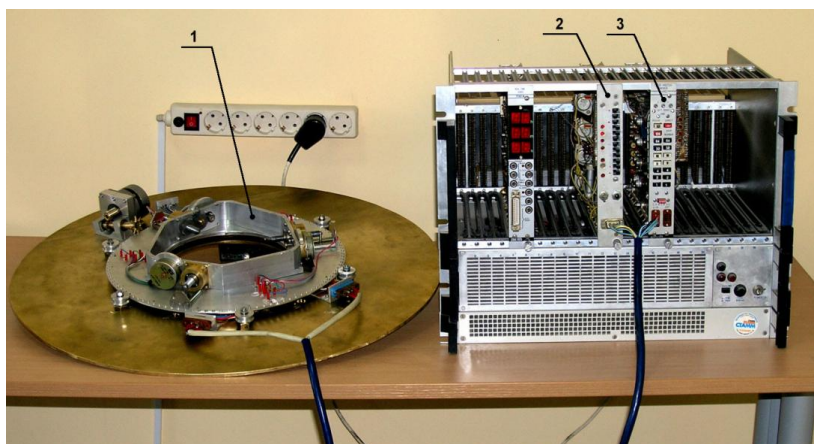


Рис. 3.6. Поворотное устройство для сканирования ТВС:
1 – механизм поворотного устройства; 2 – блок вращения ТВС;
3 – блок управления захватом ТВС

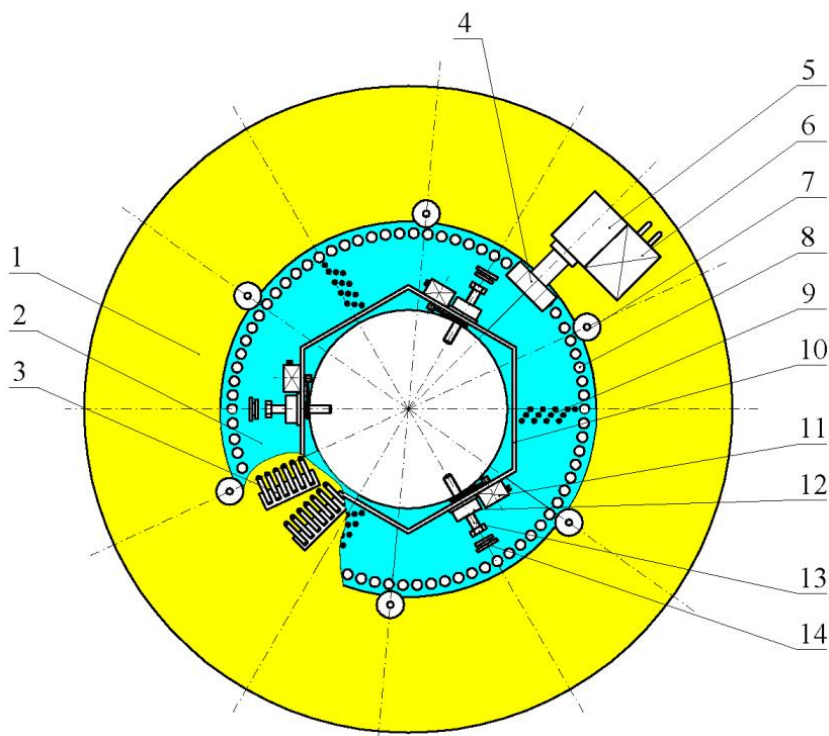


Рис.3.7. Схема поворотного устройства:

1 – основание; 2 – поворотное кольцо; 3 – скользящие контакты; 4 – ведущая шестерня; 5 – редуктор, ведущего шагового двигателя; 6 – ведущий шаговый двигатель; 7 – ролики; 8 – отверстия под ведущую шестерню; 9 – колодки питания шаговых двигателей; 10 – рама для крепления зажимных механизмов устройства захвата; 11 – шаговые двигатели; 12 – редукторы, шаговых двигателей; 13 – зажимные винты; 14 – концевые выключатели

3.3.2. Определение выгорания топлива ИРТ методом повторного облучения отработавших ТВС

Основой данного активного метода определения выгорания отработавших ТВС является их повторное кратковременное облучение нейтронами в активной зоне реактора с последующим измерением излучения продукта деления ^{140}La , интенсивность которого характеризует содержание ^{235}U . Гамма-излучение ^{140}La ($E = 1596$ кэВ) слабо поглощается в материале кассеты. Количество деля-

щихся материалов в отработавшей ТВС определяют путем сравнения результатов измерений ^{140}La в исследуемой и эталонной ТВС. Эталоном может служить аналогичная по конструкции свежая паспортизованная ТВС.

ТВС облучали на краю активной зоны ИРТ в ячейке, удаленной от стержней СУЗ и с трех сторон окруженной бериллиевыми блоками. Облучение каждой ТВС длилось около трех суток. Плотность потока тепловых нейтронов в месте облучения составляла $210^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Для мониторингирования флюенса нейтронов за время облучения в центр ТВС помещали проволоки-мониторы из меди и кобальта.

Измерения распределения выгорания проводились в 17 позициях по высоте ТВС. Продолжительность эксперимента с одной ТВС от загрузки в активную зону для облучения до окончания измерений составляла 7 дней.

Из соотношения интенсивностей излучения ^{140}La в свежей и отработавшей ТВС рассчитывается остаточное содержание массы ^{235}U в отработавшей ТВС. Выгорание находят как разность между начальным (паспортным) содержанием ^{235}U в исследуемой отработавшей ТВС и его остаточным содержанием. Поправки на различие в депрессии потока тепловых нейтронов в свежей и отработавшей ТВС были получены расчетным путем (7).

Распределение линейной плотности ^{235}U в свежей (а) и в трех отработавших ТВС (б), полученные путем измерений излучения ^{140}La , представлены на рис. 3.8.

Следует отметить, что полученные данные характеризуют как среднее выгорание топлива, так и максимальную глубину выгорания в центральной зоне ТВС. Точность результатов определения выгорания при использовании метода повторного облучения со свежей ТВС в роли эталона может достигать $(1,0 \div 1,5)\%$, что намного превосходит возможности других неразрушающих методов. Измеренные с такой точностью ОТВС сами могут служить в качестве эталонов для быстрых относительных измерений выгорания по гамма-излучению ^{137}Cs или по нейтронному излучению. Важным достоинством описанного метода определения выгорания является отсутствие необходимости учета истории облучения отработавшей ТВС.

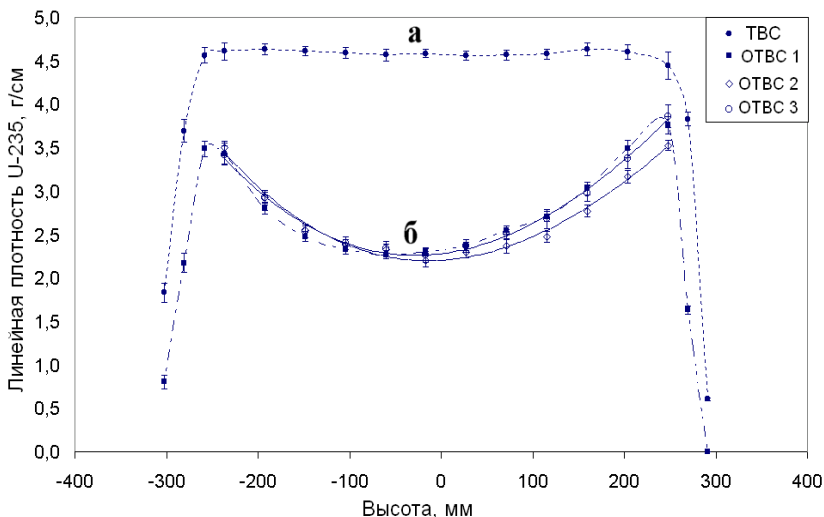


Рис. 3.8. Линейные плотности ^{235}U в исследованных ТВС

3.3.3. Определение выгорания топлива по интенсивности гамма-излучения ^{137}Cs методом сканирования отработавших ТВС

Основой данного пассивного метода определения выгорания отработавших ТВС является определение полной интенсивности гамма-излучения продукта деления ^{137}Cs , полученной в результате сканирования отработавшей ТВС по всей высоте топливного столба в экспериментальном устройстве.

При исследовании отработавших ТВС после их длительной выдержки использовалась установка и схема эксперимента, описанная выше. При измерениях активности цезия было выбрано 26 позиций на высоте топливного столба 58020 мм, что позволяет говорить о достаточно точном представлении распределения, а следовательно, и выгорания по высоте ТВС. Чтобы устранить неопределенность азимутального расположения ТВС относительно коллиматора, а также возможное влияние неравномерности потока нейтронов, падавших на поверхность ТВС с разных направлений, ее вращали во время измерения.

В качестве эталона при определении выгорания исследуемых ТВС использовалась отработавшая ТВС, выгорание которой было определено с высокой точностью в экспериментах с ее повторным облучением в активной зоне реактора ИРТ.

Для восьми исследованных данным методом отработавших ТВС были построены распределения интенсивности излучения ^{137}Cs по высоте топливного столба (рис.3.9).

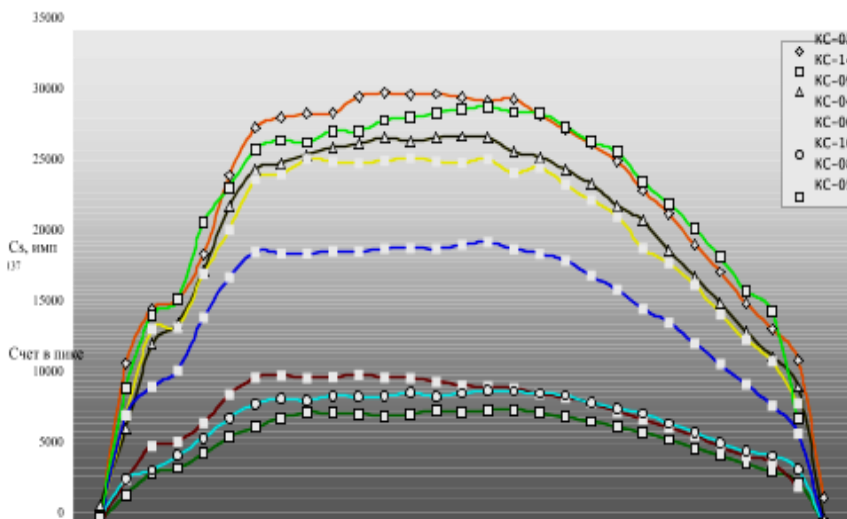


Рис. 3.9. Распределение ^{137}Cs по высоте отработавших ТВС

Для расчета выгорания исследованных ТВС в результаты измерения были внесены следующие расчетные поправки:

- поправка на самопоглощение при прохождении β -излучения слоев твэлов в ТВС;
- поправка на вклад от деления ^{238}U в измеренные активности ^{137}Cs ;
- поправка, учитывающая распад и накопление ^{137}Cs в процессе эксплуатации и последующей выдержки ТВС.

Погрешности определения выгорания по данной методике с учетом погрешности величины выгорания эталонной ТВС составили 4–5 %.

3.3.4. Определение остаточного содержания делящихся материалов в отработавших ТВС исследовательских и транспортных реакторов

В настоящее время ведутся работы по созданию мобильного стенда для определения остаточного содержания делящихся материалов в отработавших ТВС исследовательских и транспортных реакторов.

В основу данного метода определения массы делящихся материалов в отработавших ТВС положены активные нейтронные измерения нейтронов вынужденного деления в отработавшей ТВС, помещенной в поле нейтронов от внешнего радиоизотопного источника.

Для определения массы делящихся материалов в отработавшей ТВС используют график зависимости скорости счета нейтронов вынужденных делений от массы ^{235}U . Градуировочная кривая строится по измерениям с эталонными образцами разной массы, содержащими от 50 г до 300 г ^{235}U .

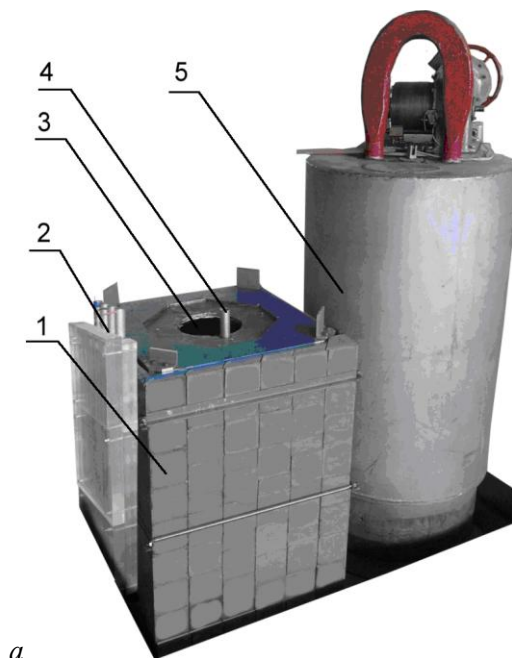
В экспериментах на ИРТ отработавшие ТВС помещали в полость внутри блока замедлителя нейтронов – полиэтилена, окруженного свинцовой защитой. Для облучения отработавших ТВС использовали два AmLi-источника нейтронов суммарной мощностью 10^5 н/с, для измерений – четыре ^3He -счетчика нейтронов.

На рис. 3.10 показан стенд для опытов с отработавшими ТВС на ИРТ и контейнер для перегрузки ТВС.

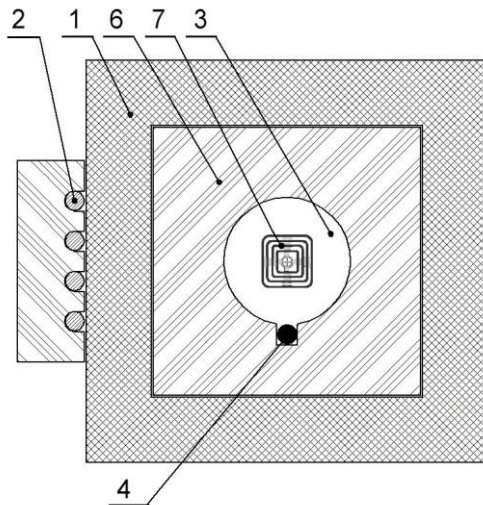
В состав стенда входят:

- призма 3 из полиэтилена размерами 400×400×900 мм с полостью диаметром 190 мм;
- два AmLi-источника нейтронов в алюминиевой трубке на краю полости 4;
- свинцовая защита 1 от гамма-излучения толщиной 100 мм;
- четыре ^3He -счетчика нейтронов в блоке из оргстекла 2;
- каркас из стали и алюминия;
- персональный компьютер с платой анализатора импульсов фирмы CANBERRA и управляющей программой GENIE-2000.

Перемещение отработавших ТВС из хранилища в полость стенда осуществлялась с помощью перегрузочного контейнера 5, устанавливаемого непосредственно на стенд.



a



б

Рис. 3.10. Общий вид (*a*) и схема (*б*) мобильного стенда для определения остаточного содержания делящихся материалов в отработавших ТВС на ИРТ МИФИ

Достоинства разрабатываемой методики:

- для определения содержания ядерных материалов в отработавшей ТВС не требуются данные об истории ее облучения и времени выдержки;

- простая конструкция стенда;

- простота и надежность аппаратуры, применяемой для регистрации нейтронов;

- при анализе малоразмерных ТВС можно сразу получать отклик от всего содержащегося в них делящегося материала, что упрощает и ускоряет процесс измерений.

Результаты, полученные в предварительных опытах, подтверждают возможность определять содержание делящихся материалов в отработавших ТВС исследовательских и транспортных реакторов различных конструкций с использованием предлагаемой схемы измерений. Погрешность определения остаточной массы делящихся материалов не превысит 5% (1σ) при расходе времени 15 мин. на опыты с одной ТВС, не считая времени на доставку ТВС в измерительный стенд.

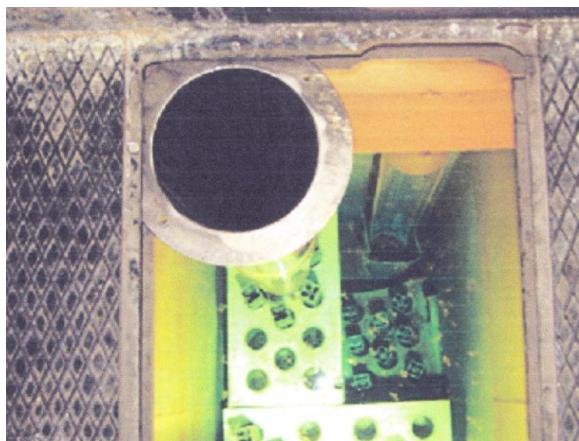
3.4. Облучательные устройства с варьируемым спектром нейтронов и гамма-излучения

Исследования в области радиационной физики полупроводников и диэлектриков направлены на исследование радиационных эффектов в полупроводниках, тонких диэлектрических пленках на их поверхности, а также в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах:

- исследование радиационно-стимулированного старения МОП интегральных микросхем при низкоинтенсивном облучении ионизирующим излучением;

- исследование радиационной стойкости МОП ИМС при низкоинтенсивном облучении.

Работы проводятся в шахте-хранилище ИРТ МИФИ на установленном канале диаметром 219 мм, оборудованном устройством для спуска и подъема образцов, при соответствующем дозиметрическом обеспечении исследований (рис. 3.11).



Высота от дна канала, см	Мощность дозы, Гр/с
0	27,50
20	10,00
40	0,60
60	0,35
80	0,17
100	0,06
110	0,03
120	0,016
130	0,009

Рис. 3.11. Шахта-хранилище

Для проведения исследований изготовлен стенд, структура которого показана на рис. 3.12. Устройство позиционирования и фиксации образцов показано на снимке рис. 3.13. Основным источником гамма-излучения является изотоп Cs^{137} . Мощность дозы зависит от глубины опускания образцов в канал (см. таблицу на рис. 3.11). Процесс позиционирования образцов в канале облучения и их извлечения по достижению требуемой дозы облучения автоматизирован с помощью программно-аппаратного комплекса на базе персонального компьютера, который управляет шаговым двигателем, выполняющим спуск-подъем образцов.

Программа управления устройством позиционирования образцов работает в диалоговом режиме. При работе с программой оператор вводит необходимые входные данные: доза, мощность дозы и номер СОМ-порта. Ввод мощности дозы необходимо для задания глубины опускания облучаемого образца по экспериментальным данным распределения мощности дозы по глубине канала. Выбор номера и скорости СОМ-порта необходим для задания параметров связи компьютера с блоком управления шаговым двигателем, что позволяют компьютеры с различными характеристиками СОМ-порта.

Разработанное устройство было использовано для длительных испытаний МОП интегральных схем с различной степенью инте-

грации при низкоинтенсивном воздействии гамма-излучения [1-8], а также при исследовании эффекта низкой интенсивности в МОП приборах [9-10]. Кроме того, проведены исследования радиационной стойкости термодатчиков для космической техники [11, 12].

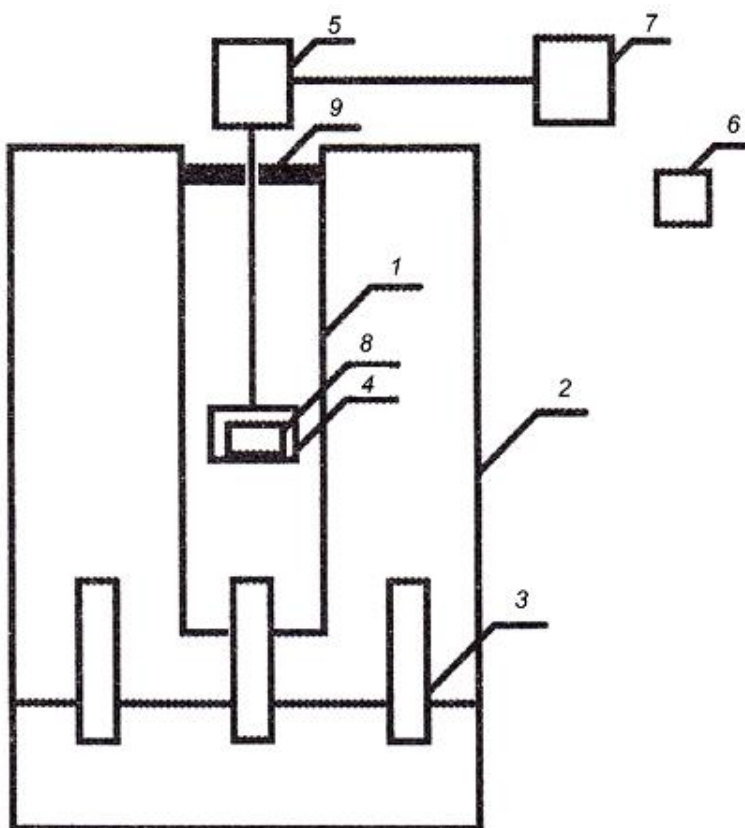
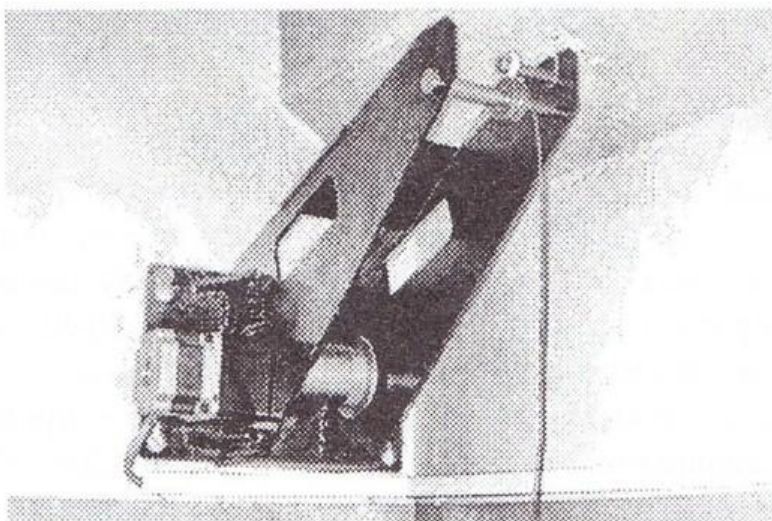
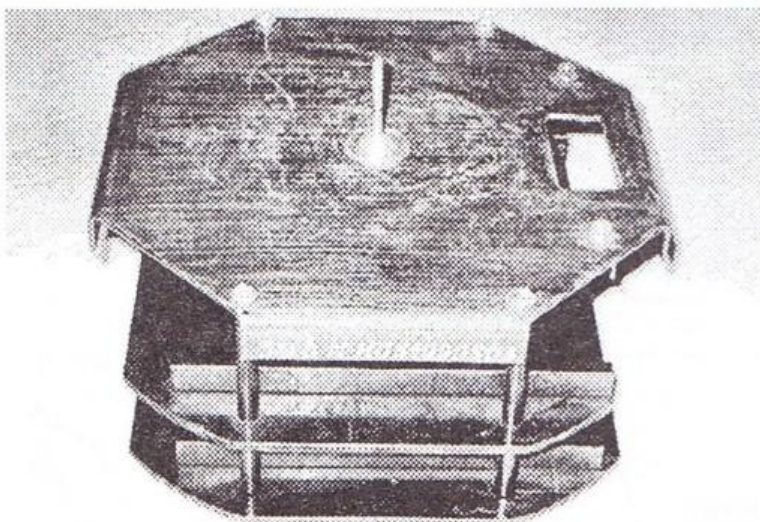


Рис. 3.12. Структура испытательного стенда на базе ИРТ МИФИ:
 1 – канал облучения; 2 – шахта-хранилище отработанного ядерного топлива;
 3 – отработавшие тепловыделяющие сборки – источники ионизирующего
 излучения (всего 6 шт.); 4 – устройство фиксации образцов; 5 – устройство
 позиционирования образцов; 6 – универсальный дозиметр ДКС-101
 с ионизационной камерой БМК-50; 7 – персональный компьютер;
 8 – облучаемый объект; 9 – крышка канала облучения



а



б

Рис. 3.13. Устройство позиционирования (а) и фиксации (б) образцов (шаговый двигатель с редуктором, катушка с тросом)

3.5. Инструментальный нейтронно-активационный анализ

На ИРТ МИФИ развиты работы по нейтронно-активационному анализу, при этом элементный состав технологических, геологических, биологических и других проб изучают как по выходу гамма-излучения, так и по вторичным тяжелым заряженным частицам. В практику элементного анализа вещества введена методика определения малой (вплоть до 10^{-9} г/г) концентрации делящихся материалов при помощи радиометрии запаздывающих нейтронов и осколков деления.

На гамма-спектрометрическом комплексе (рис. 3.14) в спектрометрической лаборатории проводятся метрологические работы по изучению физических параметров и аттестации нейтронно-активационных детекторов; разрабатываются методики измерения характеристик нейтронных полей в облучательных устройствах реактора; проводится оценка и уточнение сечений ядерных реакций с включением в библиотеки.

Для ряда экспериментальных устройств ИРТ проведены полномасштабные измерения спектров реакторных нейтронов и спектральных индексов. Погрешность измерения 4–7 %. В том числе спектр медицинского канала на базе ГЭК-4 для целей нейтрон-захватной терапии.

Предварительные расчеты плотности потока тепловых нейтронов и спектра нейтронов в диапазоне 0,5 эВ – 19 МэВ выполнены по программе MCNP-4a.

Экспериментальные исследования проводились на мощности реактора 2500 кВт набором активационных детекторов (ДНА), включавшем:

- 7 реакций захвата – $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$, $^{45}\text{Sc}(n,\gamma)$, $^{115}\text{In}(n,\gamma)$, $^{197}\text{Au}(n,\gamma)$, $^{139}\text{La}(n,\gamma)$, $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$, $^{23}\text{Na}(n,\gamma)$;
- 5 реакций деления – $^{237}\text{Np}(n,f)$, $^{238}\text{U}(n,f)$, $^{238}\text{Pu}(n,f)$, $^{239}\text{Pu}(n,f)$, $^{241}\text{Am}(n,f)$;
- 8 пороговых реакций – $^{115}\text{In}(n,n')$, $^{111}\text{Cd}(n,n')$, $^{47}\text{Ti}(n,x)$, $^{31}\text{P}(n,p)$, $^{32}\text{S}(n,p)$, $^{204}\text{Pb}(n,n')$, $^{56}\text{Fe}(n,p)$, $^{27}\text{Al}(n,\alpha)$.

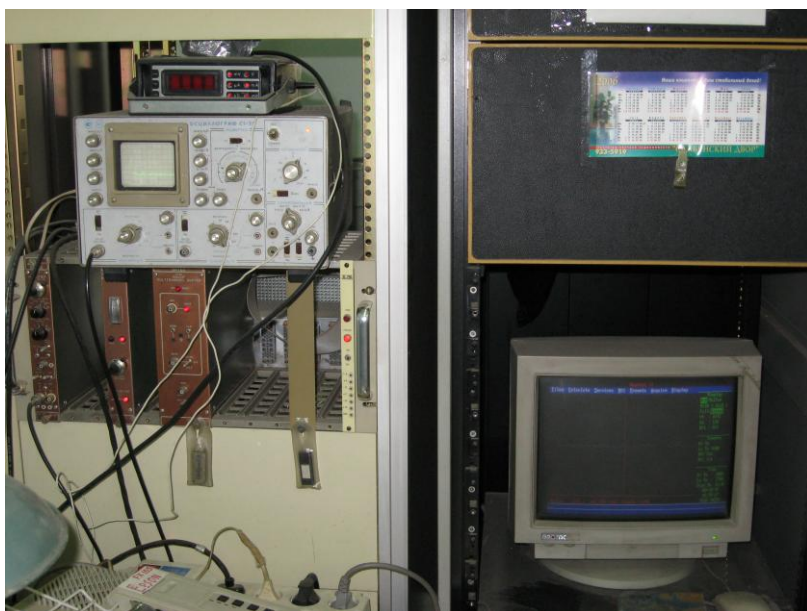


Рис. 3.14. Детектор “ORTEC” GEM 25185

Основные направления по применению нейтронно-активационного анализа в технологической цепи ИРТ МИФИ:

- измерение плотности потоков тепловых и быстрых нейтронов в экспериментальных каналах;
- измерение концентрации радионуклидов в теплоносителе 1 контура;
- измерение концентрации радионуклидов (в т.ч. I^{131}) в вентвыбросе и воздухе;
- измерение концентрации радиоактивных аэрозолей в вентвыбросе;
- измерение радионуклидного состава аэрозолей на фильтрах Петрянова;
- измерение радионуклидного состава и удельной активности радиоактивных отходов;
- анализ проб грунта для контроля отсутствия протечек радиоактивных стоков;
- измерения детекторов сопровождения при испытаниях подвесок ионизационных камер.

Основные направления по применению нейтронно-активационного анализа в геологических и эколого-медицинских исследованиях:

- аналитическое обеспечение программы «Мировой океан», анализ донных отложений и морской биоты;
- высокоточный анализ сверхнизких концентраций Ig в горных породах для идентификации космического воздействия;
- анализ буровых колонок юрских глин на содержание As и других токсичных элементов;
- анализ образцов природных сред и растительности на содержание тяжелых и токсичных металлов при проведении эколого-геохимических исследований;
- анализ твердых биологических материалов на содержание тяжелых и токсичных металлов при проведении медико-биологических исследований.

3.6. Экспериментальный комплекс НЗТ

К современным и наиболее перспективным направлениям лучевой терапии злокачественных опухолей относится технология нейтрон-захватной терапии (НЗТ), разрабатываемая для избирательного воздействия излучения на опухолевые клетки и являющаяся по своей сути методом внутриклеточной терапии.

НЗТ является бинарной технологией, использующей тропные к опухолям препараты, содержащие нуклиды (^{10}B или ^{157}Gd), которые, поглощая нейтроны, образуют вторичное излучение, губительное для опухолевых клеток.

Бор-10 и гадолиний, входящие в состав специальных препаратов, используемых в технологии НЗТ, при облучении тепловыми нейтронами создают в опухоли короткопробежное вторичное излучение, которое и поражает раковые клетки, находящиеся вблизи этих атомов.

В идеальном для технологии НЗТ случае, когда атомы нейтрон-захватных агентов входят в раковую клетку, образующиеся в результате захвата теплового нейтрона высокоэнергетические заряженные частицы поражают только эти клетки, не оказывая существенного воздействия на прилегающие нормальные клетки.

Таким образом, в отличие от других методов лучевой терапии, требующих специальных методов фокусировки пучка, наведение на биологическую мишень выполняется, прежде всего, избирательной концентрацией препаратов в опухоли, а не нацеливанием пучка.

Основное применение НЗТ находит для лечения неоперабельных и радиорезистентных злокачественных новообразований. Следует отметить, что НЗТ используется в случаях, когда другие методы лечения оказываются бессильными.

Пучок нейтронов должен быть максимально очищен от сопутствующего фотонного излучения и быстрых нейтронов с энергией $E > 10$ кэВ, чтобы максимальная суммарная доза, создаваемая этим излучением в опухоли за все время облучения не превосходила 9–12 Гр.

Для улучшения характеристик пучка проведена реконструкция внутриканальных устройств ГЭК-4 с целью получения характеристик пучка нейтронов, наиболее подходящих для метода НЗТ. Проведены расчеты и экспериментальные исследования по оптимиза-

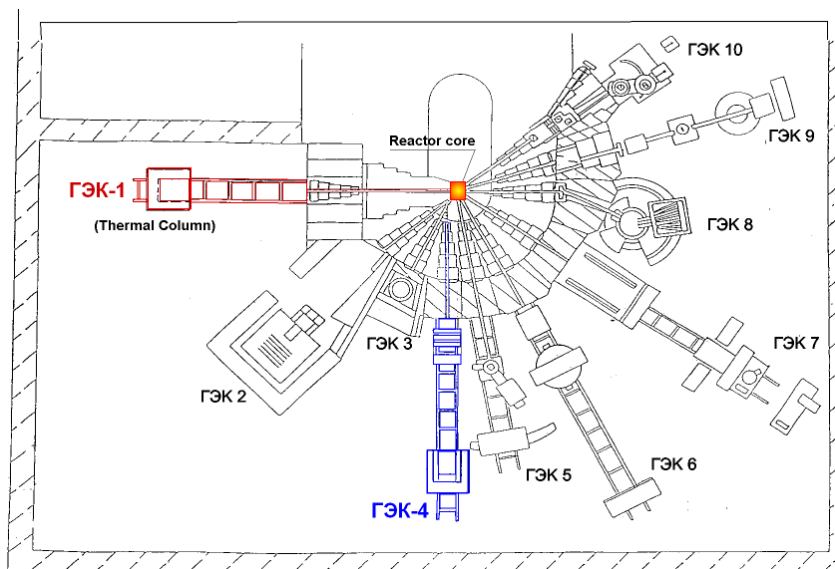
ции внутриканальных устройств — рассеивателей, коллиматоров, фильтров, диафрагм и др. и их влиянию на формирование поля излучения на выходе канала в целях достижения его оптимальных характеристик. Для увеличения интенсивности тепловых нейтронов, смягчения нейтронного спектра, уменьшения доли γ -квантов и быстрых нейтронов по отношению к плотности потока тепловых нейтронов в касательном канале напротив активной зоны установлен графитовый рассеиватель. Нейтронный пучок выводится в бокс для облучения экспериментальных животных (мыши, крысы, собаки и др.). Разработана система дозиметрического сопровождения экспериментальных исследований, включающих метод прямой биологической дозиметрии с помощью культур опухолевых клеток.

На выходе пучка создан облучательный бокс (рис. 3.15) с соответствующим оборудованием для работы с животными (рис. 3.16 и 3.17). Таким образом, создана первая в России полноценная испытательная база для НЗТ [17,18].

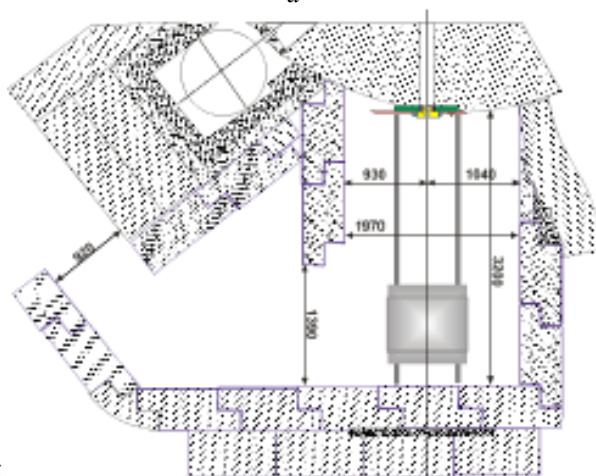
Облучательный бокс оборудован системой биологической защиты, подвижной платформой для транспортировки экспериментальных животных внутри бокса, устройством юстировки облучаемого объекта относительно пучка с помощью оптического лазера, комплексной системой жизнеобеспечения и видеонаблюдения за животными в процессе сеанса НЗТ. Внутренний размер бокса позволяет проводить экспериментальные исследования на крупных лабораторных животных. Процесс облучения сопровождается непрерывными дозиметрическими измерениями, телеметрической связью с объектом облучения и визуальным контролем основных параметров жизнедеятельности экспериментальных животных. Размер бокса соответствует условиям беспрепятственной работы в нем персонала по установке облучаемого объекта и расположения систем жизнеобеспечения и телеметрии. Радиационная защита облучательного бокса соответствует нормам радиационной безопасности для персонала. Для обеспечения жизнедеятельности животного (при его облучении) через бетонную защиту проведены коммуникации от капельницы, а для контроля физиологических параметров внутри бокса устанавливается прибор контроля.

Для видеонаблюдения за животным во время сеанса НЗТ и показаниями прибора контроля физиологических параметров бокс

оборудован двумя миниатюрными видеокамерами с выводом изображения на монитор.



a



б

Рис. 3.15. Схема реконструкции каналов реактора ИРТ МИФИ (*a*) и облучательного бокса (*б*)



Рис. 3.16. Внешний вид облучательного бокса НЗТ реактора ИРТ МИФИ

Основные характеристики

Плотность потока тепловых нейтронов, нейтр./см ² ·с.....	5×10 ⁸
Плотность потока быстрых нейтронов (>2,8 МэВ), нейтр./см ² ·с	2,9×10 ⁶
Мощность дозы гамма-излучения, Гр/с	0,0006



а



б

Рис. 3.17. Устройство вывода пучка нейтронов в облучательном боксе и стол для крепления животного (а); размещение собаки в боксе перед облучением (б)

Одновременно с созданием облучательного бокса было проведена реконструкция внутриканальных устройств. Была разработана конструкция коллимирующих устройств из свинца, устанавливаемых вдоль канала, обеспечивающая примерно постоянную плотность потока тепловых нейтронов на выходе ГЭК-4 (максимальное различие в пределах 10 %) независимо от диаметра выходного отверстия канала, изменяемого в диапазоне от 1 до 6 см. Конструкция позволяет оперативно переходить от одного диаметра пучка к другому. При этом достигается равномерное поле излучений по всей площади выходящего пучка (неравномерность не превышает 5 %). Для снижения дозы сопутствующего фотонного излучения установлен поликристаллический висмутовый фильтр.

Для создания специализированной облучательной базы на ядерном реакторе [19] проведена реконструкция тепловой колонны горизонтального канала реактора ИРТ МИФИ с выводом пучка тепловых и эпитепловых нейтронов (с характеристиками, отвечающими всем требованиям технологии НЗТ) в облучательный бокс, оборудованный для приема пациентов (рис. 3.18).

Проведенные предварительные расчеты показали возможность получения пучка эпитепловых ($\phi_{\text{эт}} > 10^9$ нейтр./см²·с) и тепловых нейтронов ($\phi_{\text{т}} > 1 \cdot 10^9$ нейтр./см²·с) при сопутствующей дозе в пучке не более $9 \cdot 10^{-13}$ Гр на единицу потока тепловых или эпитепловых нейтронов. Реконструкция дает возможность использовать такой пучок для обработки как поверхностных, так и глубоколежащих (до 7 см) опухолей.

Для создания медицинского канала была выделена большая часть объема занимаемого тепловой колонны реактора с условием сохранения двух вертикальных экспериментальных каналов и максимального сохранения их физических (экспериментальных) характеристик. Медицинский канал (рис. 3.19) представляет собой конструкцию, обеспечивающую формирование пучка нейтронов заданных энергий и потоков, транспортирования его до пациента, надежного и безопасного перекрытия пучка.

Для подтверждения приемлемости характеристик пучка нейтронов на созданной базе будет проведен комплекс физических исследований и предклинические испытания эффективности технологии нейтрон-захватной терапии на мелких и крупных животных – опухоленосителях.

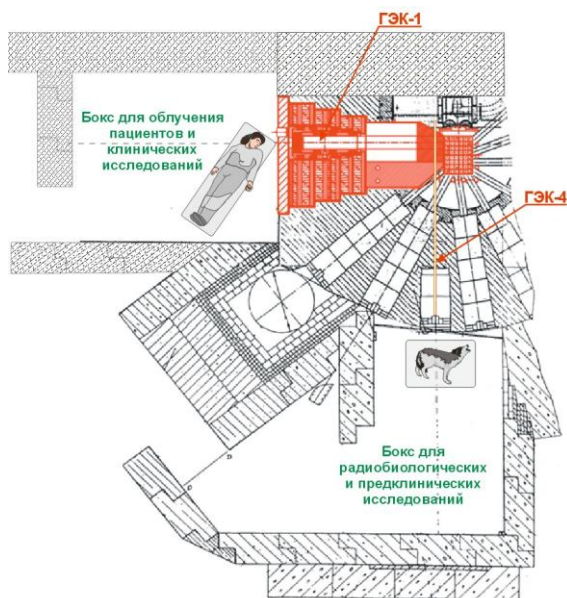


Рис. 3.18. Схема расположения боксов для НЗТ на ядерном реакторе ИРТ МИФИ

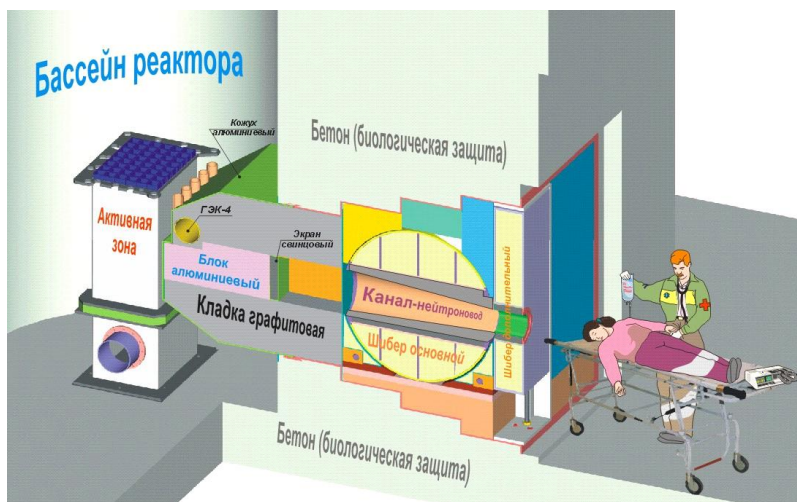


Рис. 3.19. Схема медицинского канала на ядерном реакторе ИРТ МИФИ

Расчетные характеристики полей излучений клинического канала

Плотность потока тепловых нейтронов, нейтр./см ² ·с	1,5·10 ⁹
Плотность потока эпитепловых нейтронов (0,5 эВ – 10 кэВ), нейтр./см ² ·с	1,3 · 10 ⁹
Доза быстрых нейтронов / тепловой нейтрон, Гр·см ²	5,0 · 10 ⁻¹³
Доза быстрых нейтронов / эпитепловой нейтрон, Гр·см ²	5,9 · 10 ⁻¹³
Доза фотонов / тепловой нейтрон, Гр·см ²	4,3 · 10 ⁻¹³
Доза фотонов / эпитепловой нейтрон, Гр·см ²	5,1 · 10 ⁻¹³

Созданную медицинскую облучательную базу планируется использовать в первую очередь для лечения больных со злокачественными опухолями, которые практически не поддаются традиционным методам лечения.

На созданном облучательном боксе впервые в России проведены доклинические исследования технологии НЗТ на собаках со спонтанными злокачественными новообразованиями различных нозологий и стадий развития опухолевых процессов.

Результаты доклинических испытаний технологии НЗТ на собаках со спонтанной меланомой показали высокую эффективность этого метода лечения. При использовании облучения нейтронами пучка и препарата ¹⁰ВРА в 80 % случаев достигнута полная регрессия опухолей.

По результатам проведенных доклинических исследований сформулированы предложения по переводу радиационной технологии на этап клинических испытаний, которые заключаются в создании клинической облучательной базы НЗТ на тепловой колонне ядерного реактора ИРТ МИФИ с использованием комбинированного пучка тепловых и эпитепловых нейтронов.

Будущее НЗТ – в новых технологиях, сочетающих достоинства НЗТ с современными методами борьбы с процессами метастазирования – главного врага существующих методов терапии онкологических заболеваний.

3.7. Количественное определение бора и гадолиния для НЗТ

Количественное определение ^{10}B и гадолиния в НЗТ необходимо для решения двух задач: планирование и дозиметрия облучений, исследование биораспределений при разработке новых препаратов для НЗТ. Являясь бимодальной технологией, поглощенная доза в тканях пациента после сеанса НЗТ определяется не только интенсивностью и качеством внешнего ионизирующего излучения, но и концентрацией нейтронозахватного элемента (^{10}B или Gd). При этом вклад поглощенной дозы от нейтрон-захватного элемента в величину полной поглощенной дозы составляет от 50 % и выше. Таким образом, задача количественного определения ^{10}B и гадолиния является одной из важнейших для реализации и развития НЗТ. Для количественного определения ^{10}B и гадолиния в пробах биологических тканей на реакторе ИРТ МИФИ были освоены три нейтронно-активационных методики:

- инструментальный нейтронно-активационный анализ Gd (ИНАА);
- нейтронно-активационная трековая авторадиография ^{10}B (НАТАР);
- нейтронно-радиационный анализ (НРА) ^{10}B и Gd.



Рис. 3.20. Спектрометр для проведения ИНАА

Порядок проведения измерения:

- облучение пробы в тепловой колонне;
- измерение интенсивностей соответствующих линий спектра наведенной активности (102,3 и 360,9 кэВ для Gd);
- расчет содержания элемента относительным способом.

Предел обнаружения Gd по данной методике составляет 1 мкг.

Определение гадолиния методом ИННА проводится по классической для данного метода схеме: исследуемая проба облучается в тепловой колонне реактора в течение 3–7 мин при плотности потока тепловых нейтронов $1,6 \cdot 10^{11}$ нейтр./см²·с. Измерения спектра проводятся с помощью гамма-спектрометра, состоящего из полупроводникового детектора фирмы CANBERRA из особо чистого германия с относительной эффективностью регистрации 25 % по линии 1332,5 кэВ ⁶⁰Co, и системы обработки спектрометрической информации, состоящей из амплитудного анализатора INSPECTOR фирмы CANBERRA и персонального компьютера. Разрешение спектрометра составляет 1,9 кэВ по линии 1332,5 кэВ. В качестве аналитического нуклида был выбран радионуклид ¹⁶¹Gd, а в качестве аналитических гамма-линий – 102,3 и 360,9 кэВ. Предел обнаружения Gd по данной методике составляет 1,0 мкг. Данная установка также позволяет проводить количественный и качественный анализ многих других элементов, имеющих радиоактивные изотопы, образующиеся в результате (*n,γ*)-реакции.

Метод НАТАР позволяет анализировать содержание ¹⁰B и визуализировать его распределение в пробах мягких тканей и жидкостей в диапазоне от 0,2 мкг/мл до 7 мкг/мл, также других α-излучателей.

Для количественного определения ¹⁰B и получения информации о его распределении в пробе был реализован метод НАТАР. В качестве детектора для данной методики выбран твердотельный трековый детектор (ТТД) на основе пластика CR-39 TASTRAK (TRACK ANALYSIS SYSTEMS LTD). При анализе проб методом НАТАР исследуемая проба приводится в плотный контакт с пластиной детектора CR-39, проба с детектором облучается в тепловой колонне, затем осуществляется травление детектора, фотографирование его поверхности, анализ плотности треков на поверхности детектора с последующим расчетом количественного содержания ¹⁰B. После процедуры травления треки от заряженных частиц в

толще детектора становятся видимыми в оптический микроскоп (рис. 3.21).

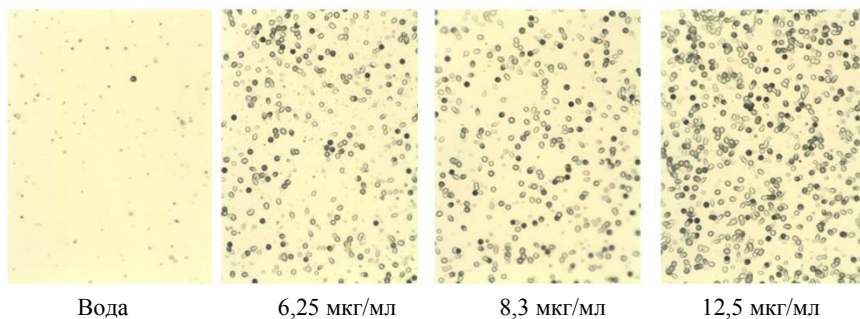


Рис. 3.21. Авторадиограммы растворов борной кислоты с разным содержанием ^{10}B



Рис. 3.22. Оптический микроскоп для НАТАР

Для количественного анализа треков на поверхности протравленного ТТД используется оптический микроскоп Olympus BX-51 (увеличение $\times 1000$) с цифровой фотокамерой Altra (рис. 3.22). Дан-

ный метод позволяет определять ^{10}B в диапазоне концентраций от 0,2 мкг/мл до 7 мкг/мл. Также данный метод позволяет визуализировать и определять количественно другие альфа-излучатели.



Рис. 3.23. Система детектирования установки для НРА на ГЭК-9

Основные характеристики

Плотность потока нейтронов, нейтр./см ² ·с	2,1·10 ⁶
Длина волны, Å	1,3
Апертура пучка, мм	14×44

Для количественного анализа ^{10}B и гадолиния реализован метод НРА (рис. 3.23). Для этого на горизонтальном экспериментальном канале ГЭК-9 создана специальная установка. НРА основан на измерении интенсивностей энергетических линий мгновенного гамма-излучения, испускаемого анализируемой пробой при облучении тепловыми нейтронами. По интенсивности соответствующих линий можно количественно определять содержание интересующего элемента (в частности, ^{10}B и гадолиния) в анализируемой пробе.

Созданная установка состоит из системы формирования нейтронного пучка на основе монохроматора с монокристаллом из

пиролитического графита, создающая нейтронный пучок апертурой 14×44 мм с плотностью потока тепловых монохроматических нейтронов, имеющих длину волны 1,3 Å, $2,1 \cdot 10^6$ нейтр./см²·с и детектирующей системы на основе коаксиального детектора из особо чистого германия (рис. 3.24).

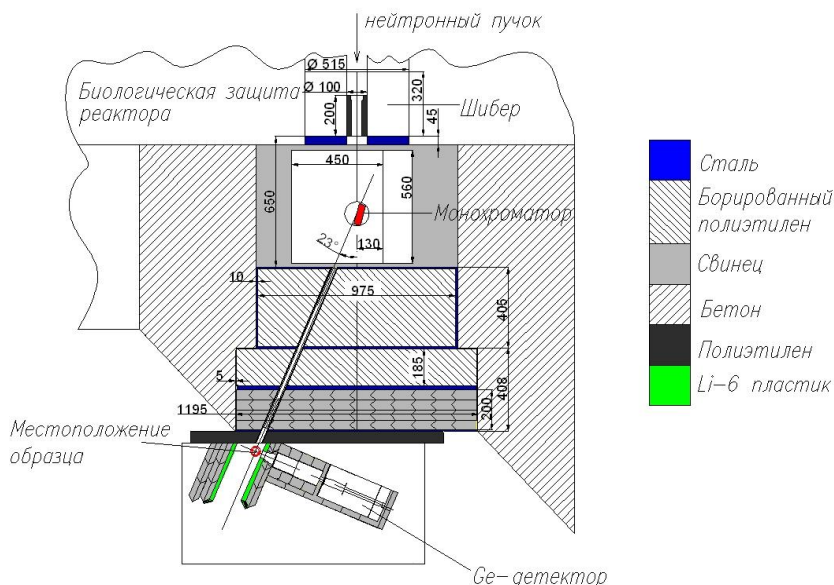


Рис. 3.24. Схема установки для НРА

Предел обнаружения ^{10}B и гадолиния для данной установки составляет 0,3 мкг и 2 мкг соответственно. Помимо ^{10}B и гадолиния данная установка также пригодна для количественного и качественного анализа еще как минимум 29 элементов (табл. 3.3).

НРА для НЗТ является единственным методом, который позволяет производить измерение количественного распределения ^{10}B и Gd in vivo непосредственно во время облучения нейтронами, обеспечивая не только информацию для планирования облучений, но и давая уникальную возможность непосредственной визуализации распределения поглощенной дозы в тканях и органах пациента. Созданная на ГЭК-9 установка для НРА может быть использована для экспериментального подтверждения такой возможности и определения основных параметров такой системы. Таким образом, ис-

пользование НРА в НЗТ не только позволит повысить эффективность НЗТ, но и переведет лучевую терапию в целом на принципиально иной уровень, так как ни один современный метод лучевой терапии не позволяет непосредственно измерять поглощенную дозу и ее распределение в тканях пациента.

Таким образом, на исследовательском реакторе ИРТ МИФИ имеется экспериментальная база для количественного определения ^{10}B и Gd в биологических тканях методами нейтронно-радиационного анализа, трековой автордиографии и инструментального нейтронно-активационного анализа, позволяющими проводить измерения концентраций ^{10}B от 0,2 мкг/г и Gd от 1 мкг/г. Данная экспериментальная база может быть использована для количественного определения многих других элементов в различных матрицах.

Таблица 3.3. Элементы, определяемые нейтронным радиационным анализом*

Элемент	Предел обнаружения, мг/г	Элемент	Предел обнаружения, мг/г
H	0,023	V	0,022
B	$6 \cdot 10^{-5}$	Cr	0,22
C	22	Mn	0,009
N	3,8	Fe	0,23
F	5	Co	0,017
Na	0,09	Ni	0,12
Mg	1,4	Cu	0,17
Al	0,34	Zn	0,44
Si	0,6	Sr	0,33
P	1,8	Cd	$7 \cdot 10^{-5}$
S	0,19	Ba	0,02
Cl	0,009	Nd	0,008
K	0,085	Sm	$3 \cdot 10^{-5}$
Ca	0,32	Gd	$6 \cdot 10^{-5}$
Ti	0,045		

*По данным Национального института стандартов и технологий США.

Глава 4. ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Широкое привлечение студентов, аспирантов, преподавателей и сотрудников к исследованиям на реакторе позволяет существенно улучшить качество подготовки специалистов, способствует повышению научной и педагогической квалификации преподавателей института, приобретению практических навыков выпускниками НИЯУ МИФИ, многие из которых связывают свою профессиональную карьеру с предприятиями Госкорпорации "Росатом".

На ИРТ МИФИ ведутся следующие формы образовательной деятельности:

- обзорные лекции-экскурсии,
- лабораторные работы,
- эксплуатационная практика,
- студенческие исследовательские работы,
- преддипломная практика,
- выполнение дипломных работ,
- выполнение работ по темам диссертаций.

Все занятия обеспечены методическими материалами и пособиями. Ежегодно в учебном процессе с использованием реактора участвует более 600 студентов НИЯУ МИФИ.

На европейской части России реактор МИФИ является единственным функционирующим в составе многопрофильного учебного заведения. Успешная эксплуатация и освоение реактора как мощного источника излучения позволили на базе ИРТ создать вузовский центр подготовки высококвалифицированных специалистов для атомной энергетики и экспериментальной физики, успешно развивать исследования по актуальным направлениям науки и техники.

Особо необходимо отметить дальнейшие перспективы проведения научно-исследовательской работы и расширения образовательной деятельности при использовании возможностей, предоставляемых современными информационными технологиями.

В первую очередь, это – организация работы методом удаленного авторизованного доступа к установкам ИРТ из лабораторий НИЯУ МИФИ: как московской площадки, так и региональных отделений. На рис. 4.1 приведен пример возможного подключения

удаленных терминалов к рабочим станциям на ИРТ МИФИ посредством виртуальной защищенной сети (VPN).

Удаленный компьютерный доступ к ресурсам ИРТ МИФИ, использование интернета, и средств мультимедиа для чтения лекций, тестирования, проведение занятий в форме видеоконференций, предоставление постоянного доступа к материалам для самостоятельной учебной работы и проведения научных исследований – все это особенно актуально для НИЯУ МИФИ с большим количеством филиалов и широкой географией их расположения.

Приумножение научного потенциала НИЯУ МИФИ в области фундаментальных и прикладных исследований на уникальных экспериментальных установках на ядерном реакторе ИРТ МИФИ помимо прямых научных результатов всероссийского и международного уровня, будет способствовать сохранению и развитию научного, методического и кадрового потенциала высшей школы России.

Вопросы учебной и научно-исследовательской работы студентов, аспирантов, слушателей факультета повышения квалификации и переподготовки кадров, а также других категорий инженерно-технического и медицинского персонала будут подробно рассмотрены в следующей монографии данной серии.

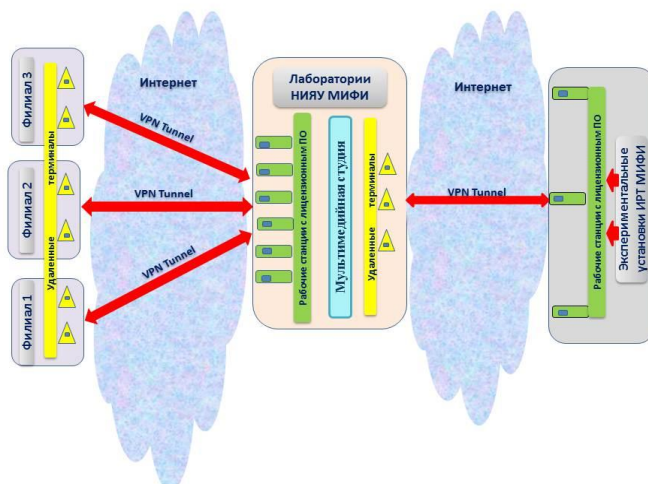


Рис. 4.1. Пример возможного подключения удаленных терминалов к рабочим станциям на ИРТ МИФИ через защищенные VPN каналы

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

К главе 1

1. Типовой проект ТП-3304-М. Москва, 1960-1961 г.г.
2. Крюков А.П., Каминский Б.С. О корреляции плотности потока нейтронов в экспериментальных каналах и канале автоматического регулирования ядерного реактора. // Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях (радиометрические и спектрометрические измерения)". Труды I Всесоюзного координационного совещания по метрологии нейтронного излучения. Москва, 1971 / Под ред. Р.Д. Васильева. М.: Изд-во стандартов, 1972. Т. 2. С. 96.
3. Крюков А.П., Большаков О.П., Мартынов Ю.Н., Савкин В.А. Об анализе полей излучения реактора. // Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях (радиометрические и спектрометрические измерения)". Труды I Всесоюзного координационного совещания по метрологии нейтронного излучения. Москва, 1971 / Под ред. Р.Д. Васильева. М.: Изд-во стандартов, 1972. Т. 2. С. 95.
4. Крюков А.П., Шершнев Ф.В. Способ бетонирования. Авт. свидетельство № 375264, 1973. // Бюллетень № 16, 1973.
5. Юрова Л.Н., Наумов В. И., Петров А.Н., Редкин А.Ф., Крюков А.П. Зависимость формы пространственного распределения нейтронов в размножающей системе от степени подкритичности. // Вопросы атомной науки и техники, сер. "Ядерная физика низких и средних энергий, реакторная физика". Вып. 2. М.: ИАЭ им. И.В.Курчатова, 1973. С. 51-56.
6. Крюков А.П., Петров О.Г., Трофимов А.П. Спектр гамма-излучения за защитой реактора ИРТ. //Вопросы дозиметрии и защиты от излучений/ Под ред. Л.Р. Кимеля и В. К.Сахарова. Вып. 14. М.: Атомиздат, 1975. С.103-104.
7. Крюков А. П., Большаков О.П., Мартынов Ю.Н., Савкин В. А. Исследование эффективности биологической защиты действующего ядерного реактора. // Вопросы дозиметрии и защиты от излучений/ Под ред. Л.Р. Кимеля и В. К.Сахарова. Вып. 14. М.: Атомиздат, 1975. С. 102-103.
8. Колобашкин В.М., Котляров А. А., Крюков А. П., Христофоров В.А. Установка для быстрого получения и спектрометрического анализа проб газообразных продуктов деления. //Экспериментальные методы ядерной физики/ Под ред. В.М. Колобашкина. Вып. 1. М.: Атомиздат, 1975. С. 10-12.
9. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Крюков А.П., Трофимов А.П., Косилов А.Н., Небоян В.Т., Тимохин Е.С. Эксперименты по регулированию распределения мощности на реакторе ИРТ-2000. // Атомная энергия, 1975. Т.39. Вып.2. С. 90-93.

10. Крюков А.П., Петров В.Н., Редкин А.Ф., Федотов В.И. О выборе размера ловушки нейтронов для исследовательского реактора. //Физика ядерных реакторов/ Под ред. Л.Н.Юровой. Вып. 4. М: Атомиздат, 1975. С.9-10.

11. Милосердин Ю.В., Набойченко К.В., Баранов В.М., Бобков К.Г., Кречко Ю.А., Крюков А.П., Золотуха Ю.С. Принципы проектирования установок для исследований физико-механических характеристик топлива на реакторе ИРТ-2000. //Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования (Материалы I Всесоюзного совещания, Киев, 1975). Киев: Наукова думка, 1976. С. 116-133.

12. Косилов А.Н., Крюков А. П., Небоян В.Т., Потапенко П.Т., Тимохин Е.С., Трофимов А.П. Стабилизация нейтронного потока в экспериментальных каналах реактора. // Атомная энергия, 1976. Т. 40. Вып. 5. С. 416-417.

13. Алексаков Г.Н., Белоусов В.И., Крюков А.П. Регулятор нейтронной мощности. Авт. свидетельство № 538617, 1971, 1976.

14. Большаков О.П., Борков В.А., Крюков А.П., Мартынов Ю.Н. Угловое распределение нейтронов на границе активной зоны - отражатель. // Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 2// Под ред. Ю.А. Егорова, В.П. Машковича, Ю.В. Панкратьева, А.П. Суворова, С.Г. Ципина. М.: Атомиздат, 1976. С.101–104.

15. Большаков О.П., Крюков А. П., Мартынов Ю.Н., Мирошников В.А., Савкин В. А. Исследование полей излучения за защитой реактора ИРТ-2000 МИФИ. // Радиационная безопасность и защита АЭС. Вып. 2// Под ред. Ю.А. Егорова, В.П. Машковича, Ю.В. Панкратьева, А.П. Суворова, С.Г. Ципина. М.: Атомиздат, 1976. С. 104-110.

16. Алексаков Г.Н., Алферов В.П., Белоусов В.И., Крюков А.П. Индикатор состояния ядерного реактора // Автоматика и телемеханика, 1977. № I. С.188-190.

17. Филипчук Е.В., Потапенко П.Т., Крюков А.П., Трофимов А.П., Дунаев В.Г., Кузнецов Н.А., Федулов В.В. Экспериментальное исследование алгоритмов прямого цифрового управления нейтронным полем на реакторе ИРТ-2000. //Атомная энергия, 1977. Т.42. Вып. 5. С. 365-369.

18. Крюков А.П., Петров В.Н., Редкин А.Ф. О применении свинцовых экранов на водо-водяном исследовательском реакторе. // Физика ядерных реакторов. Вып. 5 / Под ред. Л.Н. Юровой. М.: Атомиздат, 1977. С. 85-86.

19. Герасимов Н.С., Крюков А.П., Трофимов А.П., Павлов В.И., Симонов В.Д. Оптимальная эксплуатация реактора ИРТ-2000 в условиях ограниченного запаса реактивности. М., препринт ИТЭФ, 1978, № 14.

20. Крюков А.П. Приведенная толщина биологических защит действующих ядерных реакторов. // Вопросы дозиметрии и защиты от излу-

чений" (Материалы II Всесоюзной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Москва, МИФИ, 19-21 декабря 1978 г.). Вып. 18 / Под ред. В.К. Сахарова. М.: Атомиздат, 1979. С. 130-134.

21. Труды совещания специалистов по обмену опытом реконструкции исследовательских реакторов в странах - членах СЭВ. Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике. М., 1984.

22. Алферов В.П., Крюков А.П., Лыжин С.А., Фролов Ю.В., Яковлев К.И. Регулятор физической мощности ядерного реактора. Авт. Свидетельство № 1264753, 1984, 1986.

23. Федоров Г.Б., Крюков А.П., Портнов А.А., Комарницкий М.В., Бобровский А.В., Жуков В.П. Внутрореакторная низкотемпературная петлевая установка, охлаждаемая азотом. М., препринт МИФИ № 068-87, 1987.

24. Шальнов А.В., Александров А.С., Крюков А.П., Зайцев К.Н. Атомный центр МИФИ // Атомная энергия, 1988. Т. 64. Вып.5. С.360-366.

25. Крюков А.П., Баллод Л.А., Елютин Н.А., Денисов Д.С., Кулиджанов Ф.Г., Матвеев С.К., Эйшлин А.О. Устройство для размещения оборудования в горизонтальном канале реактора ИРТ.// Приборы и техника эксперимента, 1991. № 3. С. 27-29.

26. Шальнов А.В., Неволин В.Н., Петровский А.Н., Хромов В.В., Баранов В.М., Гудков А.Н., Елютин Н.О., Попов В.Д., Юрова Л.Н., Крюков А.П., Петров В.Н., Зайцев К.Н. Учебно-исследовательский Атомный центр Московского инженерно-физического института. //Атомные центры СССР. М., 1992.

27. Paranyushkin V.S., Petrov V.N. The Fission Products Release Model and its Using for Reactor Hard Accidents Analysis. Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, v.1, Charleston, S.C. USA, 1992.

28. Быковский Ю.А., Зайцев К.Н., Кервалишвили П.Д., Николаев И.Н., Портнов А.А., Шаламберидзе С.О. Датчик флюенса нейтронного излучения на основе карбида бора. //Письма в ЖТФ, 1993. Т. 19. Вып.14. С. 57-59.

29. Борисов С.Е., Крюков А.П., Машкович В.П., Неретин В.А. Двумерные исследования наведенной активности в материалах ИРТ МИФИ при выводе из эксплуатации или реконструкции.// Атомная энергия, 1996. Т.81. Вып.4. С. 277-281.

30. Шальнов А.В., Неволин В.Н., Оныкий Б.Н., Крамер-Агеев Е.А., Петровский А.Н., Зайцев К.Н., Портнов А.А. Учебно-научный методический комплекс атомного центра МИФИ. // Российские нейтронные новости, 1996. Вып.6. С.16-26

31. Атомный центр МИФИ: Проспект. М.: МИФИ, 1997.

32. Шальнов А.В., Неволин В.Н., Петровский А.Н., Портнов А.А., Зайцев К.Н. Измерительные комплексы атомного центра МИФИ для фундаментальных и прикладных исследований. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1998. Т.6. С. 31-43

33. V.V. Khmelshchikov, I.T.Tretjakov, Portnov A.A., A.V.Vinogradov. Modernization and Reconstruction of Ageing Russian Research Reactors as the Method to Extend Their Operational Life. IAEA International Symposium on Research Reactor Utilization, Safety and Management, Lisbon, Portugal, September 6-10, 1999, paper IAEA-SM-360/042P, CD ROM CSP-4/C, Vienna, 2000.

34. M.Andreev, S.Abramovich, E.Fomushkin, V.Kvasov, A.Portnov, A.Redkin, H.Yasuda. Thermal Neutron Capture Cross Section of ^{232}Pa . Journal of NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY, Supplement 2 (August 2002). P.280-282

35. М.Ф. Андреев, С.Н.Абрамович, Э.Ф.Фомушкин, В.И.Квасов, А.А.Портнов, А.Ф.Редкин. Измерение сечения радиационного захвата тепловых нейтронов ядром ^{232}Pa . // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров, 2003. Вып. 5. С.114-119.

36. Щуровская М.В., Алферов В.П., Портнов А.А., Редкин А.Ф. Планирование перегрузок ИРТ МИФИ в условиях дефицита топлива// Тезисы докладов 13 семинара по проблемам физики реакторов. М., 2004, С.48-50.

37. Крюков А.П., Портнов А.А., Зайцев К.Н. Атомный центр МИФИ. // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 3.

38. Аунг Тхут Вин, Чижов К.А., Портнов А.А. Оценка надежности исследовательского реактора МИФИ с использованием вероятностного и нечеткого подходов.// Естественные и технические науки, 2009. № 3. С. 53-56.

К п. 2.1

1. Зайцев К.Н., Сизов Р.А. Приставка к нейтронному дифрактометру и криостат для нейтронографического исследования монокристаллов. //Приборы и техника эксперимента, 1973. №4. С. 47-49

2. Морохов И.Д., Петин В.Н., Петрунин В.Ф., Трусов Л.И. Структура и свойства малых металлических частиц. // УФН, 1981. Т. 133. Вып. 4. С. 651-692.

3. Петрунин В.Ф., Погонин В.А., Андреев Ю.Г. и др. Нейтронографическое исследование структуры стеклогуглерода. // Изв. АН СССР, сер. Неорг. материалы, 1982. Т. 18. № 8. С. 1292-1295.

4. Петрунин В.Ф., Андреев Ю.Г., Троицкий В.Н., Гребцова О.М. Нейтронографическое исследование нитридов ниобия в ультрадисперсном состоянии. // Поверхность, 1982. Т. 1. № 11. С. 131-135.

5. Петрунин В.Ф., Марченко С.В., Севастьянов А.И. и др. Нейтронно-графическое исследование бериллия в ультрадисперсном состоянии. // Изв. АН СССР, сер. неорг. мат, 1984. Т. 20. № 1. С. 60-62.

6. Петрунин В.Ф., Андреев Ю.Г., Бурханов А.В. и др. Нейтроннографическое исследование влияния окисной пленки на среднеквадратичные смещения атомов в ультрадисперсном никеле. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 1986. № 10. С. 47-52.

7. Петрунин В.Ф. Особенности атомной структуры ультрадисперсных порошков и материалов. // ЖВХО им. Д.И. Менделеева, 1991. Т. 36. № 2. С. 146-150.

8. Петрунин В.Ф., Попов В.В., Чжу Хунчжи, Коровин С.А. Стабильность высокотемпературных фаз ультрамелких оксидов циркония. // Glass Physics and Chemistry, 2005. Т. 31. № 4. С. 459-466.

9. Петрунин В.Ф., Федотов А.В. Особенности атомно-кристаллической структуры и фазовых соотношений ультрадисперсных порошков. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2006. № 12. С. 33-42.

10. Петрунин В.Ф., Попов В.В., Коровин С.А. Закономерности образования нанокристаллических частиц в диоксидах металлов подгруппы IVB. // Журнал неорганической химии, 2010. Т. 55. № 10. С. 1604-1610.

11. Попов В.В., Петрунин В.Ф., Коровин С.А., Менушенков А.П. и др. Закономерности образования нанокристаллических структур в системах $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-MeO}_2$ ($\text{Ln}=\text{Gd}, \text{Dy}$; $\text{Me}=\text{Zr}, \text{Hf}$). // ЖНХ, 2011. Т. 56. № 10. С. 1617-1622.

К п. 2.2

1. Антонов А.В., Исаков А.И., Ковыльников В.Н., Линькова Н.В., Пешков И.В., Микеров В.И., Перекрестенко А.Д., Старцев С.А., Тихомиров А.А., Петров В.Н., Крюков А.П. Исследования с медленными и ультрахолодными нейтронами. // Нейтронная физика. Материалы IV Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Киев, 1977. Ч.1. С.187-191.

2. Антонов А.В., Исаков А.И., Крюков А.П., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Перекрестенко А.Д. Исследование на гравитационном спектрометре полных и неупругих сечений взаимодействия нейтронов очень низких энергий с Cu65 и Be9 .// Краткие сообщения по физике ФИАН, 1980. № 8. С. 36-40.

3. Антонов А.В., Горячев Б.И., Исаков А.И., Ковыльников В.Н., Крупинин И.С., Крюков А.П., Линькова Н.В., Лященко Б.Г., Мешков И.В., Микеров В.И., Перекрестенко А.Д., Тихомиров А.А., Тукарев В.А., Шаров Ю.Б. Некоторые вопросы физики ультрахолодных и очень холодных нейтронов. // Труды ФИАН СССР. М.: Наука, 1980. Т. 127. С. 6-31.

4. Антонов А.В., Исаков А.И., Крюков А.П., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Перекрестенко А.Д. Спектрометрические исследования в диапазоне энергий 10-4 – 10-8 эВ на гравитационном нейтронном спектрометре.// Нейтронная физика. Материалы V Всесоюзной конференции по нейтронно-й физике. Киев, 1980. Ч. 1. С. 125-129.

5. Антонов А.В., Исаков А.И., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Перекрестенко А.Д., Шелагин А.В. Исследование неоднородностей в ванадии и бериллии методом очень холодных нейтронов. // Физика твердого тела, 1984. Т. 26. № 6.

6. Антонов А.В., Герасимов В.И., Исаков А.И., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Перекрестенко А.Д., Тарасов С.Г. Взаимодействие очень холодных нейтронов с блок-сополимером типа полистирол-полибутадиен – полистирол. // Письма в ЖЭТФ, 1985. Т. 41. № 5.

7. Ибраев Б.М., Ильина Е.Г., Калюжная Г.А., Кузаков А.К., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Перекрестенко А.Д. Примесные микропреципитаты в кремнии.// Краткие сообщения по физике ФИАН, 1989. №11. С. 6-8.

8. Кузнецов С.П., Мешков И.В., Перекрестенко А.Д., Шелагин А.В. Исследование субмикроскопических магнитных неоднородностей в магнетиках с помощью очень холодных нейтронов. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 20.

9. Гринев В.Г., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Оптов В.А., Перекрестенко А.Д., Распопов Л.Н., Шелагин А.В. Исследование надмолекулярной структуры и динамики частично кристаллизующихся полимеров методом рассеяния очень холодных нейтронов.// Высокомолекулярные соединения, 1993. Т. 35А, Вып.2. С. 179.

10. Перекрестенко А.Д. Исследования взаимодействия очень холодных нейтронов с конденсированными средами. Докторская диссертация, ФИАН. М., 1998.

11. Ковалева Н.Ю., Бревнов П.Н., Гринев В.Г., Кузнецов С.П., Позднякова И.В., Чвалун С.Н., Синевич Е.А., Новокшопова Л.А. Синтез нанокompозитов на основе полиэтилена и слоистых силикатов методом интеркаляционной полимеризации.// Высокомолекулярные соединения, 2004. Т. 46А. № 6. С. 651.

12. Meshkova I.N., Grinev V.G., Raspopov L.N., Shchegolikhin A.N., Kuznetsov S.P., Mitrofanov A.V., Shestov S.V., Udovenko A.I., Novokshonova L.A. Polyolefins functionalization by copolymerization of ethylene (propylene) with substituted norbornene. // Polimery, 2008. V. LIII. P. 345.

13. Irina Dubnikova, Evgeniya Kuvardina, Vadim Krashenninnikov, Sergey Lomakin, Igor Tchmutin and Sergey Kuznetsov, The effect of multiwalled carbon nanotube dimensions on the morphology, mechanical, and electrical properties of melt mixed polypropylene-based composites. // Journal of Applied Polymer Science, 2010. V. 117. P. 259.

1. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Тростин С.С. Бета-ЯМР спектроскопия. // Некоторые проблемы современной ядерной физики. М.: Наука, 1989. С. 193-213.

2. Абов Ю.Г., Булгаков М.И., Боровлев С.П., Гулько А.Д., Гарочкин В.М., Джепаров Ф.С., Степанов С.В., Тростин С.С., Шестопад В.Е. Исследование неупорядоченной спиновой системы ядер ^8Li - ^6Li в кристаллах LiF методом β -ЯМР-спектроскопии. // ЖЭТФ, 1991. Т. 99. С. 962-981.

3. Джепаров Ф.С. Перенос спиновой поляризации по системе редких ядер и случайные блуждания в неупорядоченных средах. // ЖЭТФ, 1991. Т. 99. С. 982-1011.

4. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Тростин С.С. Бета-ЯМР спектроскопия и исследования случайных блужданий в неупорядоченных системах. // УФН, 1991. Т. 161. С. 198-200.

5. Булгаков М.И., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Степанов С.В., Тростин С.С. Спектр спиновых флуктуаций, фазовая релаксация и ЯМР β -активных ядер ^8Li в кристаллах LiF. От метода функций памяти к кумулянтным разложениям. // Письма в ЖЭТФ, 1993. Т. 58. С. 614.

6. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Степанов С.В., Тростин С.С. Статистическая динамика спиновых систем и β -ЯМР-спектроскопия. // ЭЧАЯ, 1995. Т. 26. С. 1654-1684.

7. Gul'ko A.D., Dzheparov F.S., Stepanov S.V., Trostin S.S. An investigation of ^8Li - ^6Li cross-relaxation form functions by means of β -NMR-spectroscopy. Hyperfine Interactions, 1996. C1. P. 581.

8. Джепаров Ф.С., Львов Д.В., Шестопад В.Е. Диффузия по системе примесных центров с диполь-дипольными скоростями прыжков. // ЖЭТФ, 1998. Т. 114. С. 2166.

9. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Степанов С.В., Тростин С.С. β -ЯМР-спектроскопия: методика и приложения к задачам спиновой динамики. // Современные проблемы ядерной физики, физики и химии конденсированных сред. Труды первой Московской международной школы физики ИТЭФ. М.: УФН, 1999. С. 155-160.

10. Dzheparov F., Gul'ko A., Heitjans P., L'vov D., Schirmer A., Shestopal V., Stepanov S., Trostin S. Spin dynamics and β -NMR after polarized neutrons capture. // Physica B, 2001. V. 297. P. 288-292.

11. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Степанов С.В., Тростин С.С. Магнитный резонанс β -активных ядер ^8Li на двойной ларморовской частоте в поликристаллах LiF, содержащих дислокации. // Ядерная физика, 2002. Т. 65. С. 2056-2065.

12. Dzheparov F.S., Gul'ko A.D. Beta-NMR spectroscopy. Modern state and future trends. // Modern problems of nuclear physics and physics and chemistry of condensed matter. Proceedings of the 7th International Moscow School of Physics. M.: Академпринт, 2004. С. 65-71.

13. Джепаров Ф.С. Делокализация возбуждений в неупорядоченных средах с дипольным переносом. // Письма в ЖЭТФ, 2005. Т. 82. С. 580-584.

14. Абов Ю.Г., Гулько А.Д., Джепаров Ф.С. Бета-ЯМР спектроскопия. Современное состояние и перспективы. // Ядерная физика, 2006. Т. 69. С. 1737-1746.

15. Gul'ko A.D., Ermakov O.N., Stepanov S.V., Trostin S.S. Experimental Investigation of Nuclear Polarization Transfer in Spatially Disordered Spin System by Means of β -NMR Spectroscopy. // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2007. V. 20. P. 169-173.

16. Гулько А.Д., Ермаков О.Н., Степанов С.В., Тростин С.С. Бета-ЯМР спектрометр на поляризованных нейтронах и исследование кинетики переноса ядерной поляризации в пространственно-неупорядоченной среде. // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 94-105.

17. Dzheparov F.S. Spin dynamics in disordered solids. // J. of Superconductivity and Novel Magnetism, 2007. № 20. P. 161.

18. Dzheparov F.S., L'vov D.V., Shestopal V.E. Diffusion tensor for spin polarization transport on rare nuclei. // J. of Superconductivity and Novel Magnetism, 2007. № 20. P. 175.

19. Гулько А.Д., Ермаков О.Н., Степанов С.В., Тростин С.С. Релаксация поляризации бета-активных ядер ${}^8\text{Li}$ в пространственно-неупорядоченной системе ядер ${}^8\text{Li}$ - ${}^6\text{Li}$ в монокристаллах LiF. // Конденсированные среды и межфазные границы, 2008. № 10. С. 18-24.

20. Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Ермаков О.Н., Любарев А.А., Степанов С.В., Тростин С.С. β -ЯМР и ядерная спиновая диффузия в пространственно-неупорядоченной подсистеме. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008. № 12. С. 43.

21. Dzheparov F.S., Gulko A.D., Ermakov O.N., Lyubarev, A.A. Stepanov S.V., Trostin S.S. Kinetics of the polarization transfer in spatially disordered spin system: depolarization of impurity beta-active nuclei. // Appl. Magn. Reson, 2009. № 35. P. 411-420.

22. Dzheparov F.S. Spin Dynamics in Disordered Solids. Encyclopedia of Complexity and Systems Science. / Ed. Robert A.Meyers. Springer, 2009. P. 8588-8597.

23. Гулько А.Д., Джепаров Ф.С., Ермаков О.Н., Львов Д.В., Любарев А.А. Исследование зависимости переноса поляризации в неупорядоченной системе ядер ${}^8\text{Li}$ - ${}^6\text{Li}$ от внешнего магнитного поля. Препринт ИТЭФ, 15-12, 2012.

К п. 2.4

1. Графутин В.И., Прокопьев Е.П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества. // Успехи физических наук, 2002. Т. 172. № 1. С. 67-83.

2. Гаврилов С.А., Графутин В.И., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В. Прямое экспериментальное наблюдение атома позитрония в пористом кремнии методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Письма в ЖЭТФ, 2005. Т. 81. Вып. 11-12. С. 680-682.

3. Графутин В.И., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Калугин В.В., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Хмелевский Н.О., Фунтиков Ю.В. Исследования методом позитронной аннигиляционной спектроскопии дефектов в облученном протонами кремнии. // Микроэлектроника, 2005. Т. 34. № 3. С. 218-224.

4. Графутин В.И., Илюхина О.В., Прокопьев Е.П., Фунтиков Ю.В. Аннигиляция позитронов в водно-спиртовых растворах нитратов. // Химическая физика, 2005. Т. 25. № 4. С. 13-16.

5. Графутин В.И., Ничипоров Ф.Г. Физико-химические исследования в ИТЭФ. // Бюллетень Агентства по атомной энергии, июнь 2006. С. 8-14.

6. Графутин В.И., Зин Мин У, Колотушкин В.П., Милосердин В.Ю., Мищенко А.Ю., Самосадный В.Т., Речицкий В.Н., Фунтиков Ю.В., Штоцкий Ю.В. Исследование изменений электронной и дефектной структуры сплавов на основе Ni-Cr методом измерения углового распределения аннигиляционных фотонов. // Физика и химия обработки материалов, 2007. № 1. С. 68-72.

7. Бритков О.М., Гаврилов С.А., Графутин В.И., Калугин В.В., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В. Исследование пористого кремния методом позитронной аннигиляционной спектроскопии // Химия высоких энергий, 2007. Т. 41. № 1. С. 1-6.

8. Залужный А.Г., Варисов А.З., Графутин В.И., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В. Термализация позитронов и атома позитрония в полупроводниках и ионных кристаллах. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008. № 2. С. 15-20.

9. Графутин В.И., Залужный А.Г., Тимошенков С.П., Бритков О.М., Илюхина О.В., Комлев В.П., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Фунтиков Ю.В. Исследование радиационных нарушений в монокристаллах кварца, облученных протонами. // Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и нейтронные исследования, 2008. № 7. С. 10-18.

10. Графутин В.И., Залужный А.Г., Калугин В.В., Илюхина О.В., Мясищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В., Хмелев-

ский Н.О. О возможности исследования некоторых дефектных и пористых систем методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Химия высоких энергий, 2008. Т. 42. № 6. С. 528–535.

11. Варисов А.З., Графутин В.И., Залужный А.Г., Илюхина О.В., Мяснищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В. О диффузии позитронов и позитрония в наноматериалах. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2008. №11. С.73-80.

12. Прокопьев Е.П., Графутин В.И., Тимошенков С.П., Евстафьев С.С., Фунтиков Ю.В. Позитроника и Нанотехнологии: Возможности изучения нанообъектов в технически важных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Микроэлектроника, 2009. Т. 38. № 6. С. 464-475.

13. Графутин В.И., Илюхина О.В., Мяснищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В., Бурцл Р. Позитроника и нанотехнологии: возможности изучения нанообъектов в материалах и наноматериалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Ядерная физика, 2009. Т. 72. № 10. С. 1730-1739.

14. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В. Определение радиусов нанообъектов в пористых системах и некоторых дефектных материалах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2009. № 12. С. 24-32.

15. Фунтиков Ю.В., Прокопьев Е.П., Хмелевский Н.О., Илюхина О.В., Хмелевская В.С., Горчаков К.А., Графутин В.И. Исследования электронных свойств в аморфных сплавах на основе железа при их кристаллизации. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2010. № 7. С. 80-84.

16. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Крщак В., Бурцл Р., Хэнер П., Зе-ман А., Илюхина О.В., Ерак Д., Могилевский М.А., Мяснищева Г.Г., Фунтиков Ю.В. Изучение конструкционных материалов активной зоны реакторов методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Ядерная физика, 2011. Т. 74. № 2. С. 195-206.

17. Милосердин В.Ю., Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Фунтиков Ю.В., Мищенко А.Ю., Самосадный В.Т., Бойко Н.В., Колотушкин В.П. Позитронная диагностика свойств материалов. // Ядерная физика и инжиниринг, 2010. Т. 1. № 3. С. 220-240.

18. Бурцл Р., Графутин В.И., Илюхина О.В., Мяснищева Г.Г., Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П., Фунтиков Ю.В. Возможности изучения нанообъектов в пористом кремнии и подложках кремния, облученных протонами, методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Физика твердого тела, 2010. Т. 52. Вып. 4. С. 651-654.

19. Графутин В.И., Мешков И.Н., Прокопьев Е.П., Хмелевский Н.О., Яковенко С.Л. Определение размеров дефектов вакансионного типа в ангстремных диапазонах методами позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Микроэлектроника, 2011. Т. 40. № 6. С. 468-475.

20. Графутин В.И., Прокопьев Е.П., Кршак В., Буркл Р., Хэнер П., Земан А., Илюхина О.В., Мясичева Г.Г., Тимошенко С.П., Фунтиков Ю.В., Хмелевский Н.О. Определение размеров и концентраций нанообъектов в облученных металлах и сплавах методом позитронной аннигиляционной спектроскопии. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2011. № 7. С. 1–12.

21. Графутин В.И., Фунтиков Ю.В., Хмелевский Н.О. Позитронная спектроскопия металлов группы железа. // Химия высоких энергий, 2012. Т. 46. № 1. С. 76-77.

22. Графутин В.И., Фунтиков Ю.В., Хмелевский Н.О. Электронные свойства аморфных сплавов FeCuNbSiB. // Физика твердого тела, 2012. Т. 54. Вып. 1. С. 29-31.

23. Krsjak V., Grafutin V., Ilukhina O., Burcl R., Ballesteros A., Hahner P. Study of PRIMAVERA steel samples by a positron annihilation spectroscopy technique II –Lifetime measurements. // J. of Nuclear Materials, 2012. V. 421. P. 97-103.

24. Kozlov Yu.F., Chaplygin, Yu.A., Timoshenkov S.P., Grafutin V.I., Prokopev E.P. Possible Synergetic Approaches to the Explanation of Nanomaterials High Properties // European researcher (Европейский исследователь), 2012. V. 25, № 7 (июль). P.1030-1035.

25. Grafutin V.I., Britkov I.M., Britkov O.M., Evstaf'ev S.S., Ilyukhina O.V., Myasishcheva G.G., Prokop'ev E.P., Timoshenkov S.P., Funtikov Yu.V. Study of Radiation-Induced Damage to Type III–V Semiconductor Compounds Irradiated with γ Quanta and Protons Using Positron Annihilation Spectroscopy // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2012. V. 6. No. 6. P. 964–970.

26. Kryukov, Debarberis L., Ballesteros A., Krsjak V., Burcl R., Rogozhkin S.V., Nikitin A.A., Aleev A.A., Zaluzhnyi A.G., Grafutin V.I., Ilyukhina O.V., Funtikov Yu.V., Zeman A. Integrated analysis of WWER-440 RPV weld re-embrittlement after annealing» // J. of Nuclear Materials, 2012. V.429. P. 190–200.

К п. 2.5

1. Bolozdynya A. Emission detectors. Singapore: World Scientific, 2010.

2. Akimov D.Yu., Alexandrov I.S., Aleshin V.I. et al. Perspectives to measure neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase emission detector. e-Print: arXiv:1212.1938 [physics.ins-det].

3. Долгошеин Б.А., Лебеденко В.Н., Родионов Б.У. Новый метод регистрации следов ионизирующих частиц в конденсированном веществе. // Письма в ЖЭТФ, 1970. Т. 11. С. 513.
4. Akimov D.Yu., Alner G.J., Araujo H.M. et al. The ZEPLIN III dark matter detector: instrument design, manufacture and commissioning. // *Astropart. Phys.*, 2007. V. 27. P. 46.
5. Edwards B., Araujo H.M., Chepel V. et al. Measurement of single electron emission in two-phase xenon. // *Astropart. Phys.*, 2008. V. 30. P. 54; Eprint: arXiv:0708.0768v1.
6. Burenkov A. A., Akimov D.Yu., Grishkin Yu.L. et. al. Detection of a Single Electron in Xenon-Based Electroluminescent Detectors. // *Phys. At. Nucl.*, 2009. V. 72. P. 653.
7. Santos E., Edwards B. et al., Single electron emission in two-phase xenon with application to the detection of coherent neutrino-nucleus scattering. // *JHEP*, 2011. V. 12. P. 115; Eprint: arXiv:1110.3056.

К п. 3.1

1. Алексаков Г.Н., Белоусов В.И., Крюков А.П., Проектирование СУЗ на основе теории оптимального управления. // *Атомная энергия*, 1972. Т. 32. Вып. 3. С. 228.
2. Алексаков Г.Н. и др. Экспериментальное исследование оптимальных процессов управления нейтронным потоком ядерного реактора. // *Атомная энергия*, 1975. Т. 39. Вып. 6.
3. Универсальный канал контроля защиты и регулирования "Мираж" для СУЗ ядерного реактора /Алексаков Г.Н., Алферов В.П., Крюков А.П., Лыжин С.А., Трофимов А.П. // *Управление ядерными энергетическими установками*. М., 1981. Вып. 5. С. 17-21.
4. Алферов В.П. и др. Опыт применения и эксплуатационные характеристики блока управления мощностью типа "Мираж". // *ВАНТ Сер. ФТЯР*, 1984. Вып. 5. С. 42.
5. Алферов В.П., Федоров В.А., Кириченко Г.П. Характеристики импульсов ионизационных камер деления // *Приборы и техника эксперимента*, 2000. № 6.
6. Щуровская М.В., Алферов В.П., Портнов А.А., Редкин А.Ф. Планирование перегрузок ИРТ МИФИ в условиях дефицита топлива // *Тезисы докладов 13 семинара по проблемам физики реакторов*. М., 2004. С.48-50.
7. Алферов В.П. и др. Программно-технический комплекс контроля нейтронно-физических параметров для РПУ Калининской АЭС. // *ВАНТ, Сер. ФТЯР*, 2005. Вып. 49.
8. Федоров В.А. и др. Система контроля пуска и подкритичности СКП-Кентавр для РБМК // *ВАНТ, Сер. ФТЯР*, 2005. Вып.49.

9. Алексаков Г.Н. и др. ИРТ МИФИ - современный полигон для исследования метрологических характеристик аппаратуры СУЗ // Международная научно-техническая конференция «Исследовательские реакторы в XXI веке». М., 2006.

10. Алферов В.П. и др. Метрологическое обеспечение широкодиапазонных каналов контроля нейтронного потока для СУЗ // Промышленные АСУ и контроллеры. М.: Научтехлитиздат, 2006. № 8.

11. Алексаков Г.Н. и др. Широкодиапазонная аппаратура контроля и управления для ядерных реакторов. // Инженерная физика. 2007. № 2.

12. Федоров В.А. и др. Программно-технический комплекс «ПАРУС». // Ядерные информационно-измерительные технологии, 2009. № 2(30). С.88-95.

К п. 3.2

1. Юрова Л.Н., Поляков А.А., Рухло В.П., Титаренко Ю.Е., Бобров С.А. Исследование нейтронно-физических параметров решетки типа ВВЭР с обогащением урана 6,5 %. // Атомная энергия, 1978. Т. 44. Вып. 6. С. 518-519.

2. Юрова Л.Н., Поляков А.А., Рухло В.П., Титаренко Ю.Е., Бобров С.А. Исследование возможностей накопления ^{233}U в реакторах типа ВВЭР при минимальном образовании ^{232}U . // Атомная энергия, 1978. Т. 45. Вып. 1. С. 21-24.

3. Поляков А.А., Рухло В.П., Титаренко Ю.Е., Комин С.Ф. Накопление ^{233}U с заданным содержанием ^{232}U при облучении тория в ВВЭР. // Атомная энергия, 1982. Т. 33. Вып. 2.

4. Поляков А.А., Комин С.Ф., Стогов Ю.В., Лунин Г.Л., Аборина И.Н. Экспериментальное исследование распределения скоростей ядерных реакций $^{238}\text{U}(n,-)$ - и $^{235}\text{U}(n,-)$ -реакций в уран-водных ячейках ВВЭР вблизи неоднородностей. // Атомная энергия, 1988. Вып. 2. С. 93-95.

5. Поляков А.А., Стогов Ю.В., Комин С.Ф., Соболев С.В., Арсентьев С.В., Лунин Г.Л., Аборина И.Н., Проселков В.Н., Шилов В.В., Гуреев А.И. Исследование нейтронно-физических параметров уран-водной решетки с гадолиниевым поглотителем. // Моделирование и исследование нейтронно-физических процессов в ядерно-энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1991.

6. Юрова Л.Н., Поляков А.А., Комин С.Ф., Рухло В.П., Стогов Ю.В., Титаренко Ю.Е., Аборина И.Н., Лунин Г.Л. // Экспериментальные исследования нейтронных процессов при загрузке тория в ядерные реакторы различных типов. Препринт МИФИ, 024-91, 1991.

7. Стогов Ю.В. Нейтронно-физические эксперименты для верификации программ расчета ВВЭР. // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 30-33.

8. Стогов Ю.В., Аниканов С.Д., Дмитриев М.Ю. Эксперименты на реакторе ИРТ МИФИ для изучения влияния ThO_2 -поглотителей на нейтронное поле в топливной решетке типа ВВЭР. // Новая технологическая платформа атомной отрасли: Материалы XVI семинара по проблемам физики реакторов. Москва, 3–7 сентября 2010 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С.182-185.

К п. 3.3

1. Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Кожин А.Ф. и др. Экспериментально-расчетное исследование поля энерговыделения и выгорания топлива ИРТ. //Атомная энергия. 2000. Т. 88. Вып. 6. С. 426.

2. Бушуев А.В., Кожин А.Ф., Жуньдун Ли и др. Определение выгорания ТВС исследовательского реактора методом их повторного облучения и последующего гамма-спектрометрического измерения. //Атомная энергия, 2004. Т. 97. Вып. 2. С.138.

3. Бушуев А.В., Зубарев В.Н., Кожин А.Ф. и др. Неразрушающий анализ содержания ^{235}U , ^{236}U , ^{237}Np , ^{238}U в топливе отработавших ТВС ИРТ-3М. //Атомная энергия, 2006. Т. 101. Вып. 5. С. 396.

4. Щуровская М.В., Алферов В.П. TIGR - программа нейтронно-физического расчета активной зоны реактора ИРТ (отчет о верификации и обосновании ПС) № 97-2-503-304ОВО. М.: МИФИ, 2001.

5. Bushuev A.V., Kozhin A.F., Zubarev V.N. at all. Non – Destructive Assay of Nuclide Composition in Spent Fuel Assemblies from a Research Reactor by Repeat Irradiation and Gamma – Spectrometric Measurement. //J. of Nuclear Materials Management, 2007. V. XXXV. № 2. P. 12.

6. Belousov N., Bichkov S., Marchuk Y. et al. The code GETERA for cell and polycell calculations. Models and capabilities.-Proc. of the 1992 Topical Meeting on Advances in Reactor Physics, March 8-11, 1992, Charleston, SC, USA.

К п. 3.4

1. Анашин В.С., Лебедев А.В., Попов В.Д., Скородумова А.В., Чубунов П.А., Шагурин И.И. Определение индивидуальных характеристик дозовой стойкости микроконтроллеров ATmega-128 экстраполяцией изменения критериальных параметров при низкоинтенсивном облучении в пределах малых доз. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2009. Вып. 1. С. 59-61.

2. Анашин В.С., Лебедев А.В., Попов В.Д., Скородумова А.В., Чубунов П.А., Шагурин И.И. Повышение срока функционирования резервиро-

ванной аппаратуры на базе микроконтроллеров ATmega-128 путем оптимизации режима переключения. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2009. Вып. 1. С. 55-58.

3. Анашин В.С., Лебедев А.В., Попов В.Д., Скородумова А.В., Чубунов П.А., Шагурин И.И. Определение стойкости к ионизирующим излучениям космического пространства в части дозовых эффектов микроконтроллеров LPC 2114 с использованием радиационно-термической обработки. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010. Вып. 4. С. 28-32.

4. Анашин В.С., Лебедев А.В., Попов В.Д., Скородумова А.В., Чубунов П.А., Шагурин И.И. Определение оптимальных характеристик переключения режима функционирования резервированной аппаратуры на базе микроконтроллеров LPC 2114 при воздействии ионизирующего излучения. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010. Вып. 2. С. 39-42.

5. Анашин В.С., Чубунов П.А. Методология построения рабочего места неразрушающего определения индивидуальных характеристик стойкости МОП ИМС к ионизирующим излучениям космического пространства в части дозовых эффектов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010. Вып. 2. С. 43-46.

6. Анашин В.С., Лебедев А.В., Радовский Н.Г., Чубунов П.А., Шагурин И.И. Исследование влияния радиационно-термической обработки на стойкость микроконтроллеров Atmega128 к ионизирующим излучениям космического пространства в части дозовых эффектов. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. Вып. 3. С. 58-63.

7. Анашин В.С., Чубунов П.А., Радовский Н.Г., Шагурин И.И., Лебедев А.В., Сурнин В.Н., Романенко А.А. Оценка сроков функционирования микроконтроллеров Atmega128 при совместных дозовых и температурных воздействиях. // Радиационная стойкость электронных систем «Стойкость-2011». М.: МИФИ, 2011. С. 61-63.

8. Анашин В.С., Чубунов П.А., Радовский Н.Г. и др. Исследование воздействия низкоинтенсивных ионизирующих излучений на электронную компонентную базу с использованием канала облучения на ИРТ МИФИ. // Ядерная физика и инжиниринг, 2012. Т. 3. № 3. С. 197.

9. Лебедев А.А., Орлова А.Ю., Попов В.Д. Роль эмиссии электронов в образовании поверхностных состояний в МОП-структуре при облучении гамма-лучами. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. Вып. 1. С.19-22.

10. Катеринич И.И., Попов В.Д., Чжо Ко Вин. Анализ изменения плотности поверхностных состояний в МОП-приборах при воздействии гамма-излучения в широком диапазоне мощностей дозы. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2012. Вып. 1. С. 43-45.

11. Попов В.Д., Никифорова М.Ю., Хамидуллина Н.М. Исследование точности измерения термодатчиков DS18B20 при воздействии низкоинтенсивного ионизирующего излучения. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2011. Вып. 2. С. 29-32.

12. Попов В.Д., Никифорова М.Ю., Хамидуллина Н.М. Влияние электрического режима функционирования на дозовую деградацию точности измерения датчиков температур DS18B20. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2012. Вып. 1. С. 64-65.

К п. 3.5

1. Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г. Активационные методы спектрометрии нейтронов. М.: Атомиздат, 1976.

2. Еремин А.Н., Камнев В.А., Трошин В.С. Метод определения скорости деления в детекторах нейтронов, содержащих ^{237}Np , ^{238}U , ^{235}U , ^{239}Pu по регистрации β -излучения осколков деления. // Материалы 3 Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Т. 2. М.: ЦНИИатоминформ, 1983. С. 104-107.

3. Камнев В.А., Трошин В.С. Сравнение скоростей активации детекторов с сечением, близким $1/v$. // Материалы 3 Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. Т. 2. М.: ЦНИИатоминформ, 1983. С. 35-39.

4. Брискман Б.А., Генералова В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. М.: Энергоатомиздат, 1985.

5. Волков К.В., Камнев В.А., Трошин В.С. Сравнение экспериментальных значений активационных интегралов некоторых пороговых реакций с расчетом по данным библиотек сечений. // Тезисы докладов 4 Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИатоминформ, 1985. С. 105-106.

6. Камнев В.А., Трошин В.С. Комплексная программа MIXER для восстановления спектра нейтронов при активационных измерениях. // Тезисы докладов 4 Всесоюзного совещания по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.: ЦНИИатоминформ, 1985. С. 37.

7. Лавренчик В.Н., Крамер-Агеев Е.А., Протасов В.С., Самосадный В.Т. Экспериментальные методы нейтронных исследований. М: Энергоатомиздат, 1990.

8. Дёмин В.М., Званцев А.А., Крамер-Агеев Е.А. и др. Экспериментально-расчётный метод преобразования энергетической функции смещений в функцию повреждений. // Атомная энергия, 1999. Т. 86. Вып. 3. С.195-198.

9. Камнев В.А., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Развитие и внедрение метрологических работ по спектрометрии реакторных нейтронов. // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 105-107.

10. Portnov A.A., Zaitsev K.N., Savkin V.A., Kvasov V.I., Liogenky A.A., Kamnev V.A., Sakharov V.K., Troshin V.S., Mishcherina O.V., Khokhlov V.F., Kulakov V.N., Sheino I.N., Mitin V.N. Specific features of implementation of a clinical base for neutron capture therapy of cancer at the IRT МЕРPhI reactor. // Proceedings of the 13th International Congress on Neutron Capture Therapy "A new option against cancer". Florence, Italy, 2-7 November, 2008. P. 435-438.

11. Камнев В.А., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Развитие работ по спектрометрии реакторных нейтронов. // Химическая и радиационная физика: (Космический вызов XXI века). Реферируемый сб. докладов Международной конференции «Химическая и радиационная физика» 25-29 августа 2009г. Президиум РАН. М.: ТОРУС ПРЕСС. 2011. Т.4. С. 455-458.

12. Зайцев К.Н., Камнев В.А., Сахаров В.К., Трошин В.С. Нейтронные характеристики терапевтического пучка ГЭК-4 ИРТ МИФИ. // Ядерная физика и инжиниринг. М.: ООО МАИК «Наука/Интерпериодика», 2012. Т. 3. №3. С. 224-228.

13. Дмитриев А.М., Зайцев К.Н., Камнев В.А., Трошин В.С. Применение нейтронно-активационных детекторов, содержащих диспрозий-164, для измерения эффективной плотности потока тепловых нейтронов. // Ядерная физика и инжиниринг. М.: ООО МАИК «Наука/Интерпериодика», 2012. Т. 3. №3. С. 209-214.

14. Дмитриев А.М., Зайцев К.Н., Камнев В.А., Трошин В.С. Ядерно-физические характеристики реакции $^{103}\text{Rh}(n,n')^{103\text{m}}\text{Rh}$. // Ядерная физика и инжиниринг. М.: ООО МАИК «Наука/Интерпериодика», 2012. Т. 3. №3. С. 215-223.

15. Ильченко И.Н., Былова Н.А., Фронтасьева М.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Горбунов А.В., Павлов С.С. и др. Концентрация тяжелых металлов в крови московских женщин и риск развития низкой массы тела. // Общественное здоровье и профилактика заболеваний, 2008. №2. С. 8-11.

16. Ilcshenko I., Bylova N., Frontasyeva M., Lyapunov S., Okina O., Gorbunov A., Pavlov S. Blood Concentrations of selected heavy metals in blood Moscow women with different nutritional status. // Brazilian Journal of Epide-

miology, Special issue, Livro de Resuomos of the XVIII IAEA World Congress of Epidemiology, 2008. P.2662.

17. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И. Использование микро-элементного состава волос в экологических и медицинских исследованиях. // Экология человека, 2009. № 4. С. 45-51.

18. Окина О.И., Горбунов А.В., Ляпунов С.М. Использование биосубстратов при оценке антропогенного воздействия элементов-токсикантов на здоровье человека.// Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. науч. трудов. Вып. 11. М.: РУДН, 2009. С. 118-120.

19. Горелова С.В., Песцов Г.В., Гинс М.С., Кононков П.Ф., Фронтасьева М.В., Ермакова Е.В., Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И. Биоаккумуляция химических элементов нетрадиционными овощными культурами на техногенно загрязненной территории Тульской области. // Агрохимия, 2009. № 9. С. 76-87.

20. Горелова С.В., Гарифзянов А.Р., Ляпунов С.М., Горбунов А.В., Окина О.И., Фронтасьева М.В. Оценка возможности использования древесных растений для биоиндикации и биомониторинга выбросов предприятий металлургической промышленности. // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии, 2010. №1(12). С. 155-163.

21. Окина О.И., Ляпунов С.М., Горбунов А.В. Распределение фтора и других микроэлементов в биосредах рабочих производства азотно-фосфорных удобрений. // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. науч. трудов. М.: РУДН, 2010. Вып.12. С. 294-296.

22. Ильченко И.Н., Н.А. Былова, Фронтасьева М.В., Ляпунов С.М., Горбунов А.В., Окина О.И., Павлов С.С., Куликова О.А., Арутюнов Г.П. Концентрации токсичных, потенциально токсичных и эссенциальных элементов в крови московских женщин и риск развития низкой массы тела (пилотное исследование). // Профилактическая медицина, 2010. Вып.1. № 7. С. 7-12.

23. Горбунов А.В., Окина О.И., Ляпунов С.М., Фронтасьева М.В. Поступление селена и йода в организм человека с различными рационами питания. // Экология человека, 2011. № 10. С. 3-8.

24. Окина О.И., Ляпунов С.М., Горбунов А.В., Ильченко И.Н. «Воздействие производств по переработке свинца с различными технологическими циклами на окружающую среду и непрофессиональное городское население». Экология и промышленность России. 2011, №12. С.50-54.

25. Окина О.И., Ляпунов С.М., Горбунов А.В., Ильченко И.Н. Микроэлементный состав биосубстратов человека в экологических исследованиях. // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. науч. трудов. М.: РУДН, 2011. Вып.13. Ч.1. С. 25-31.

26. Горбунов А.В., Окина О.И., Ляпунов С.М., Серегина И.Ф. Роль питьевой воды в обеспечении организма человека микроэлементами. // Экология человека, 2012. № 2. С. 3-8.

27. Gorbunov A.V., Frontasyeva M.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Pavlov S.S. Nuclear and Related Analytical Techniques in Ecology: Impact of Geoecological on the Balance of Trace Elements in the Human Organism. // Physics of Particles and Nuclei, 2012. V. 43. No.6. P. 783-824.

28. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И. Поступление мышьяка, кадмия, сурьмы, ртути и свинца в организм человека с различными рационами питания. // Экологические системы и приборы, 2012. № 12.

К п. 3.6

1. Khokhlov V.F., Yashkin P.N., Silin D.I., Kornienko V.N., Zaitsev K.N., Pronin I.N., Lawaczek R. Neutron capture therapy studies with Gd-complexes at the Moscow test thermal reactor. // Seventh International Symposium on neutron capture therapy for cancer. Zurich, 1996. P.78

2. Khokhlov V.F., V.L. Gozenbuk, Yashkin P.N., Silin D.I., Zaitsev K.N., Lawaczek R. Neutron capture therapy with Gd-complexes at the Moscow Research thermal reactor. // Elsevier Science B.V. Advances in NCT, Chemistry and Biology. B.Larsson, Y.Crawford and Weinreich, 1997. V. II. P. 447-450.

3. Зайцев К.Н., Квасов В.И., Портнов А.А., Хохлов В.В. О возможности определения концентрации бора-10 in vivo одновременно с проведением сеанса нейтрон-захватной терапии. // IV Международная конференция «Новые информационные технологии в медицине и экологии». Украина, Крым, Ялта, Гурзуф, 1998. Ч. 1. С.129-132.

4. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Сахаров В.К., Хохлов В.Ф. Модернизация конструкций внутриканальных устройств горизонтального касательного канала ГЭК-4 реактора ИРТ МИФИ для целей нейтрон-захватной терапии опухолей. VII Российская научная конференция. // Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Обнинск, 1998. С. 420-428

5. Khokhlov V.F., Shaks A.I. Gozenbuk V.L., Sheino I.N., Mazanov V.L., Zaitsev K.N., V.K. Sakharov, Lawaczek R. Dose distribution in gadolinium containing phantoms subsequent to irradiation with thermal neutrons. Eighth International Symposium on NCT for cancer. California, 1998. P.145

6. Khokhlov V.F., Koulakov V.N., Zaitsev K.N., Riaboukhine I.S., Yarmonenko S.P., Deineko O.P., Kornienko V.N. Russian project for NCT of malignant tumours in humans. // Eighth International Symposium on NCT for Cancer, California, 1998. P. 182.

7. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Koulakov V.N., Korotkevich A.O., Yarmonenko S.P., Mescherikova V.V. Gadolinium in thermal neutron capture

therapy of transplanted tumors. // European Radiation Research 98. The 29th Meeting of the European Society for Radiation Biology, Capri, 1998. P.108.

8. Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Зайцев К.Н., Портнов А.А. Способ нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2141860 от 27.11.1999.

9. Хохлов В.Ф., Зайцев К.Н., Квасов В.И., Портнов А.А., Савкин В.А., Сахаров В.К., Трошин В.С., Кулаков В.Н., Короткевич А.О., Шакс А.И., Мещерикова В.В., Корниенко В.Н., Брегадзе В.И. Разработка радиационной технологий лечения злокачественных опухолей на основе нейтрон-захватной терапии. //Инженерная физика, 2000. № 1. С. 52-55.

10. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Гимадова Т.И., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Вайнсон А.А., Мещерикова В.В., Митин В.И., Филиппова О.В. Российский проект создания центра нейтрон-захватной терапии на базе реактора МИФИ. // Материалы XII Междунар. научно-технич. конференции. Дмитровград, 2001. С. 96-99.

11. Вайнсон А.А., Т.И. Гимадова, Зайцев К.Н., Козловская Н.Г., Кулаков В.Н., Мещерикова В.В., Митин В.И., Портнов А.А., Савкин В.А., Сахаров В.К., Хохлов В.Ф., Шейно И.Н. Нейтрон-захватная терапия на ядерном реакторе МИФИ: первые опыты на собаках со спонтанной меланомой. // Тезисы докладов «Медицинская физика-2001». М.: МГУ, 2001. №11. Ч.1. С. 26-27.

12. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Савкин В.А., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Шейно И.Н., Вайнсон А.А., Козловская Н.Г., Мещерикова В.В., Митин В.И., Ярмоненко С.П. Нейтрон-захватная терапия тепловыми нейтронами на ИРТ МИФИ. // Атомная энергия, 2001. № 91. Вып.4, С. 307-314.

13. Зайцев К.Н., Квасов В.И., Портнов А.А., Савкин В.А., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Шейно И.Н., Вайнсон А.А., Козловская Н.Г., Мещерикова В.В., Митин В.И., Ярмоненко С.П. Нейтрон-захватная терапия тепловыми нейтронами на ядерном реакторе ИРТ МИФИ. // Инженерная физика, 2001. № 4. С. 43-51.

14. Khokhlov V.F., V.N. Koulakov, Zaitsev K.N., Riaboukhine I.S., Yarmonenko S.P., Deineko O.N., Kornienko V.N. The Russian project on neutron capture therapy for cancer. // Frontiers in Neutron Capture Therapy, ed. Hawthorn et.al. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New-York, 2001. V.1. P. 425-432

15. Khokhlov V.F., A.I. Shaks, V.L. Gosenbuk, I.N. Sheino, V.L. Mazanov, Zaitsev K.N., Sakharov V.K., Lawaczek K. Dose distribution in ¹⁵⁷Gd and ¹⁰B Containing phantoms subsequent to irradiation with thermal neutrons. // Frontiers in Neutron Capture Therapy, ed. Hawthorn et.al. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New-York, 2001. V.1. P.1195-1201.

16. Prokopiev E.P., Grafutin V.I., Timoshenkov S.P., Zaitsev K.N., Fun-
tikov Yu.V., Myasishcheva G.G., Ilyukhina O.V. Positronium in semiconduc-
tors and ionic crystals. // Abstracts of the 3rd International Conference “Nuclear
and Radiation Physics” (ICNPR-01) 4-7 June 2001. Almaty: Institute of Nucle-
ar Physics, Republic Kazakhstan, 2001. P.199-213.

17. Зайцев К.Н., Камнев В.А., Квасов В.И., Сахаров В.К., Трошин
В.С., Е.И. Григорьев, Хохлов В.Ф. Расчетно-экспериментальные исследо-
вания физических характеристик канала ГЭК-4 реактора ИРТ МИФИ. // *Материалы VIII Российской научной конференции «Радиационная защита и
радиационная безопасность в ядерных технологиях».* Обнинск, 2002. С.28.

18. Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Nasonova T.A., Portnov A.A., Zaitsev
K.N., Kvasov V.I., Alekseev K.P., Meshcherikova V.V., Klimova T.P. Com-
pounds with ^{10}B and Gd in the Russian NCT Project. // The 10th International
Congress on Neutron Capture Therapy. Essen, Germany, September 8-13,
2002. P. 107-110.

19. Khokhlov V.F., Kulakov V.N., Portnov A.A., Zaitsev K.N., Mitin
V.N., Kozlovskaya N.G., Meshcherikova V.V., Wainson A.A., Savkin V.A.,
Sheino I.N. Preclinical NCT Studies at the IRT MEPhI Reactor. // Essen, Ger-
many, September 8-13, 2002. P.769-773.

20. Zaitsev K.N., Portnov A.A., Mishcherina O.V., Kulakov V.N.,
Khokhlov V.F., Sheino I.N., Meshcherikova V.V., Mitin V.N., Kozlovskaya
N.G., Shikunova I.A. Neutron capture therapy at the MEPhI reactor. // Int. J.
Nuclear Energy Science and Technology, 2004. V. 1, No. 1. P. 83-101.

21. Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Portnov A.A., Zaitsev K.N., Mitin
V.N., Kozlovskaya N.G., Shikunova I.A. BNCT of spontaneous melanoma in
dogs. Clinical experimental study. //11th World Congress on Neutron Capture
Therapy – Abstracts. Boston, 2004. P.19.

22. Kvasov V.I., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Alekseev
K.P. Determination of gadolinium in biological material by neutron activation
analysis // 11th World Congress on Neutron Capture Therapy – Abstracts. Bos-
ton, 2004. P.28.

23. Kulakov V.N., I.N. Sheino, Khokhlov V.F., Portnov A.A., Zaitsev
K.N., Kvasov V.I., Alekseev K.P., Stepanov V.V., Nasonova T.A., Dobrynina
O.A. Experimental pharmacokinetic studies of Gd and ^{10}B -containing com-
pounds at the MEPhI reactor. //11th World Congress on Neutron Capture Ther-
apy – Abstracts. Boston, 2004. P. 39.

24. Khokhlov V.F., Portnov A.A., Zaitsev K.N., I.N. Sheino, Kulakov
V.N., R.P. Khatbekov, I.T. Tretiakov. Project of a medical NCT channel based
on the thermal column of the MEPhI reactor. //11th World Congress on Neutron
Capture Therapy – Abstracts, Boston, 2004. P. 44.

25. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Шейно
И.Н., В.Н. Митин, В.Н. Голдобин, О.В. Филиппова. Предклинические ис-

следования нейтрон-захватной терапии на ядерном реакторе МИФИ. // Юбилейный сборник, посвященный 50-летию создания Головного Центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора Федерального управления «Медбиоэкстрем». М., 2004. С. 106.

26. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Савкин В.А., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Шейно И.Н., Голдобин В.Н., Филиппова О.В. Радиационно-гигиеническая оценка облучательного бокса для проведения экспериментальных исследований по нейтрон-захватной терапии на реакторе ИРТ МИФИ. // Юбилейный сборник, посвященный 50-летию создания Головного Центра государственного санитарно-эпидемиологического надзора Федерального управления «Медбиоэкстрем». М., 2004. С. 110.

27. Зайцев К.Н., Квасов В.И., Липенгольц А.А., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Портнов А.А. Определение ^{10}B и Gd в биологических тканях нейтронно-активационными методами. // Российский биотерапевтический журнал, 2005. Т.4. № 1. С. 23-24.

28. В.Н. Митин, Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Портнов А.А., Зайцев К.Н., Козловская Н.Г., Шейно И.Н. Результаты предклинических исследований технологии нейтронно-захватной терапии на собаках со спонтанными злокачественными опухолями // Российский биотерапевтический журнал, 2005. Т. 4. № 1. С. 26.

29. Хохлов В.Ф., Портнов А.А., Зайцев К.Н., Сахаров В.К., Трошин В.С., Шейно И.Н., Кулаков В.Н. Создание первой в России базы для экспериментальных исследований в области нейтронно-захватной терапии рака на канале ГЭК-4 ядерного реактора ИРТ МИФИ, Всероссийская научно-практическая конференция. // Российский биотерапевтический журнал, 2005. Т. 4. № 1. С. 28.

30. Портнов А.А., Хохлов В.Ф., Зайцев К.Н., Сахаров В.К., Третьяков И.Т., Куатбеков Р.П., Хачересов Г.А. Проект создания клинической базы для нейтронно-захватной терапии рака на реакторе ИРТ МИФИ // Российский биотерапевтический журнал, 2005. Т.4. №1. С. 27-28.

31. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Хохлов В.Ф., Куатбеков Р.П., Третьяков И.Т., Хачересов Г.А. Создание медицинского канала для нейтрон-захватной терапии на реакторе ИРТ МИФИ. // II Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика–2005». М., 2005. С. 23-24.

32. Митин В.Н., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Козловская Н.Г., Шейно И.Н., Зайцев К.Н., Портнов А.А. Результаты предклинических исследований технологии нейтрон-захватной терапии на собаках со спонтанными злокачественными новообразованиями. / / II Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика–2005». М., 2005. С. 50-51.

33. Митин В.Н., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Зайцев К.Н., Портнов А.А., Швед В.С., Козловская Н.Г., Ягников С.А., Шейно И.Н. Реплантирование пораженной остеосаркомой кости, подвергнутой нейтрон-захватной терапии. // Российский ветеринарный журнал, 2005. №2. С. 5-9.

34. Mitin V.N., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Sheino I.N., Kozlovskaya N.G., Zaitsev K.N., Portnov A.A., Arnopolskaya A.M., Bass L.P., Nikolayeva O.V. GdNCT of Spontaneous Canine Melanoma. Advances In Neutron Capture Therapy // Proceedings of the 12th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2006. P.127-130.

35. Mitin V.N., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., I.N. Sheino, Bass L.P., Kozlovskaya N.G., Zaitsev K.N., Portnov A.A., Yagnikov S.A., Shirayev S.V.. BNCT of Canine Osteosarcoma. Advances In Neutron Capture Therapy – Proceedings of the 12th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2006. p.135-138

36. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Kvasov V.I., Lipengolts A.A., Minaev V.M., Portnov A.A. Neutron Activation Methods To Determine ^{10}B Concentrations In Biological Tissues At The MEFPhI Reactor. // Advances In Neutron Capture Therapy – Proceedings of the 12th International Congress on Neutron Capture Therapy, 2006. P.462-465.

37. Портнов А.А., Зайцев К.Н., Сахаров В.К., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н., Митин В.Н., Козловская Н.Г. Создание установки для реализации технологии нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей на ядерном реакторе ИРТ МИФИ. //Тезисы международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы в 21 веке». М.: ГУП НИКИЭТ, 2006. С. 51.

38. Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н., Ижевский П.В., Зайцев К.Н., Портнов А.А., Митин В.Н. Нейтрон-захватная терапия опухолей на ядерном реакторе. // II научно-практическая конференция «Актуальные вопросы онкологии и онкологической помощи в системе ФМБА России»: Сб. ст./ Под ред. чл.-корр. РАМН, проф. И.В. Решетова. М., 2006. С. 146-147.

39. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Сахаров В.К., Трошин В.С., Квасов В.И., Мищерина О.В., Липенгольц А.А., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н., Митин В.Н., Козловская Н.Г. Разработка технологии нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей на ядерном реакторе ИРТ МИФИ. // Инженерная физика, 2007. № 2. С.122.

40. Беляев В.Н., Зайцев К.Н., Квасов В.И., Липенгольц А.А., Минаев В.М., Портнов А.А., Зайцев О.В. Применение нейтронно-активационных методов при определении содержания ^{10}B в биоматериалах для целей нейтрон-захватной терапии. // Инженерная физика, 2007. № 2. С.141.

41. Митин В.Н., Кулаков В.Н., Арнопольская А.М., Козловская Н.Г., Хохлов В.Ф., Зайцев К.Н., Портнов А.А. Оценка эффективности нейтро-

нозахватной терапии при меланоме слизистой ротовой полости у собак. // Российский биотерапевтический журнал, 2007. №1. С. 85.

42. Арнопольская А.М., Митин В.Н., Кулаков В.Н., Козловская Н.Г., Хохлов В.Ф., Зайцев К.Н., Портнов А.А. Сравнительная оценка эффективности терапии спонтанной меланомы ротовой полости собак разными методами. // Российский биотерапевтический журнал, 2008. № 1. С. 34.

43. Mitin V.N., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., I.N. Sheino, Arnopolskaya A.M., Kozlovskaya N.G., Zaitsev K.N., Portnov A.A. Comparison of BNCT and GdNCT Efficacy in Treatment of Canine Cancer. // Proc. 13th International Congress on Neutron Capture Therapy. November 2-7, 2008, Florence, Italy. Proceedings. Edited by A.Zonta, S. Altieri, L.Roveda, R.Barth. 2008, ENEA, Italian National Agency for new Technologies, Energy and the Environment. P. 96-99.

44. Kulakov V.N., Lipengolts A.A., Khokhlov V.F., I.N. Sheino, Nasonova T.A., Portnov A.A., Zaitsev K.N., Kvasov V.I., Bregadze V.I., Sivayev I.B. Scheme of Screening Studies of New Compounds. // 13th International Congress on Neutron Capture Therapy. November 2-7, 2008, Florence, Italy. Proceedings. Edited by A.Zonta, S. Altieri, L.Roveda, R.Barth. 2008, ENEA, Italian National Agency for new Technologies, Energy and the Environment. P.202-205.

45. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Beliaev V.N., Kulakov V.N., Kvasov V.I., Lipengolts A.A., Portnov A.A. Prompt Gamma Activation Analysis of ¹⁰B and Gd in Biological Samples at the MEPhI Reactor. //13th International Congress on Neutron Capture Therapy. November 2-7, 2008, Florence, Italy. Proceedings. Edited by A.Zonta, S. Altieri, L.Roveda, R.Barth. 2008, ENEA, Italian National Agency for new Technologies, Energy and the Environment. P.415-417.

46. Portnov A.A., Zaitsev K.N., Savkin V.A., Kvasov V.I., Kamnev V.A., Liogenky A.A., Sakharov V.K., Troshin V.S., Mishcherina O.V., Khokhlov V.F., Kulakov V.N., Sheino I.N., Mitin V.N. Specific Features of Implementation of a Clinical Base for Neutron Capture Therapy of Cancer at the IRT MEPhI Reactor. // 13th International Congress on Neutron Capture Therapy. November 2-7, 2008, Florence, Italy. Proceedings. Edited by A.Zonta, S. Altieri, L.Roveda, R.Barth. 2008, ENEA, Italian National Agency for new Technologies, Energy and the Environment. P.435-438.

47. Арнопольская А.М., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н., Ижевский П.В., Зайцев К.Н., Портнов А.А., Козловская Н.Г., Митин В.Н., Ягников С.А. Нейтрон-захватная терапия опухолей на ядерном реакторе. //Сибирский онкологический журнал, 2009. С.15-16.

48. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Beliaev V.N., Kulakov V.N., Lipengolts A.A., Portnov A.A. Prompt gamma neutron activation analysis of ¹⁰B

and Gd in biological samples at the MEPhI reactor.// Applied Radiation and Isotopes, 2009. V. 67. Issue 7-8S. S251–S253.

49. Елютина А.С., Kiger III W.S., Портнов А.А., Сахаров В.К., Шейно И.Н., Иванов С.М. Использование программы NCTPlan для дозиметрического планирования нейтронно-захватной терапии на реакторе ИРТ МИФИ. // Медицинская физика, 2009. № 2. С.32-40.

50. Portnov A.A., Zaitsev K.N., Mishcherina O.V., Arnopolskaya A.M., Sakharov V.K., Troshin V.S., Ivanov S.M., Khokhlov V.F., Sheino I.N., Lipengolts A.A., Kulakov V.N., Sauerwein W. Creation of a Clinical Facility for NCT at MEPhI Research Nuclear Reactor. // New Challenges in Neutron Capture Therapy 2010 - Proceedings of 14th International Congress on Neutron Capture Therapy, Buenos Aires, Argentina. Edited by: Comisión Nacional de Energía Atómica, 2010. P. 375-378.

51. Хохлов В.Ф., Ижевский П.В., Кулаков В.Н., Шейно И.Н., Липенгольц А.А., Григорьева Е.Ю., Лукашина М.И., Зайцев К.Н., Портнов А.А. Влияние различных видов излучения на выживаемость культур опухолевых клеток. // Медицинские и экологические эффекты ионизирующего излучения: материалы V международной научно-практической конференции, посвященной 10-летию создания Северского научного биофизического центра ФМБА России. Томск: ООО «Графика», 2010. С. 209-210.

52. Липенгольц А.А., Федотов Ю.А., Зайцев К.Н., Серебряков А.С., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф. Определение дозсаплиментарных препаратов в биологических тканях. // Медицинская визуализация, 2010. (Специальный выпуск. Материалы IV Всероссийского Национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов. «Радиология-2010», Москва, 25-27 мая 2010 г.) С. 508-509.

53. Арнопольская А.М., Козловская Н.Г., Шейно И.Н., Портнов А.А., Зайцев К.Н., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н. Результаты доклинических исследований лечения спонтанной меланомы собак // Медицинская визуализация, 2010. (Специальный выпуск, Материалы IV Всероссийского национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов «Радиология 2010», Москва 2010, 25–27 мая) С. 31-32.

54. Зайцев К.Н., Портнов А.А., Сахаров В.К., Хохлов В.Ф., М.В. Щуровская. Оптимизация параметров пучков для нейтронно-захватной терапии на ядерном реакторе ИРТ МИФИ. // Медицинская физика, 2011. № 4. С. 5.

55. Зайцев К.Н., В.А. Камнев, Сахаров В.К., Трошин В.С. Нейтронные характеристики терапевтического пучка ГЭК-4 ИРТ МИФИ. // Ядерная физика и инжиниринг, 2012. Т. 3. № 3. С. 224.

56. Кулаков В.Н., Григорьева Е.Ю., Липенгольц А.А., Черепанов А.А., Хохлов В.Ф., Колдаева Е.Ю., Зайцев К.Н. Препараты для бинарной лучевой терапии. Состояние и перспективы. // Ядерная физика и инжиниринг, 2012. Т. 3. № 4. С. 313.

К п. 3.7

1. Беляев В.Н., Зайцев К.Н., Квасов В.И., Липенгольц А.А., Портнов А.А., Минаев В.М., Зайцев О.В. Применение нейтронно-активационных методов при определении содержания ^{10}B в биоматериалах для целей нейтрон-захватной терапии // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 141-144.

2. Mitin V.N., Kulakov V.N., Khokhlov V.F., Sheino I.N., Arnopolskaya A.M., Kozlovskaya N.G., Zaitsev K.N., Portnov A.A. Comparison of BNCT and GdNCT efficacy in treatment of canine cancer // J. Applied Radiation and Isotopes, 2009. V. 67. P. 299–301.

3. Зайцев К.Н., Квасов В.И., Липенгольц А.А., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Портнов А.А. Определение ^{10}B и Gd в биологических тканях нейтронно-активационными методами. // Российский биотерапевтический журнал, 2005. Т. 4. № 1. С. 23-24.

4. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Kvasov V.I., A.A.Lipengolts, Minaev V.M., Portnov A.A. Neutron Activation Methods To Determine ^{10}B Concentrations In Biological Tissues at the MEPHI Reactor // Proceeding of 12th International Congress on Neutron Capture Therapy “From the past to the future” (October 9-13, 2006, Takamatsu, Japan), 2006. P. 462-465.

5. Беляев В.Н., Зайцев К.Н., Квасов В.И., Липенгольц А.А., Портнов А.А., Минаев В.М., Зайцев О.В. Применение нейтронно-активационных методов при определении содержания ^{10}B в биоматериалах для целей нейтрон-захватной терапии // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 141-144.

6. Зайцев К.Н., Сахаров В.К., Трошин В.С., Квасов В.И., Савкин В.А., Мищерина О.В., Липенгольц А.А., Портнов А.А., Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н., Митин В.Н., Козловская Н.Г. Разработка технологии нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей и проведение предклинических исследований на ядерном реакторе ИРТ МИФИ // Инженерная физика, 2007. № 2. С. 122-140.

7. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Belyaev V.N., Kulakov V.N., Kvasov V.I., Lipengolts A.A., Portnov A.A. Prompt Gamma Neutron Activation Analysis of ^{10}B and Gd in Biological Samples at the MEPHI Reactor // Proceedings of 13th International Congress on Neutron Capture Therapy “A new option against cancer” (November 2-7, 2008, Florence, Italy). ENEA, 2008. P. 415-417.

8. Kulakov V.N., Lipengolts A.A., Khokhlov V.F., Sheino I.N., Nasonova T.A., Portnov A.A., Zaitsev K.N., Kvasov V.I., Bregadze V.I., Sivayev I.B. Scheme of Screening Studies of New Compounds // Proceedings of 13th International Congress on Neutron Capture Therapy “A new option against cancer” (November 2-7, 2008, Florence, Italy). ENEA, 2008. P. 202-205.
9. Khokhlov V.F., Zaitsev K.N., Beliayev V.N., Kulakov V.N., Lipengolts A.A., Portnov A.A. Prompt gamma neutron activation analysis of ^{10}B and Gd in biological samples at the MEPhI reactor // Applied Radiation and Isotopes, 2009. V. 67. Issue 7-8S.- S251–S253.
10. Хохлов В.Ф., Ижевский П.В., Кулаков В.Н., Липенгольц А.А., Слободяник И.И., Федотов Ю.А. Фармакокинетическая оценка препаратов для бинарной лучевой терапии в рамках скринингового исследования // Российский биотерапевтический журнал, 2009. № 1. Т. 8. С. 25.
11. Липенгольц А.А., Федотов Ю.А., Зайцев К.Н., Серебряков А.С., Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф. Определение дозсаплиментарных препаратов в биологических тканях // Медицинская визуализация, 2010. Специальный выпуск. С. 262-263.
12. Липенгольц А.А. Количественное определение ^{10}B и Gd в биологических пробах для нейтрон-захватной терапии на ядерном реакторе ИРТ МИФИ. Кандидатская диссертация. М., МИФИ, 2010.