

На правах рукописи  
УДК 574:539.1.04+621.039.7

Семенов Сергей Геннадьевич

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ И  
РЕАБИЛИТАЦИИ ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО-ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ НИЦ  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННО  
УПРАВЛЯЕМЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ

Специальность: 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая  
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание научной степени  
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена в Федеральном Государственном бюджетном учреждении Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

**Научный руководитель** доктор технических наук,  
профессор,  
**Штромбах Ярослав  
Игоревич**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук,  
зам.директора ИБРАЭ  
**Антипов Сергей  
Викторович**  
доктор технических наук,  
начальник лаборатории  
**Тутнов Игорь  
Александрович**

**Ведущая организация** **Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов (ВНИИНМ) им. Академика Бочвара А.А.**

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт»

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 520.009.06

д.т.н., профессор

Мадеев В. Г.



## ОБЩАЯ ХАРКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В 50<sup>х</sup>–80<sup>х</sup> годах прошлого столетия в НИЦ «Курчатовский институт» было создано 12 исследовательских реакторов и свыше 20 критических и подкритических ядерных стендов и других экспериментальных установок. Кроме того, на специально выделенной площадке Центра размещалось более 10 временных хранилищ радиоактивных отходов (РАО). Время эксплуатации большинства из перечисленных ядерно- и радиационно-опасных объектов (ЯРОО) Центра превышало тридцать и более лет. Актуальность работ по ликвидации или выводу из эксплуатации (ВЭ) этих объектов приобрела особую значимость, начиная с середины 90-х годов прошлого века, когда в Центре был остановлен самый мощный на территории Москвы исследовательский реактор МР, сооруженный в одном здании с ранее остановленным и частично демонтированным реактором РФТ. Все выше сказанное определяло необходимость развертывания в Центре работ по ликвидации ядерного и радиационного наследия, и в 2001-2002 годах такое решение было принято. Предстояло организовать и выполнить весь спектр работ по комплексному инженерно-радиационному обследованию объектов Центра, разработать концепции, на их основе проекты вывода из эксплуатации и осуществить эти проекты.

Необходимо отметить ряд обстоятельств, которые существенно осложняли данные работы:

- указанные ЯРОО располагались в непосредственной близости от густонаселенной городской жилой застройки, что создавало потенциальную опасность их радиационного воздействия на население и окружающую среду;

- практически ни по одному объекту не имелось в полном объеме исходных данных, которые позволили бы разработать оптимальный проект вывода его из эксплуатации;

- отсутствовал персонал, как собственный, так и возможных подрядных организаций, имевший практический опыт разработки проектов вывода из эксплуатации и реабилитации ядерно- и радиационно-опасных объектов, а также организации и проведения таких работ.

Допуская, что история создания, эксплуатации и прекращения работы ЯРОО, находящихся в исследовательских центрах России во многом аналогична истории объектов, имеющих в Курчатовском институте, можно предположить, что по многим из таких объектов не представлены в полном объеме исходные данные, необходимые для разработки проектов их реабилитации или вывода из эксплуатации, поэтому представлялось целесообразным разработать общие подходы при решении вопросов ликвидации или вывода этих объектов из эксплуатации и реабилитации их территории.

Учитывая комплексный характер проблемы, была сформулирована концепция создания специализированного комплекса для проведения всего спектра работ по ВЭ и ликвидации ЯРОО. Эта структура должна быть способна:

- провести полную характеристику находящихся на объекте РАО и ядерных материалов, как по физическому состоянию, так и по нуклидному составу;

- сформулировать техническое задание для создания проекта ВЭ или реабилитации объекта, участвовать как в разработке технических и технологических решений, так и в разработке соответствующих проектов;

- иметь максимально возможный набор методик и технологий для обращения с радиоактивными отходами, отработавшим топливом и ядерными материалами.

Кроме того, учитывая жесткие требования нормативных документов к величине индивидуальных дозовых нагрузок персонала, занятого на выполнении радиационно-

опасных работ, а также дефицит квалифицированного персонала, необходимо использовать технологии обращения с РАО, позволяющие снизить дозовые нагрузки, которые обусловлены как внешним облучением от радиоактивных объектов, так и внутренним за счет ингаляции радиоактивных аэрозолей, образуемых в зоне работ. Наилучшим образом этим требованиям отвечают технологии применения дистанционно управляемых средств, исключающие присутствие персонала непосредственно в зоне работ. То есть, комплекс должен быть оснащен широким спектром технических средств, включая дистанционно управляемые робототехнические механизмы (ДУМ), а также средства дистанционной радиационной диагностики – дозиметрии и спектрометрии.

Создание такого комплекса в НИЦ «Курчатовский институт» было начато в 2002 году и в 2002-2007 годах с его помощью на территории Центра были выполнены работы по ликвидации «исторических» хранилищ РАО, а с 2008 года в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности России на 2008 год и на период до 2015 года» (далее – ФЦП ЯРБ) была осуществлена подготовка и начаты работы по выводу из эксплуатации реакторов МР и РФТ.

В данной диссертационной работе рассмотрен один из существенных вопросов комплексного подхода к выводу из эксплуатации ЯРОО - разработке и практическому внедрению методов обращения с ОЯТ и РАО с использованием дистанционно управляемых робототехнических механизмов (ДУМ) при проведении работ по реабилитации и выводу из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов Центра.

#### **Цель работы:**

- Разработка требований к техническим характеристикам и технологическому оснащению ДУМ при обращении с РАО и ОЯТ, разработка рекомендаций по использованию этих механизмов применительно к условиям проведения работ по реабилитации радиационно-опасных объектов и выводу из эксплуатации исследовательских реакторов НИЦ «Курчатовский институт»;
- разработка и практическое внедрение методов применения ДУМ в работах по радиационному обследованию хранилищ РАО и радиоактивно загрязненного оборудования реакторов МР и РФТ;
- разработка и практическое внедрение методов применения ДУМ в работах по обращению с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), реабилитации радиационно-опасных объектов и выводу из эксплуатации реакторов МР и РФТ;
  - отработка и практическое внедрение методов демонтажа и фрагментации загрязненных строительных конструкций с использованием ДУМ;
  - отработка и практическое внедрение методов сортировки и упаковки РАО в транспортные контейнеры с использованием ДУМ.

#### **Научная новизна работы:**

В ходе работ получены следующие новые научные результаты:

- впервые сформулированы требования к техническим характеристикам и технологическому оснащению ДУМ применительно к условиям проведения работ по ликвидации временных хранилищ РАО и выводу из эксплуатации реакторов МР и РФТ НИЦ «Курчатовский институт», осуществлен выбор линейки ДУМ, требуемой для проведения указанных работ;
- на основе опыта применения ДУМ, полученного при реабилитации хранилищ РАО, разработаны технические требования к оснащению ДУМ новым навесным оборудованием

для производства работ по демонтажу реакторов, включая требования для создания более энерговооруженного робота-манипулятора; предложены и отработаны методы наведения ДУМ на интенсивно излучающие объекты;

- предложены и отработаны методы проведения радиационного обследования загрязненного оборудования и технологических помещений реакторов МР и РФТ с использованием ДУМ, результаты которых стали информационной базой для разработки проекта вывода из эксплуатации этих реакторов;

- предложены и отработаны технологии проведения демонтажных работ на реакторах МР и РФТ с использованием ДУМ, исключающие необходимость присутствия персонала в технологических помещениях с высоким уровнем мощности дозы  $\gamma$ -излучения;

- предложены и отработаны технологии сортировки РАО по удельной активности, создан стенд для характеристики и упаковки высокоактивных отходов в транспортные контейнеры.

### **Практическая значимость полученных результатов:**

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методы применения ДУМ были внедрены в НИЦ «Курчатовский институт» в практику работ по ликвидации «исторических» хранилищ РАО, использованы при разработке проекта вывода из эксплуатации реакторов МР и РФТ и в процессе проведения демонтажных работ на этих реакторах. Это позволило существенно снизить дозовые нагрузки на персонал, выполняющий работы.

Полученные результаты радиационного обследования систем, оборудования и помещений реактора МР и шахты реактора РФТ, выполненного с помощью ДУМ, послужили основой для разработки технических решений и выбора технологического оснащения для вывода из эксплуатации этих реакторов и были реально использованы в ходе проведения этих работ.

Разработаны и на практике успешно применены технологии извлечения, сортировки, фрагментации и упаковки высокоактивных РАО с помощью ДУМ. Разработанные технологии применялись в ходе подготовки МР к выводу из эксплуатации на стадии удаления ОЯТ из активной зоны реактора и при удалении облученных петлевых каналов из бассейна-хранилища и других мест их хранения. С помощью ДУМ выполнены работы по инвентаризации и сортировке конструкций высокоактивных петлевых каналов, позволившие их безопасно извлечь и удалить в специализированное хранилище Центра. С помощью ДУМ осуществлена фрагментация высокоактивного канала петлевой установки с жидкометаллическим теплоносителем для отделения части конструкции, содержащей ядерные материалы, что позволило выполнить эти работы безопасно и без присутствия персонала непосредственно в зоне работ.

Опыт создания стендов характеристики и фрагментации высокоактивных отходов с помощью дистанционно управляемых робототехнических средств и механизмов может быть полезен при работах на других радиационно-опасных объектах и исследовательских реакторах.

Предложенные и внедренные технологии обращения с РАО и ОЯТ с использованием ДУМ могут быть успешно реализованы в проектах реабилитации или вывода из эксплуатации других ЯРОО и применимы при работах в аварийных условиях.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработка концепции комплексного применения робототехнических средств в ходе проведения всего спектра работ по ВЭ и реабилитации ЯРОО.
2. Разработка и внедрение методов применения робототехнических средств при обследовании радиационно-опасных объектов, характеризации их загрязнения, включая технологии и методы обращения с отходами в процессе реабилитационных работ.
3. Разработка и внедрение методов идентификации и извлечения объектов, являющихся источниками  $\gamma$ -излучения, с помощью дистанционных методов регистрации этого излучения и дистанционно управляемых механизмов.
4. Разработка методов демонтажа радиоактивно загрязненного оборудования исследовательского реактора МР и его петлевых установок в условиях высоких уровней загрязнения и насыщенности оборудования в технологических помещениях и рекомендации по практическому применению разработанных методов.
5. Результаты практического применения разработанных методов в работах по обследованию и ликвидации хранилищ высокоактивных отходов, омоноличенных высокопрочным бетоном.
6. Разработка и внедрение технологии сортировки радиоактивных отходов по уровню активности, позволяющей определять тип транспортной упаковки для отправки РАО на длительное хранение, оптимизировать наполнение транспортных контейнеров, а также снизить дозы облучения персонала при обращении с РАО.
7. Принципы организации работ с применением разработанных методов и технологий, позволившие минимизировать время нахождения персонала в зонах производства радиационно-опасных работ и обеспечить ему необходимую радиационную защиту и радиационную безопасность при выполнении этих работ.

Разработанные и отработанные в процессе выполнения практических работ по ликвидации хранилищ РАО и выводу из эксплуатации реакторов МР и РФТ методы и технологии, основанные на применении дистанционно управляемых робототехнических механизмов, показали высокую эффективность при решении проблемы необходимого снижения дозовых нагрузок на персонал, что позволяет достаточно обоснованно рекомендовать их применение при проведении аналогичных работ на других ядерных и радиационно-опасных объектах.

### **Апробация работы.**

Основные результаты выполненных исследований неоднократно докладывались на различных российских и международных симпозиумах и конференциях, таких как:

- International Symposium on Waste Management (WM'04), Tuscon, Arizona, USA, 29 February – 4 March 2004;
- 7-ая Международная конференция «Безопасность ядерных технологий: Обращение с РАО». 27 сентября – 1 октября 2004 г., Санкт-Петербург, Россия;
- XI Международный экологический симпозиум «Урал атомный, Урал промышленный», Екатеринбург, 2005;
- International Symposium on Waste Management (WM'05), Tuscon, Arizona, USA, 25 February – 1 March 2005;
- 8-ая Международная конференция «Безопасность ядерных технологий: Экономика и обращение с источниками ионизирующих излучений. 2005 г., Санкт-Петербург, Россия;
- Международная конференция ICSEM'05/DECM'05, 2005, Глазго, Шотландия;
- International Symposium on Waste Management (WM'06), Tucson, Arizona, USA, 26 February – 2 March 2006;
- Международная конференция «Двадцать лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в

будущее», Киев, Украина;

- Международный ядерный форум, 2007 г., Санкт-Петербург;
  - The 11th Intern. Confer. on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM –07. 2007. Bruges (Brugge), Belgium
  - International Conference “Radioecology & Environmental Radioactivity”, Bergen, Norway, 2008;
  - International Conference “Decommissioning challenges: an Industrial Reality?”, Avignon, France, 2008;
  - III Международный ядерный форум, 2008 г., Санкт-Петербург;
  - 12<sup>th</sup> International Conference On Environmental Remediation and radioactive Waste Management, ICEM’09/DECOM’09, 2009, Liverpool, UK;
  - International Symposium on Waste Management (WM’09), Phenix, Arizona, USA, 1–5 March 2009;
  - International Conference «Research Reactors Fuel Management», Morocco, 2010;
  - 4-ая Международная конференция и выставка «АтомЭко 2010», Москва, Россия, 2010;
  - European Nuclear Conference, ENC 2010, Barcelona, Spain, 2010;
  - European Research Reactors Conference Research Reactor Fuel Management, Rome, Italy, 2011;
  - 5-ая Международная выставка и конференция «АтомЭко-2011», Москва, Россия, 2011;
  - International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization, 2011, Rabat, Morocco;
  - International Symposium on Waste Management (WM’12), Phenix, Arizona, USA, 27 February – 2 March 2012;
  - European Research Reactors Conference IGORR, Prague, Czech Republic, 2012,
- а также были доложены на заседании Научно-Технического совета научно-технологического комплекса «Реабилитация».

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 66 печатных трудах, из них 26 статей в научных журналах (21 статья в журналах, рекомендованных ВАК для защиты кандидатских диссертаций) и 40 публикаций в виде докладов в материалах российских и международных конференций.

### **Личный вклад**

Автор самостоятельно провел настоящее исследование – от обзора литературы по проблеме до изложения положений, технологий, выводов и оценки результатов диссертационной работы. Осуществлял организацию и непосредственно участвовал во всех представленных в диссертации научных экспериментах и практических работах, связанных с ликвидацией в НИЦ «Курчатовский институт» временных хранилищ РАО, радиационным обследованием реакторов МР и РФТ, выполнением измерений и расчетных оценок, формулировкой итоговых выводов и результатов проведенных работ, представленных в виде отчетных материалов, статей, докладов и презентаций.

При непосредственном участии автора получены следующие наиболее существенные результаты:

- обоснован выбор дистанционно управляемых робототехнических механизмов производства шведской фирмы «Brock», выбор технологического оснащения этих ДУМ и их применение для условий проводимых на территории НИЦ «Курчатовский институт» работ. Разработаны и практически внедрены методы применения ДУМ при работах по ликвидации временных хранилищ РАО. Предложены и практически реализованы методы демонтажа монолитных высокопрочным бетонным раствором хранилищ с помощью



указанных робототехнических средств. Предложены технологии извлечения, сортировки, фрагментации и упаковки пеналов с высокоактивными отходами. Создан стенд для выполнения этих работ;

- организовано и при непосредственном участии проведено радиационное обследование реактора МР и оборудования его девяти петлевых установок (~500 единиц оборудования) и реактора РФТ с использованием методов дистанционной диагностики;

- предложены и практически внедрены методы демонтажа и фрагментации с применением ДУМ оборудования и систем реакторов МР и РФТ в процессе вывода их из эксплуатации;

- созданы экспериментальные стенды для сортировки фрагментов демонтированного оборудования и конструкций петлевых каналов по уровню суммарной активности и результатам измерений распределения активности по длине фрагментов;

- предложены и практически внедрены методы демонтажа и фрагментации загрязненных строительных конструкций с использованием ДУМ.

**Достоверность и обоснованность выводов** и рекомендаций подтверждена представительным объемом практических результатов, применением современных методов их обработки и интерпретации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 125 наименований. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, включающего 47 рисунков и 10 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрывается актуальность темы диссертации, изложены основные цели и задачи диссертации, показана их практическая значимость, представлена структура диссертации и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору применения при радиационно-опасных работах дистанционно управляемых робототехнических механизмов и методов дистанционной диагностики радиационной обстановки. Представлены результаты анализа использования ДУМ производства российских предприятий и иностранных фирм в работах по реабилитации радиационно-опасных объектов и выводу из эксплуатации исследовательских реакторов. Показано, что определенный вклад в интенсификацию создания таких средств внесла необходимость проведения работ во вредных условиях, а также необходимость обращения с вредными веществами в специальных камерах с помощью копирующих манипуляторов. Атомная промышленность является одной из основных областей применения дистанционных и автоматических робототехнических устройств. Широкое внедрение робототехнических средств в эту область объясняется несколькими основными причинами.

Во-первых, это позволяет физически защитить персонал от радиационной опасности. Фактически уже первые эксперименты с радиоактивными материалами вызвали необходимость использования дистанционных устройств. В атомной промышленности технологические манипуляторы используются в горячих камерах при работах с радиоактивными изотопами и делящимися веществами. В дальнейшем функциональные возможности таких устройств все более расширялись благодаря успехам в компьютерной технике и микроэлектронике, обеспечивая, тем самым, возможность работы с более сложным оборудованием.

Во-вторых, обеспечение дистанционных систем возможностью реагирования на неожиданные и критические ситуации позволяет использовать их для наблюдательных и восстановительных работ в послеаварийных ситуациях, подобных тем, которые имели место на АЭС Three Mile Island – 2 в 1979 г., в Чернобыле в 1986 г. и на АЭС Фукусима-1 в 2011 г.

Наконец, внедрение робототехнических средств позволяет повысить эффективность и радиологическую защищенность проведения работ на объектах атомной промышленности.

В настоящее время все более широкое распространение в работах по реабилитации и ликвидации радиационного наследия в различных странах получают мобильные (подвижные) дистанционно управляемые средства, обладающие широким спектром функциональных возможностей. При выполнении проектов реабилитации радиационно-опасных объектов и вывода из эксплуатации исследовательских реакторов компьютерные технологии и дистанционно управляемые мобильные механизмы могут применяться на всех стадиях выполнения работ, начиная с подготовки и кончая завершающим протоколированием результатов.

На стадии подготовки объекта к выводу из эксплуатации дистанционно управляемые механизмы используются для сбора первичной информации об объекте, что может включать:

- измерение геометрии объекта с помощью 3D сканеров для создания его 3D модели, как основы дальнейшего наполнения баз и визуализации данных о радиационной обстановке, инженерном состоянии объекта, состоянии вспомогательных систем, обеспечивающих выполнение работ по проекту;

- измерение радиационной обстановки в отдельных помещениях и на объекте в целом, уровней загрязнения оборудования, прилегающих территорий, что используется при разработке проекта для оценки объемов радиоактивных отходов, оценки их удельной или объемной активности, моделировании воздействия на персонал и окружающую среду;

- компьютерное моделирование демонтажа отдельных узлов и оборудования, методов обращения с радиоактивными отходами, создание тренажеров и стендов для обучения персонала, определения последовательности действий и отработки сложных технологических операций;

- проведение операций по обращению с отработавшим ядерным топливом и удалению его из активных зон и хранилищ, паспортизации высокоактивного оборудования и источников ионизирующего излучения;

- отбор образцов и проб в труднодоступных местах и в зонах высокого радиоактивного загрязнения.

При работах по проектам реабилитации или вывода из эксплуатации ЯРОО дистанционно управляемые механизмы выполняют работы по демонтажу оборудования, разрушению строительных конструкций, разборке активных зон и удалению высокоактивных источников, сортировке радиоактивных отходов, их упаковке и транспортированию. При выполнении этих работ следует предусматривать, наряду с использованием дистанционно управляемых механизмов, применение систем идентификации и локализации интенсивно излучающих радиоактивных объектов и источников, к которым относятся системы – «Гамма-локатор» и «Гаммавизор». «Гамма-локатор» представляет собой коллимированный спектрометрический детектор, установленный на сканирующем устройстве и управляемый компьютером, в который поступают данные с его измерительных датчиков. В результате компьютерной обработки данных система позволяет измерять спектры  $\gamma$ -излучения объекта в угле коллимации, определять нуклидный состав загрязнения, и регистрировать видео изображения излучающего объекта. «Гаммавизор» - система, предназначенная для дистанционного

обнаружения и визуализации мощных гамма-излучающих радиоактивных источников. Полученное  $\gamma$ -изображение объекта накладывается на его видимое изображение и позволяет идентифицировать излучающий объект, данные интегрируются в общую систему и передаются на экран монитора оператора ДУМ.

**Вторая глава** посвящена анализу применения дистанционно управляемых механизмов на ядерно- и радиационно-опасных объектах, на основе которого были сформулированы требования к ним:

- возможность дистанционной замены рабочего инструмента;
- возможность замены основных узлов и агрегатов без детальной разборки вручную;
- применение быстросъемных разъемов;
- использование электромеханических и релейных систем управления с минимальным количеством электроники и только в радиационно-защищенном исполнении;
- отсутствие в конструкции труднодоступных полостей и мест накопления на инструменте радиоактивных веществ в опасных количествах.
- возможность дезактивации от радиоактивного загрязнения;

При работе в высоких радиационных полях необходимо обеспечить контроль радиационной обстановки и управление робототехническими механизмами с помощью видеоизображения места проведения работ и обследуемых, либо удаляемых объектов. Кроме того, должна применяться дополнительная защита органов управления и контроля механизмов, дистанционно управляемых персоналом, с целью максимального уменьшения воздействия радиоактивного излучения на эти органы.

Технологическими операциями, которые целесообразно или необходимо выполнять с применением дистанционно управляемых механизмов, являются следующие:

- радиационное обследование загрязненного объекта и прилегающих к нему территорий. Радиационное обследование требует проведения большого числа однотипных измерений, чтобы на основе полученных данных создать базу по уровням загрязнения объекта, которая в дальнейшем будет использоваться при производстве работ.

- проведение измерений для характеристики радиоактивных отходов по уровню активности. В этих работах робототехнические средства выполняют вспомогательную роль носителя измерительного оборудования, а состав и технические параметры измерительных систем в целом зависят от задач и объекта радиационного обследования. Подобные измерения и измерительные системы являются в данном случае отдельными самостоятельными научными проблемами, решению которых для конкретных работ, выполненных в ходе реабилитации радиационно-опасных объектов и вывода из эксплуатации исследовательских реакторов, уделено особое место.

Помимо радиационного обследования, применение ДУМ незаменимо при выполнении работ в условиях высокого уровня мощности эквивалентной дозы, где персонал может находиться ограниченное время. К таким работам относятся работы по ликвидации хранилищ РАО, содержащих средне и высокоактивные отходы, включенных в бетонную матрицу для исключения распространения радионуклидов в окружающую среду. Для выполнения этих работ требуется разработка и изготовление систем наведения роботоманипуляторов на излучающие объекты и высокоактивные источники, разработка методов и создание систем сортировки объектов по уровням активности и т.д.

И, наконец, при работах по демонтажу загрязненного оборудования в ходе вывода из эксплуатации исследовательских реакторов применение дистанционно управляемых механизмов весьма эффективно за счет высокой энерговооруженности и существенно большей производительности труда.

Во второй главе также рассмотрены особенности конкретных дистанционно

управляемых механизмов, которые были задействованы в работах по ликвидации временных хранилищ РАО и выводу из эксплуатации исследовательских реакторов на территории НИЦ «Курчатовский институт».

В частности, методы дистанционной диагностики радиационной обстановки и технологии использования дистанционно управляемых механизмов были применены при ликвидации хранилищ, содержащих высоко- и среднеактивные отходы. Радиационная разведка проводилась с помощью дистанционно-управляемого мобильного средства, оснащенного приборами радиационной разведки и мониторинга РТС МРК-25(27), разработанного СКТБ ПР при МГТУ им. Н.Э. Баумана. С использованием данного средства возможно проведение измерений значений МЭД, а также поиск и локализация точечных радиоактивных источников.

В работах по демонтажу конструкций хранилищ и исследовательских реакторов применялись робототехнические средства «Brokk». Выбор ДУМ именно этого производителя был обусловлен рядом причин. Во-первых, фирма выпускает внушительный модельный ряд механизмов – от небольших аппаратов типа «Brokk-50» или «Brokk-90», которые могут быть использованы для радиационной разведки, до мощных, энергоемких «Brokk-330» и «Brokk-400». Во-вторых, эта техника обладает хорошим ресурсом и показала весьма высокую наработку на отказ (надежность) при использовании во вредных производствах, в частности, при ремонте цементных или металлургических печей. В-третьих, для каждого робота из выпускаемого модельного ряда имеется широкий спектр навесного оборудования, а сами механизмы оснащены универсальным быстросъемным разъемом, позволяющим производить замену навесного оборудования дистанционно, без непосредственного участия оператора.

**В третьей главе** представлены разработанные методы и технологии применения ДУМ при работах на хранилищах РАО и других радиационно-опасных объектах НИЦ «Курчатовский институт».

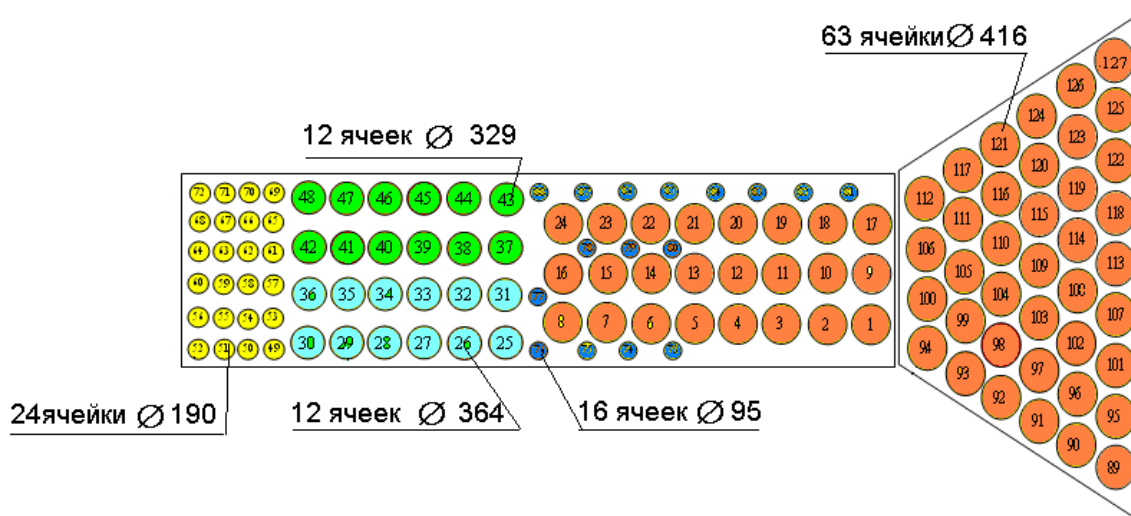
Высокие уровни облучения могли возникать при выполнении таких работ, как:

- радиационное обследование и инвентаризация хранилищ, содержащих высокоактивные отходы (ВАО);
- фрагментация и сортировка радиоактивных отходов;
- упаковка и удаление высокоактивных отходов;
- демонтаж конструкций хранилищ ВАО.

На основе данных радиационного обследования были оценены мощности эквивалентной дозы в зонах работ на этих объектах. Оценки показали, что значения МЭД  $\gamma$ -излучения на расстоянии 1 м от излучающих объектов могли достигать 0,1- 0,3 Зв/ч. Такие дозовые условия существенно ограничивали время работы персонала, что привело бы к увеличению или сроков выполнения работ, или численности занятого персонала, поэтому были разработаны проекты производства работ (ППР), предусматривающие использование ДУМ практически на всех этапах производства работ. Используемые робототехнические средства необходимо было оснастить системами видеонаблюдения, дистанционными системами контроля радиационной обстановки, дистанционными системами наведения ДУМ на высокоактивные источники излучения, а сами хранилища оборудовать специальными стендами сортировки и фрагментации излучающих объектов. Эти задачи потребовали разработки не только всех указанных выше систем, но и методов их комплексного применения в сложных радиационных условиях.

Дистанционные методы измерений и технологии использования дистанционно управляемых механизмов, которые были разработаны и применены при инвентаризации содержимого хранилищ РАО, представлены на примере действующего хранилища,

предназначенного для временного хранения ВАО, относящихся к группе «р» - реакторные. Хранилище высокоактивных отходов размещено на площадке реактора МР и представляет собой заглубленный в землю бетонный монолит, в котором установлены стальные каналы глубиной 4 м (ячейки хранилища) в количестве 127 штук. Схема расположения ячеек хранилища ВАО приведена на Рис. 1.



**Рис.1. Схема расположения ячеек хранилища ВАО.**

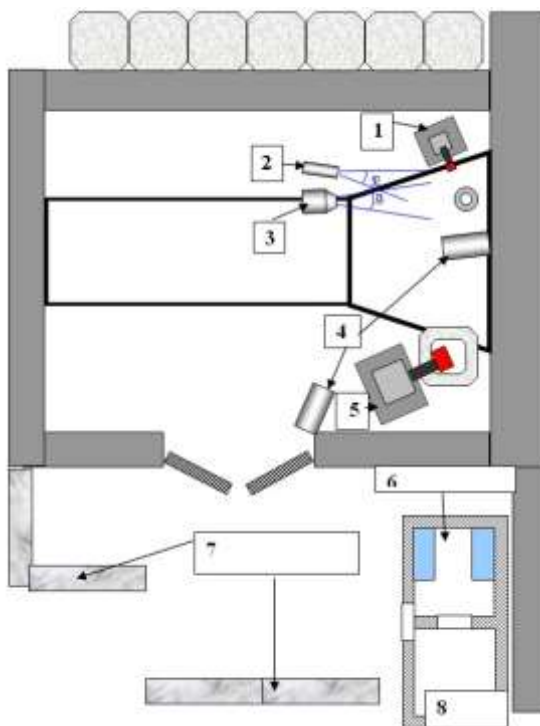
До начала проведения работ хранилище было оборудовано защитным сооружением, стены которого выполнены из бетонных блоков толщиной 600 мм, а верхнее перекрытие - из бетонных плит толщиной 170 – 200 мм, обеспечивающих биологическую защиту при обращении с высокоактивными пенами, а также съёмной металлической кровлей для защиты от атмосферных осадков.

Обследование содержимого ячеек хранилища выполнялось в соответствии с проектом работ, предусматривающим извлечение пеналов из ячеек и измерение распределения активности по длине пенала. ДУМ использовались для извлечения пеналов из ячеек, проведения измерений и упаковки низко- и средне активных отходов в контейнеры. Процесс измерений и управление ДУМ осуществлялось персоналом, располагавшимся вне помещения хранилища за радиационной защитой. Контроль операций осуществлялся с помощью стационарной видеосистемы, измерения выполнялись дистанционными методами определения спектральных характеристик гамма-излучения пеналов, распределения активности и локальной мощности дозы по длине пенала, системами получения  $\gamma$ -изображений излучающих объектов.

Работы предусматривали постоянный дозиметрический контроль и контроль объемной активности воздуха вне и внутри защитных сооружений при выполнении всей технологической последовательности операций:

- маркировке пеналов и оформлении паспорта пенала, с указанием номера пенала, номера ячейки, где он был расположен, куда перемещается, радиационных характеристик, веса;
- взвешивании пеналов;
- определении радиометрических и спектрометрических характеристик отходов, размещенных в пеналах.

В качестве примера можно привести процедуру инвентаризации пеналов с высокоактивными отходами. Схема расположения оборудования представлена на Рис. 2.



1 – радиометрическая система «Гамма-пионер»; 2 – «Гаммавизор»; 3 – спектрометрический коллимированный детектор; 4 – ТВ камеры; 5 – ДУМ «Brokk-330»; 6 – пультовая операторов; 7 – лабиринт; 8 – местонахождение персонала.

**Рис.2. Схема расположения измерительного оборудования в хранилище ВАО.**

Пенал с высокоактивными отходами извлекался из ячейки хранилища, доставлялся к измерительному оборудованию и медленно опускался в специально выбранную свободную ячейку хранилища (№122) для сканирования его радиационных параметров по длине. Измерительные системы «Гамма-локатор» и «Гаммавизор» устанавливались на расстоянии 4,5 м от ячейки. Радиометрическая система «Гамма-пионер» – коллимированный детектор, установленный на дистанционно-управляемое робототехническое средство «Brokk-90», располагался на расстоянии 0,5 м от ячейки. После измерений в зависимости от результатов измерения пенал перемещался в свободную ячейку, либо фрагментировался и упаковывался с помощью ДУМ «Brokk-330» в транспортный контейнер (КРАД, НЗК) для удаления на полигон ГУП МосНПО «Радон».

Процесс измерений с помощью комплекса «Гамма-пионер» представлен на Рис. 3.

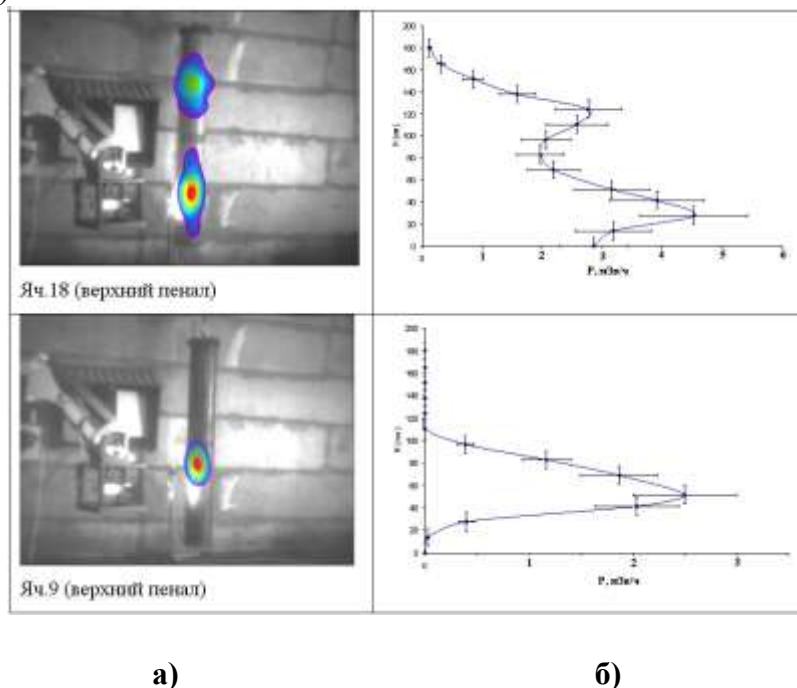


**Рис. 3. Процесс сканирования пеналов с высокоактивными отходами, представленный на экране радиометрической системы «Гамма-пионер».**

Для измерений распределения потока излучения по длине пеналов использовались «Гаммавизор» и радиометрическая система «Гамма-пионер». С помощью «Гаммавизора»

получали  $\gamma$ -изображение пенала, совмещенное с его видео изображением. Полученные  $\gamma$ -изображения пеналов указывали, что распределение интенсивности  $\gamma$ -излучения по длине пеналов, как правило, сильно неравномерно. Радиометрическая система «Гамма-пионер» применялась для количественных измерений потока излучения.

На Рис.4. приведены результаты сканирования пеналов:  $\gamma$ -изображения, полученные «Гаммавизором» (а) и графики распределения мощности эквивалентной дозы в телесном угле коллиматора по длине пеналов, построенные по данным измерений комплекса «Гамма- пионер» (б).



**Рис.4. Результаты измерений распределения потока  $\gamma$ -излучения по длине пеналов, полученные «Гаммавизором» (а) и системой «Гамма-пионер» (б).**

При транспортировке твердых радиоактивных отходов должны выполняться нормы радиационной безопасности, которыми регламентированы предельно допустимые значения мощности дозы на расстояниях 10 и 100 см от стенок транспортного контейнера. Мощность дозы  $\gamma$ -излучения на этих расстояниях не должна превышать значений  $1\text{мЗв/ч}$  и  $0,1\text{мЗв/ч}$ . Поэтому основной задачей при загрузке контейнеров является использование технологии сортировки и заполнения контейнеров РАО, обеспечивающей, с одной стороны, выполнение норм радиационной безопасности, а, с другой стороны, минимизирующей радиационную нагрузку на обслуживающий персонал при выполнении этих работ.

Основной задачей сортировки радиоактивных отходов является определение типа контейнера, в который должна попасть очередная порция отходов.

Для этих реализации этих целей были разработаны две процедуры:

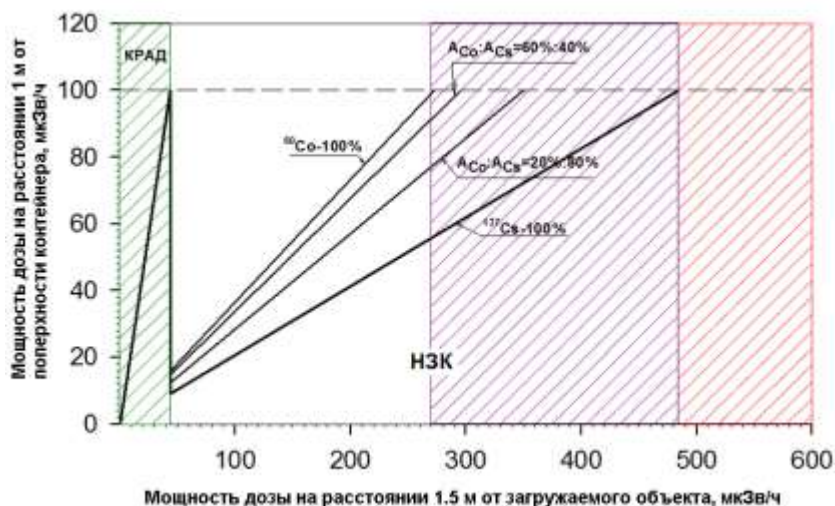
- определение состава радионуклидов в отходах;
- измерение мощности дозы на определенном расстоянии от перегружаемой порции отходов.

Для транспортировки РАО используются два типа контейнеров: металлический контейнер (типа КРАД и КМЗ) и бетонный контейнер (типа НЗК). Последний тип контейнера допускает модификации, предназначенные для усиления защиты при загрузке высокоактивных отходов.

В соответствии с нормативами, МЭД на расстоянии 1м от поверхности контейнера не должна превышать предельно допустимого значения, т.е.  $100\text{мкЗв/ч}$ . Для оценки

радиационной обстановки на расстоянии 1 м от поверхности контейнера с помощью программы MicroShield были проведены расчетные оценки мощности дозы на расстоянии 1,5 м от загружаемого объекта.

На Рис.5 представлена номограмма для определения мощности эквивалентной дозы, создаваемой образцом РАО на 1 м от стенки контейнера КРАД или НЗК для различного состава  $\gamma$ -излучающих нуклидов. Эта номограмма предназначена для оценки самой неблагоприятной ситуации, когда образец РАО при загрузке контейнера оказывается расположенным вблизи внутренней стенки контейнера.



**Рис. 5. Номограмма для оценки мощности эквивалентной дозы, создаваемой образцом РАО на 1 м от поверхности контейнера.**

Упаковка пеналов в контейнер также осуществлялась с применением ДУМ. Пенал помещался в контейнер с помощью гидрожниц ДУМ «Brokk-330», при необходимости контроля этой операции использовался ДУМ «Brokk-90», оснащенный измерительной системой «Гамма-пионер». На Рис.6 показан момент размещения пенала в контейнер с помощью робототехнического средства «Brokk-330».



**Рис. 6. Упаковка пеналов в транспортные контейнеры с помощью ДУМ «Brokk-330».**

После загрузки контейнер закрывался крышкой и перемещался на площадку временного хранения (здание №94).

В результате проведена инвентаризация ячеек действующего хранилища ВАО, выполнена характеристика пеналов, находящихся в ячейках. Содержимое пеналов разделено на три группы по мощности дозы  $\gamma$ -излучения от пеналов на расстоянии 1 м. В соответствии с разбиением содержимого на три группы разработан порядок оптимальной перегрузки РАО, хранящихся в ячейках хранилища, с целью высвобождения наибольшего



количества ячеек для последующей загрузки в них РАО, образующихся при демонтаже реакторов МР и РФТ.

Аналогичным примером, когда радиационные условия не допускали присутствия персонала в зонах работ, явились работы по ликвидации хранилища № 4 на территории НИЦ «Курчатовский институт». Хранилище представляло собой сплошной бетонный блок, внутри которого размещались пеналы с высокоактивными отходами, особую опасность представляло наличие в них трансурановых элементов. Диапазон значений удельных активностей некоторых характерных радионуклидов представлен в Таблице 1.

**Таблица 1. Удельная активность отобранных проб отходов, Бк/кг**

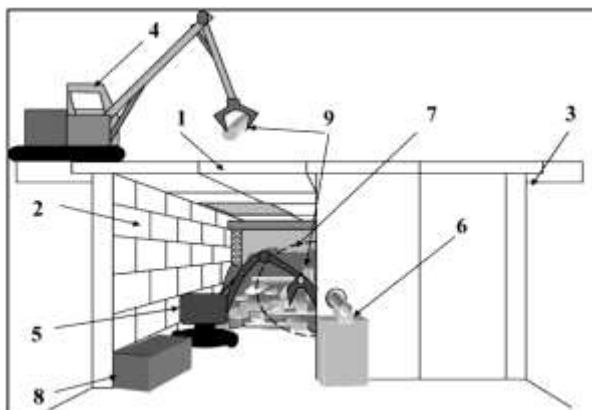
Нуклид	$^{60}\text{Co}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{154}\text{Eu}$	$\Sigma \text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
Уд.акт.	$2,0 \cdot 10^1 \div 1,5 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^4 \div 2,6 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^4 \div 8,7 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^1 \div 1,5 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^3 \div 1,7 \cdot 10^7$	$8,0 \cdot 10^1 \div 5,2 \cdot 10^7$
МЗУА	$1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^3$	$1,0 \times 10^3$

Были созданы временные сооружения для защиты персонала и населения близлежащего микрорайона от ионизирующего излучения. Для въезда ДУМ эти сооружения имели специальный пандус с лабиринтом в качестве теневой защиты.

Разрушение массива хранилища осуществлялось через проемы в верхнем перекрытии радиационной защиты (см. Рис. 7). В случае выявления в развале хранилища пеналов с высокоактивными отходами и ухудшения радиационной обстановки производилось полное восстановление верхнего перекрытия внешней радиационной защиты.

Разработанные методы обращения с РАО предусматривали, что вся последовательность операций по фрагментации крупных частей монолитного массива хранилища, извлечению высокоактивных отходов и их фрагментов, сортировке, упаковке в контейнеры производилась робототехническими средствами внутри специально сооруженного защитного сооружения. Контроль выполнения операций осуществлялся через видеокамеры, для идентификации высокоактивных источников и пеналов использовался «Гаммавизор».

Оперативный персонал в процессе работ находился вне радиационной защиты, контроль аэрозольной активности проводился как в зоне работ, так и местах расположения оперативного персонала.



**1 – плиты теневой радиационной защиты; 2 – боковые стенки защиты; 3 – уровень земли; 4 – экскаватор для разрушения бетона и извлечения низкоактивных отходов; 5 – дистанционно управляемое средство «Brokk»; 6 – «Гаммавизор»; 7 – поле зрения «Гаммавизора»; 8 – контейнер; 9 – радиоактивные отходы.**

**Рис. 7. Схема разрушения массива и извлечения высокоактивных отходов из хранилища №4.**

Дистанционное управление робототехническими средствами, в том числе их наведение

на пеналы с высокоактивными отходами, производилось с помощью видеосистемы, в состав которой был интегрирован «Гаммавизор» (см. Рис.8).



**Рис. 8. Идентификация в массиве хранилища высокоактивных источников с помощью «Гаммавизора»**

Измерение активности удаляемых средне- и высокоактивных отходов производилось на специально созданном измерительном стенде. Стенд размещался в секции загрузки отходов внутри одного из технологических отсеков защитного сооружения и представлял собой стапель, снабженный в качестве средства измерения коллимированным детектором. Стенд позволял при известных спектральных характеристиках излучения оценивать в условиях стандартной геометрии активность измеряемых пеналов. Пример сортировки отходов по уровням активности при помощи ДУМ «Brokk-180» представлен на Рис.9.



**Рис.9. Сортировка высокоактивных отходов робототехническими средствами «Brokk».**

Тип контейнера и способ упаковки отходов в контейнеры определялись по результатам этих измерений. Низкоактивные отходы упаковывались в металлические контейнеры, среднеактивные – в бетонные контейнеры, пеналы с высокоактивными отходами – усиленные металлические контейнеры с бетонными вставками.

Особенности нуклидного состава радиоактивных отходов ликвидируемого хранилища №4 потребовали организации дополнительных мер контроля радиационной обстановки при выполнении работ.

Индивидуальный дозиметрический контроль проводился дозиметрами ТЛД отдела охраны труда и техники безопасности (ООТиТБ) Центра. Контроль кожных покровов, спецодежды и домашней одежды проводился на дозиметрическом пункте в санпропускнике. Персонал, непосредственно занятый в работах, имел три дозиметра: один основной на базе ТЛД, показания с которого измерялись ООТиТБ один раз в месяц; второй – для оперативного самоконтроля – показывающий дозиметр ДКГ-05Д с сигнализацией о превышении уставки по мощности дозы и по накопленной дозе; третий – дозиметр ТЛД, показания которого снимались ежедневно.

Лица из числа персонала, привлекаемого к работам по реабилитации этого хранилища, были обследованы на аккредитованной установке СИЧ ГНЦ «Институт биофизики». Минимально измеряемая установкой СИЧ активность по Cs-137 составляет 65 Бк на все тело взрослого человека, по Am-241 – 20 Бк в легких. Погрешность измерений составляла (30-60)%. Было обследовано 22 чел. В организмах обследуемого персонала не обнаружено активности  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, превышающей естественное фоновое значение.

Защита, сооруженная при ликвидации хранилища высокоактивных отходов для обеспечения безопасности как персонала, так и населения, позволила не только снизить уровни  $\gamma$ -излучения, но и ограничить выход радиоактивных аэрозолей из зоны работ.

Контроль объемной активности воздуха во время работ проводился как в зонах работ, так и на периметре санитарной зоны Центра. Результаты измерений объемной активности на площадке хранилищ показали, что за счет применения средств пылеподавления активность радиоактивных аэрозолей объемная активность воздуха на внешнем периметре площадки и территории института была в  $10^3 - 10^4$  раза ниже нормативов для городского населения.

По периметру санитарной зоны Центра также действовала автоматизированная система контроля мощности дозы. Кроме того, ежедневно в восьми точках контроля размещались дозиметры ДКГ-05Д с сигнализацией о превышении уставки по мощности дозы и по накопленной дозе; уставка по мощности дозы составляла 1,2 мкЗв/ч.

При срабатывании сигнализации автоматизированной системы оперативно принимались меры по усилению защитных покрытий на хранилище и осуществлялась корректировка технологического процесса.

Результаты контроля накопленной дозы по периметру площадки хранилищ за 2004 год и 1-ое полугодие 2005 года приведены в Таблице 2.

**Таблица 2. Мощность эквивалентной дозы на периметре Центра**

Номера точек	1	2	3	4	5	6	7	8
Средняя мощность дозы за 1-ое полугодие 2005, мкЗв/ч	0,67	0,21	0,22	0,39	0,46	0,35	0,41	0,34
Среднегодовая мощность дозы в 2004 г., мкЗв/ч	0,40	0,19	0,24	0,39	0,38	0,29	0,31	0,35

Как видно, мощность дозы на периметре Центра при реабилитации хранилища № 4 практически не увеличилась, что свидетельствует о высокой эффективности защитного сооружения и применяемых технологий его реабилитации, обеспечивающих защиту окружающей среды.

В результате проведенных работ из хранилища №4 было извлечено свыше 485 м<sup>3</sup> твердых радиоактивных отходов, в том числе более 100 м<sup>3</sup> – средне- и высокоактивных. Суммарная активность отходов, удаленных из хранилища, составила  $1.0 \times 10^{13}$  Бк (около 290 Ки) и практически в два раза превысила активность отходов, извлеченных из девяти ранее ликвидированных хранилищ.

Мощность дозы  $\gamma$ -излучения в зоне проведения работ достигала 0,3 Зв/ч, а при использовании ДУМ, в зоне нахождения оператора - 0,2 мкЗв/ч. Дозовые нагрузки на персонал по сравнению с дозовыми нагрузками без использования дистанционно управляемой техники были снижены в  $\sim 10^6$  раз.

**Четвертая глава** посвящена методам и технологиям использования ДУМ в работах по выводу из эксплуатации реактора МР. Условия работ при подготовке к выводу и выводе из эксплуатации исследовательских реакторов во многом соответствуют условиям, которые имели место при работах по реабилитации хранилищ РАО. Все этапы работ по выводу из

эксплуатации связаны с обращением с радиоактивными объектами и для обеспечения безопасности проведения работ требовалось использование дистанционно-управляемых механизмов. При этом необходимо отметить, что выполнение как подготовительных, так и демонтажных работ требуют радиационной диагностики состояния радиоактивных объектов.

Опыт и технологии применения ДУМ, приобретенные при реабилитации хранилищ РАО, были включены в проект вывода из эксплуатации исследовательских реакторов МР и РФТ и использовались на стадиях проведения радиационного обследования, подготовки к выводу и непосредственно в ходе работ по выводу из эксплуатации этих реакторов.

Весь спектр работ, связанных с демонтажными работами при выводе из эксплуатации, может быть сведен к трем группам:

- подготовительные работы по удалению радиоактивных объектов, накопленных на реакторе в процессе эксплуатации;
- демонтаж оборудования реактора и его систем;
- обращение с РАО, включая характеризацию, сортировку и загрузку в транспортные контейнеры.

На Рис.10. приведена оценка трудозатрат на эти виды работ при выводе из эксплуатации реакторов МР, РФТ и петлевых установок.



**Рис.10. Оценка трудозатрат на основные виды работ при выводе из эксплуатации реакторов МР и РФТ.**

Для выполнения предусмотренных проектом вывода из эксплуатации реактора МР работ помещение реакторного зала было оснащено системами видеонаблюдения и средствами дистанционной диагностики радиационной обстановки – «Гамма-локатором», «Гаммавизором», коллимированными полупроводниковыми детекторами. Были организованы пути передвижения ДУМ как вне, так и внутри зала. Эти мероприятия позволили использовать зал реактора для осуществления радиационно-опасных операций без присутствия персонала внутри зала. Оперативный персонал для управления ДУМ располагался в пультовой реактора.

В ходе работ по подготовке к выводу из эксплуатации реактора МР необходимо было удалить тепловыделяющую сборку петлевой установки со свинцово-висмутовым теплоносителем (ПВМ). Все операции, связанные с осуществлением этой работы, выполнялись с помощью ДУМ и включали: отсоединение канала от петлевой установки; извлечение канала в сборе из активной зоны; отделение от канала подводящих и отводящих трубопроводов; отрезание верхней части канала; размещение нижней части с облученной сборкой в пенал; транспортировка пенала с облученной сборкой в сухое хранилище ОЯТ Центра. При этом отделение сборки от петлевой установки выполнялось

на специально созданном стенде, расположенном над горячей камерой, с помощью отрезной машины. Контроль процесса резки осуществлялся по монитору видеоканала системы «Гамма-пионер».

Не менее сложной задачей, решение которой потребовало применения ДУМ, явилась задача инвентаризации пеналов с высокоактивными отходами в хранилище ОЯТ, расположенном в реакторном зале МР, и удаление петлевых каналов из бассейна выдержки реактора МР. Указанные каналы являются длинномерными элементами контурного оборудования реактора и петлевых установок. Часть конструкции этих каналов, находившаяся в активной зоне реактора, содержит продукты активации, внутренняя поверхность оборудования загрязнена продуктами деления и активации. Эти особенности в значительной мере затрудняли работы по извлечению каналов из бассейна-хранилища, их фрагментации и удалению из центрального зала

Удаление петлевых каналов осуществлялось с использованием ДУМ «Brokk-330» и «Brokk-180», управляемых с помощью установленных в бассейне-хранилище и самом зале реактора подводной и надводной видеосистем. С помощью «Brokk-180», оснащенного грейферным захватом, производился захват отделяемого элемента петлевого канала, с помощью «Brokk -330», оснащенного гидрорезаками, этот элемент канала отрезался (Рис. 11).

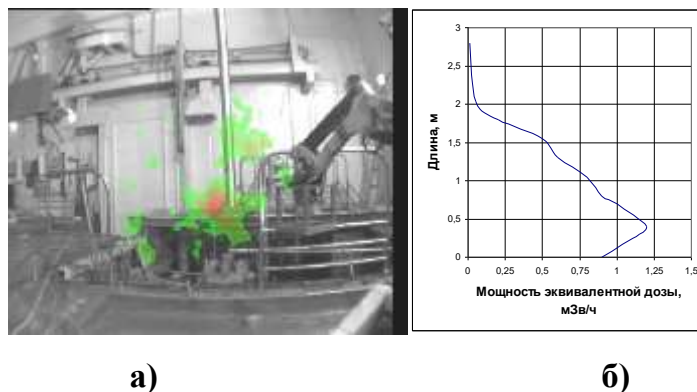


**Рис. 11. Отделение элементов петлевых каналов с помощью дистанционно управляемых робототехнических механизмов «Brokk-180» и «Brokk-330»**

После этого «Brokk-180» помещал отделенный элемент канала в бетонный контейнер. Мощности дозы в процессе работ изменялись в диапазоне от 2 мЗв/ч до 30 мЗв/ч. После отрезки выступающих элементов петлевые каналы вновь помещались в бассейн-хранилище под защитный слой воды. Всего было удалено до 1,5 т металлических элементов петлевых каналов, суммарная активность которых составила около  $1,2 \times 10^{10}$  Бк. В результате мощность  $\gamma$ -излучения в реакторном зале над бассейном-хранилищем была снижена ~ 20 раз (с 0,63 до 0,03 мЗв/ч), за пределами бассейна-хранилища – в 2 раза (с 0,04 до 0,02 мЗв/ч).

Кроме того, были выполнены работы по удалению в действующее хранилище ВАО высокоактивных частей каналов петлевых установок. Идентификация наиболее интенсивно излучающих частей петлевого оборудования выполнялась следующими системами: радиометрическая система «Гамма-пионер», установленная на ДУМ «Brokk-90», спектрометрическая система «Гамма-локатор» и «Гаммавизор».

Сначала с помощью радиометрической системы «Гамма-пионер» производилось сканирование оборудования (Рис. 12б), одновременно с помощью «Гаммавизора» получалось его  $\gamma$ -изображение (Рис. 12а).



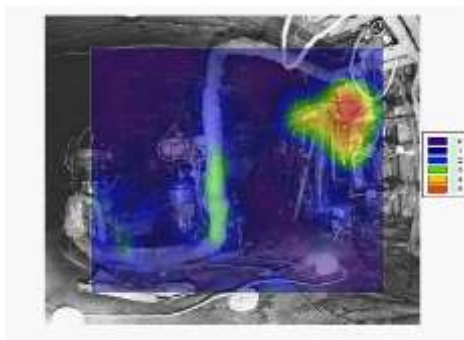
**Рис. 12. Распределение потока  $\gamma$ -излучения по длине канала**

Нуклидный состав загрязнения сканируемых каналов определялся по спектру их излучения, измеренному с помощью спектрометрической системы «Гамма локатор», дозообразующим радионуклидом являлся  $^{60}\text{Co}$ . На основе анализа данных сканирования и измеренных спектров, с помощью методик, аналогичных тем, что применялись для характеристики пеналов с высокоактивными отходами при работах на хранилищах РАО, устанавливалось распределение активности по длине каналов, на основе которого определялись оптимальные места фрагментации каналов на высокоактивные и менее активные части.

Следующей областью применения ДУМ при выводе из эксплуатации явились операции, требующие высокой энерговооруженности, такие как демонтаж оборудования петлевых установок в стесненных условиях подвальных помещений, разрушение строительных конструкций для организации технологических проходов, операции по демонтажу элементов активной зоны и других. ДУМ использовались на всех стадиях работ, начиная с проведения радиационного обследования и кончая удалением загрязненных поверхностей бетонных строительных конструкций здания реакторов. Описанные выше технологии применения ДУМ разрабатывались для отдельных операций и фиксировались в проектах производства конкретных видов работ.

Работы по демонтажу петлевых установок реактора МР выполнялись в технологических помещениях, которые характеризуются: насыщенностью оборудования; наличием в них крупногабаритного оборудования с массой до 5 тонн; высокими уровнями  $\gamma$ -излучения в помещениях (до 20 мЗв/ч, см. Рис.13); сложностью маршрутов удаления контейнеров с отходами.

Применение ДУМ для работ в высоких радиационных полях позволило выполнить большой объем демонтажных работ с соблюдением всех нормативов по обеспечению радиационной безопасности персонала. В результате работ зимой-весной 2011-2012 гг. демонтировано 110 т оборудования в подвальных технологических помещениях петлевых установок ПГ, ПОВ, ПВО, из них 53 т как радиоактивные отходы суммарной активностью  $5,0 \times 10^{10}$  Бк подготовлены к отправке на длительное хранение в МосНПО «Радон».

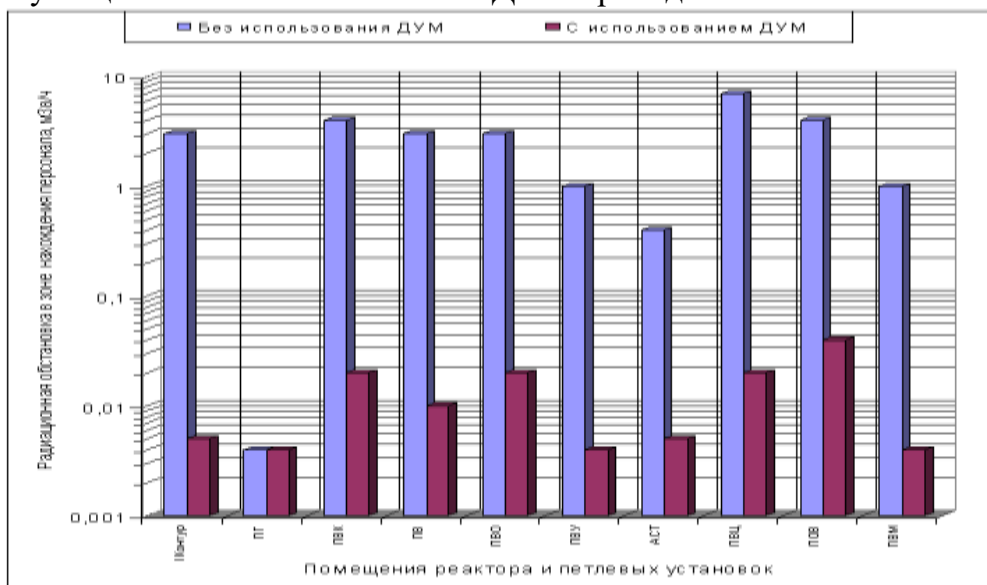


**Рис.13. Распределение относительного вклада в мощность дозы излучения  $^{60}\text{Co}$  от оборудования в точке расположения гамма локатора.**

Для обоснования и оценки эффективности использования дистанционно-управляемых робототехнических средств при проведении радиационно-опасных работ, которая определяется степенью снижения уровня облучения персонала с и без использования дистанционно-управляемых механизмов, был выполнен анализ дозовых нагрузок на персонал при проведении демонтажа радиационно-опасных работ на реакторе МР.

Оценка дозовых нагрузок на персонал при проведении демонтажных работ на реакторе МР производилась с учетом длительности и последовательности проводимых операций в каждом конкретном помещении, как подготовительных, связанных с монтажом (демонтажом) телесистем, подготовкой оборудования и робототехники, так и непосредственно демонтажных работ.

Результаты проведенного сравнения дозовых нагрузок при проведении работ по выводу из эксплуатации с и без использования ДУМ приведены на Рис.14.



**Рис.14. Сравнение дозовых нагрузок при проведении работ по выводу из эксплуатации с и без использования дистанционно-управляемой техники**

Из данных, приведенных на Рис.14, следует, что в зависимости от особенностей технологических помещений, дозовые нагрузки на персонал могут быть снижены до 300 раз. В среднем, применение дистанционно-управляемой техники позволяет снизить дозовые нагрузки на персонал при проведении демонтажных работ в 100 раз.

При использовании дистанционно-управляемой техники, в связи с используемыми технологиями механической резки, для которых характерен небольшой выход радиоактивных аэрозолей в окружающую среду, снижение доз внутреннего облучения за счет вдыхания радиоактивных аэрозолей составило ~10 раз по сравнению с проведением

работ без использования ДУМ.

Работы по демонтажу оборудования реакторов МР и РФТ в полном объеме планируется провести в течение 5 лет. Согласно оценочным расчетам, ежегодные дозовые нагрузки на работников составят порядка 120 чел.-мЗв при численности работников до 40 чел, а среднегодовая дозовая нагрузка на работников, занятых демонтажем оборудования в соответствии с разработанными технологиями и при использовании дистанционно-управляемой техники, не превысит 3 мЗв.

Опыт выполнения демонтажных работ показал, что после проведения подготовительных работ, связанных с удалением накопленного в годы эксплуатации загрязненного оборудования, и демонтажа оборудования трех петлевых установок среднегодовая доза на персонал не превышала 2 мЗв.

**В заключении** сформулированы тезисы, выносимые на защиту. Разработанные методы и результаты их внедрения позволяют сделать вывод о высокой эффективности применения дистанционно управляемых механизмов, что позволяет существенно повысить производительность труда персонала, выполнять большой объем реабилитационных или демонтажных работ наиболее безопасным способом при ограниченном числе работающих.

**Основные публикации** по теме диссертации:

1. Семенов С.Г., Волков В.Г., Павленко В.И. и др. Выполнение мероприятий ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности России на 2008 год и на период до 2015 года» в РНЦ «Курчатовский институт». Результаты и проблемы. – Сборник статей 4-ой Международной конференции и выставки «Атомэко 2010», Москва, 2010, стр. 83-85
2. Volkov V.G., Ponomarev-Stepnoi N.N., Semenov S.G., a.e. Peculiarities of engineering approaches and selection of technologies used in disposition of old radwaste repositories at the Russian research centre “Kurchatov institute”. –In Proc. ICEM’05/DECM’05 Conference, 2005, Glasgow, Scotland, Session No: 11, p. 1227.
3. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. «Организация теневого радиационной защиты при ликвидации старых хранилищ РАО РНЦ «Курчатовский институт». – В сб. трудов XI Международного экологического симпозиума «Урал атомный, Урал промышленный», Екатеринбург, 2005, с.14-16.
4. Volkov V.G., Gorodetsky G.G., Semenov S.G., a.e. Radioactive waste management technologies used in rehabilitation of radioactively contaminated facilities and areas at the RRC “Kurchatov institute” site. – International Journal Nuclear Science and Technology, V. 2, N1/2, 2006, p. 127-143.
5. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Ликвидация труднодоступного хранилища высокоактивных отходов РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 3, с. 164-169.
6. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Подготовка к выводу из эксплуатации исследовательского реактора МР в РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2008, т.104, №5, с. 259-264.
7. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Проект «Реабилитация»: состояние и проблемы. – В сборнике докладов 6-ой Международной конференции «Радиационная безопасность: транспортирование радиоактивных материалов (АТОМТРАНС-2003)». Санкт- Петербург, Россия, изд-во ГРОЦ Минатома РФ, 2003 с. 90-111.
8. Волков В.Г., Городецкий Г.Г., Семенов С.Г. и др. Технологии обращения с радиоактивными отходами при реабилитации радиоактивно-загрязненных объектов и участков территории РНЦ «Курчатовский институт». – Сборник докладов 7-ой Международной конференции «Безопасность ядерных технологий: Обращение с РАО.



2004, Санкт-Петербург, Россия, изд-во Про Атом, стр. 141-156.

9. Пономарев-Степной Н.Н., Волков В.Г., Семенов С.Г. и др. Обследование и подготовка к ликвидации старых хранилищ радиоактивных отходов в РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2007, т. 102, вып. 6, с. 374-377.

10. Пономарев-Степной Н.Н., Волков В.Г., Семенов С.Г. и др. Извлечение радиоактивных отходов и ликвидация старых хранилищ в РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 2, с. 129-133.

11. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Опыт применения технологий обращения с РАО при реабилитации старых хранилищ «исторических» отходов в РНЦ «Курчатовский институт», – В сб. трудов II Международного ядерного форума, 2007, с. 403-409.

12. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Программа следующего этапа реабилитационных работ в РНЦ «Курчатовский институт». – В сб. трудов II Международного ядерного форума, 2007, с. 396-401.

13. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Реабилитация радиоактивно загрязненных объектов и территорий РНЦ «Курчатовский институт». – Энергия: экономика, техника, экология, 2008, №9, с. 35-41.

14. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Контроль объемной активности нуклидов в воздухе при реабилитации площадки старых хранилищ РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 1, с. 37-43.

15. Chesnokov A.V., Volkov V.G., Semenov S.G. e.a. Remediation of the High-level Radwaste Repositories at Russian Research Center “Kurchatov Institute”, – In Proc. Conf. of Radioecology & Environmental Radioactivity, 2008, Bergen, Norway, P. 2, p. 355-357.

16. Волков В.Г., Волкович А.Г., Семенов С.Г. и др. Подготовка и вывоз на переработку отработавшего ядерного топлива ВВР-2 и ОР РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 4, с. 201–209.

17. Волков В.Г., Дроздов А.А., Семенов С.Г. и др. Обращение с отработавшим ядерным топливом исследовательских реакторов РНЦ «Курчатовский институт». – Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 2, с. 99–105.

18. Volkov V.G., Zverkov Yu.A., Semenov S.G., Chesnokov A.V. & Shisha A.D. Remediation of Contaminated Facilities at the Kurchatov Institute. – International Workshop Proceedings “Cleaning up Sites Contaminated with Radioactive Materials” The National Academies Press Washington, D.C. [www.nap.edu](http://www.nap.edu), 2009, p. 99–109.

19. Волков В.Г., Зверков Ю.А., Семенов С.Г. и др. Вывод из эксплуатации реактора МР в РНЦ «Курчатовский институт». – Энергия, экономика, техника, экология, 2010, №2, с.18-24.

20. Семенов С.Г. Использование робототехники при выводе из эксплуатации исследовательских реакторов. – Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, 2012, №2, с. 116-119.

21. Волков В.Г., Иванов О.П., Семенов С.Г. и др. Применение дистанционно управляемых механизмов с целью снижения радиационного воздействия на персонал. – Атомная энергия, 2012, т.113, вып.5., с. 285-289.



