

На правах рукописи



ТАШЛЫКОВ Олег Леонидович

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ  
НА РАДИОАКТИВНОМ ОБОРУДОВАНИИ

Специальность 05.04.11 – Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология  
материалов атомной промышленности

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург-2006

Работа выполнена на кафедре «Атомная энергетика»  
Уральского государственного технического университета – УПИ,  
г. Екатеринбург

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Щеклеин С.Е.

Официальные оппоненты: – доктор технических наук Филиппов С.Н., ОАО Свердлов-  
НИИхиммаш, ведущий научный сотрудник

– кандидат физико-математических наук Зырянов А.П.,  
ФГУП «Институт реакторных материалов»

Ведущая организация – ФГУДП «Атомэнергоремонт»

Защита состоится 30 июня 2006 года в 12-00 часов на заседании  
диссертационного совета ДС 212.027.02 в Уральском государственном техническом  
университете-УПИ по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул.Мира, 19, ауд. Ф-422.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО УГТУ-УПИ

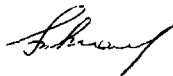
Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим  
направлять по адресу: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ученому секретарю  
университета

Автореферат разослан «23» мая 2006 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС 212.027 02

кандидат физико-математических наук, доцент



Токманцев В.И.

2006 А  
14570

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Необходимость комплексного исследования оптимизации ремонтных работ с учетом процесса формирования дозовых нагрузок на персонал АЭС во время технического обслуживания и ремонта (ТОиР) систем и оборудования обусловлена рядом положений:

1. Доминирующим вкладом ремонтных работ в коллективную дозу персонала АЭС, а также ужесточением требований по облучаемости персонала после ввода в действие новых Норм радиационной безопасности (НРБ-99).

2. Возможностью выявления и учета зарубежного, а также обобщения отечественного опыта при решении задач оптимизации ремонтных работ на радиоактивном оборудовании.

3. Недостаточной разработанностью проблемы, отсутствием в отечественных публикациях цельных и комплексных исследований, раскрывающих вопросы, связанные с решением задач оптимизации технического обслуживания и ремонта радиоактивного оборудования с учетом дозовых затрат персонала.

4. Возможностью одновременного решения задач по снижению издержек и традиционных рисков для безопасности, а также задачи по сокращению до минимума продолжительности перерывов в эксплуатации, необходимых для регламентных работ.

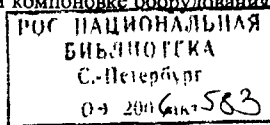
**Цель, научные задачи.** Целью диссертационного исследования ставилась разработка методологической основы перехода АЭС РФ на новые нормативы в области радиационной защиты (НРБ-99):

- разработать алгоритм и расчетную программу определения радиационных полей, создаваемых радиоактивными источниками различной формы и их комбинаций;
- разработать пути решения задачи оптимизации ремонтных работ и снижения дозовых затрат ремонтного персонала в отечественной атомной энергетике;
- на основании существующих и вновь разрабатываемых требований к подготовке и квалификации ремонтного персонала в атомной энергетике России, а также передового зарубежного опыта, усовершенствовать систему подготовки ремонтного персонала.

Для достижения цели исследования решались следующие научные задачи:

1. Анализ и обобщение фактологических данных по облучаемости ремонтного персонала АЭС с учетом технологии ремонтных работ, факторов снижения радиационного параметра, их эффективности.

2. Разработка алгоритма моделирования дозовых полей, создаваемых при сложном пространственном распределении источников, соответствующем компоновке оборудования АЭС



и расчетной программы оптимизации перемещения персонала в радиационно-опасных зонах для планирования дозовых затрат ремонтного персонала

3 Разработка методологии и учебно-методического обеспечения подготовки ремонтного персонала АЭС в рамках головного проекта учебно-тренировочного центра (Смоленского УТЦ) по подготовке ремонтного персонала для АЭС с РБМК-1000

**Научная новизна диссертации** состоит в разработке моделей и алгоритмов оптимизации ремонта радиоактивного оборудования в условиях сложного пространственного распределения источников, соответствующего компоновке оборудования АЭС, при неоднородном переменном во времени составе радиоактивных отложений; в комплексности исследования вопросов дозовых нагрузок на ремонтный персонал, потенциальных путей оптимизации ремонтных работ с учетом дозовых нагрузок; разработке методологии подготовки ремонтного персонала АЭС.

**Практическая ценность работы.** Материалы диссертации:

- использованы для выработки обоснованных предложений по вопросам оптимизации ремонтных работ с учетом дозовых затрат персонала на АЭС концерна «Росэнергоатом»;
- составляют методическую базу для дальнейших исследований оптимизации радиационной защиты и разработки математических моделей радиационной обстановки в ремонтных зонах;
- позволяют минимизировать облучение персонала при перемещении в радиационно-опасных зонах путем оптимизации траектории движения,
- использованы при создании учебно-методических комплексов для подготовки ремонтного персонала АЭС в рамках проекта Смоленского УТЦ,
- нашли применение при подготовке и повышении квалификации ремонтного персонала в УТЦ АЭС концерна «Росэнергоатом», высших учебных заведениях

**Вопросы, выносимые на защиту:**

- Результаты анализа влияния отдельных факторов, возникающих при проведении ремонтных работ на облучаемость персонала АЭС РФ.
- Концепция оптимизации ремонтных работ на радиоактивном оборудовании.
- Разработанные модели и алгоритмы моделирования дозовых полей, создаваемых при сложном пространственном распределении источников, соответствующем компоновке оборудования АЭС, оптимизации траектории движения работников в радиационно опасных зонах.
- Методология подготовки ремонтного персонала.

**Личный вклад автора в получение научных результатов, изложенных в диссертации.** Анализ радиационных и технологических характеристик при проведении работ по техническому обслуживанию и ремонту на АЭС РФ с различными типами ядерных энергопроизводящих установок, создание моделей и алгоритмов, расчетно-экспериментальные исследования радиационных полей, оптимизация перемещения персонала в радиационно-опасных зонах, разработка методологической модели подготовки ремонтного персонала, разработка концепции оптимизации дозовых нагрузок.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы и отдельные ее положения были обсуждены и получили одобрение на Всероссийской научно-методической конференции «Новые образовательные технологии в ВУЗе» (Екатеринбург, 2001 г.), на областной научно-технической конференции «Экология. Экономика. Безопасность и подготовка кадров для атомной энергетики» (Екатеринбург, 2001 г.), на I, II, III, IV, VI отчетных конференциях молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2001, 2002, 2003, 2004 гг.), на Международном конгрессе «Энергетика 3000» (Обнинск, 2002 г.), на Всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2003, 2004, 2005 гг.), на Всероссийской научно-технической конференции «Белоярской АЭС 40 лет» (г. Заречный, 2004 г.), на Всероссийском молодежном научном симпозиуме «Безопасность биосферы -2005» (Екатеринбург, 2005 г.), на Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Москва, ВНИИАЭС, 2006 г.).

Отдельные материалы исследования использовались автором в процессе преподавания в УГТУ-УПИ спецкурсов по ремонтному обслуживанию оборудования АЭС, а также на курсах повышения квалификации для руководителей ремонтных подразделений АЭС концерна «Росэнергоатом».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ в научных журналах и сборниках трудов, материалах Международных, Всероссийских конференций, часть положений диссертации вошла в учебное пособие «Ремонт оборудования атомных станций» (с грифом *Допущено Научно-методическим советом УМО «Энергетика и электротехника» по специальности 1010 «Атомные электрические станции и установки» в качестве учебного пособия для студентов вузов*).

**Структура и объем работы.** Структура диссертационного исследования подчинена замыслу исследования и состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений, списка использованных источников, включающего 107 наименования. Общий объем диссертации 200 страниц. Работа содержит 64 рисунка и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновываются выбор цели, задачи исследования и актуальность работы.

В связи с переходом в отечественной радиационной защите на новые Нормы радиационной безопасности НРБ-99 и Основные санитарные правила обращения с радиоактивными веществами ОСПОРБ-99, разработанные в соответствии с международными рекомендациями и правилами, остро встал вопрос по снижению в 2,5 раза пределов облучения персонала АЭС, и в первую очередь ремонтного, вносящего основной вклад в коллективную дозу облучения. Это требует изучения зарубежного опыта при внедрении принципа оптимизации в практику и обобщения отечественного по снижению облучаемости ремонтного персонала.

**В первой главе** рассматриваются особенности технологии проведения ремонтных работ на радиоактивном оборудовании АЭС. Проводится анализ и исследование потенциала радиационных нагрузок при проведении ремонтных работ на АЭС

Радиационная обстановка в помещениях АЭС во время ремонта определяется  $\gamma$ -излучением долгоживущих активированных продуктов коррозии, сосредоточенных в отложениях на поверхности оборудования, среди которых основной вклад дает  $^{60}\text{Co}$ . Конструкционные особенности реакторной установки влияют на условия проведения ремонтных работ и радиационную обстановку в помещениях. На контурах циркуляции теплоносителя имеются зоны, для которых дезактивация дает отрицательный эффект, то есть увеличение мощности дозы. Водно-химический режим и системы очистки также оказывают значительное влияние на количественный и качественный состав радиоактивных отложений на поверхности оборудования и трубопроводов контура циркуляции теплоносителя.

Анализ данных по энергоблокам АЭС России, начиная с 1990 г., выявил наиболее дозозатратные операции, а также значительное различие доз облучения при выполнении аналогичных работ на однотипных АЭС, что свидетельствует о наличии потенциальных резервов снижения облучаемости персонала АЭС при выполнении ТОиР.

Коллективные дозы меняются в широких пределах в зависимости от типа реактора и составляют от 0,67 (среднее значение для несерийных блоков – Билибинской и Белоярской АЭС) до 4,42 (среднее значение для АЭС с РБМК-1000) чел.Зв/энергоблок.

Соотношение дозозатрат в период проведения плановых ремонтов и эксплуатации на энергоблоках с РБМК составляет примерно 50 на 50%. На энергоблоках с ВВЭР 80-90% коллективной дозы приходится на время ремонта энергоблоков.

Разнообразие технологического оборудования различных типов ядерных паропроизводящих установок АЭС затрудняет оценки ДЗ до проведения ТОиР.

В настоящее время не существует какого-либо одного мероприятия, способного существенно снизить облучаемость персонала. Поэтому необходима оптимизация организации радиационно-опасных работ.

**Во второй главе** проводится исследование возможности оптимизации отдельных этапов ремонтных работ с учетом факторов, определяющих дозовые нагрузки персонала (времени, расстояния, снижения уровня излучения от оборудования и трубопроводов) для выявления резервов в снижении дозовых затрат персонала АЭС.

Проведенный анализ фактологических данных по облучаемости ремонтного персонала в период более 50-ти ремонтных кампаний на АЭС концерна «Росэнергоатом» и сопоставление этих данных с использованными мероприятиями по снижению облучаемости персонала, позволили выявить типичные недостатки в планировании и организации работ, нарушения в процессе выполнения работ, количественно установить связь радиационных факторов и перепростоя энергоблоков АЭС в ремонте и как следствие снижение КИУМ.

Для проведения анализа потенциала оптимизации ремонтные работы условно разбиты на стадии планирования, подготовки, проведения работ и оценки их выполнения.

На *этапе планирования* объектами оптимизации являются многие аспекты технического обслуживания и ремонта АЭС (например, применение робототехники, дезактивации, временной биозащиты), а в некоторых случаях и масштабы задач, которые предстоит решать в процессе ремонта АЭС.

При планировании существенно определены времени проведения конкретной работы. Снизить облучение можно благодаря правильно выбранной последовательности работ (максимальное использование защитных свойств воды, распад короткоживущих радионуклидов и т.д.). Были выявлены случаи проведения работ на незаполненных петлях ГЦК, из-за выполняемых в это же время работ, например, на ГЦН, ГЗЗ (недостатки планирования), что

приводило к увеличению дозы облучения в 1,5...2 раза.

Этап *подготовки работ* относится к задачам, решаемым с целью подготовки исполнителя, рабочей площадки и оборудования или системы для работы. Для сокращения времени ремонта важны выбор и обучение персонала, особенно для работ критического пути. Степень эффективности обучения при повторяющейся деятельности человека иллюстрирует «кривая обучения» (рис.1), которую делят на три фазы: обучение операциям и приобретение опыта, ликвидация ошибок при обслуживании, обладание полным объемом навыков, позволяющим

выполнять операция за минимально возможное время с минимальными дозами облучения. Кривая ABC характеризует процесс обучения, происходящий только благодаря природной

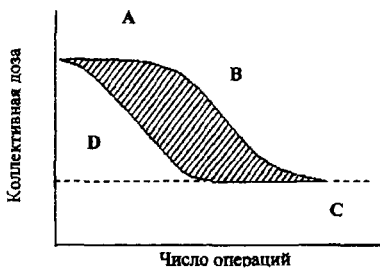


Рис 1. Кривая обучения  
ABC – изменение коллективной дозы при пассивном обучении, ADC – изменение коллективной дозы при активном обучении

способности людей к обучению в процессе деятельности. При активизации обучения работника происходит изменение кривой в направлении *ADC*. Заштрихованная область пропорциональна суммарному снижению коллективных доз при этом. Прошедшие специальные обучение и тренировки рабочие при ремонте АЭС облучаются на 40-50 % меньше, чем нетренированный персонал.

Этап *выполнения работ* относится к непосредственным действиям по решению поставленной задачи, а также к сопутствующим факторам, затрудняющим или способствующим выполнению работы.

*Оценка работы и обратная связь* является заключительным этапом. Применительно к философии оптимизации работ последний этап является и первым, т.к. данный процесс непрерывен. Глубина выполнения анализа работы после завершения зависит от ее сути.



Рис. 2. Методы снижения облучения персонала

Исходя из анализа возможных вариантов снижения дозовых нагрузок ремонтного персонала (рис.2) можно условно выделить «стратегические» (требующие значительных затрат и решаемых на уровне проектирования или реконструкции АЭС) и «тактические» (реализация которых возможна на действующих АЭС) пути. Среди последних потенциал снижения доз облучения имеют: *планирование ремонтов, оптимизация траектории перемещения персонала в радиационно-опасных зонах и подготовка ремонтного персонала.* Эти направления и рассматриваются

в последующих главах диссертационной работы

**Третья глава.** При планировании ДЗ обязательным требованием является прогноз операционных доз или доз, связанных с различными вариантами защиты. Источник прогнозирования доз с использованием данных из накопленного опыта, используемый в большинстве случаев, не учитывает изменения в радиационной обстановке, связанные с отклонениями в работе энергоблока (нарушение ВХР, разгерметизация твэлов и т.д.), накоплением радиоактивных отложений на поверхности оборудования и трубопроводов и т.д. Разработанные математические модели с использованием пакета Mathcad и приложения Access, определяющие дозовые поля для тел сложной геометрической формы (от систем трубопроводов и



оборудования), позволяют планировать облучаемость ремонтного персонала и мероприятия по ее снижению в условиях действующих АЭС.

При рассмотрении функций, описывающих поля точечных и протяженных источников ионизирующих излучений принимается экспоненциальный закон ослабления излучения в среде. Это закон строго соблюдается при распространении в среде не рассеянных частиц. Приведенные характеристики поля излучения справедливы для любого функционала поля излучения: плотности потока частиц  $\phi$ , плотности потока энергии или интенсивности  $I$ , мощности поглощенной дозы  $\dot{D}$ , мощности кермы  $\dot{K}$ , мощности эквивалентной дозы  $\dot{H}$ . Всякий объемный источник можно представить в виде суперпозиции точечных источников. Поэтому в общем виде определение функционала поля излучения от протяженных изотропных источников сводится к интегрированию или суммированию функции ослабления точечного изотропного источника (точечного ядра) по длине, поверхности или объему протяженного источника. Иными словами, протяженный источник представляется суперпозицией точечных изотропных источников.

Для иллюстрации общего подхода к расчету полей излучения объемных протяженных источников рассмотрим произвольный изотропный источник (рис.3) с равномерно распределенной по объему  $V$  объемной мощностью  $q_v$ , коэффициентом самопоглощения в источнике  $\mu_s$  и коэффициентами ослабления  $\mu_n$  в защитном слое  $d_n$ . Тогда интенсивность  $I$  в точке детектирования  $P$  может быть определена из соотношения:

$$I = \int_V \frac{q_v(\vec{r}_s) \cdot \exp[-\mu_s |\vec{r}_1 - \vec{r}_s|] \exp\left[-\sum_{i=1}^n \mu_i |\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i|\right] dV}{4 \cdot \pi \cdot |\vec{r}_{n+1} - \vec{r}_s|^2}$$

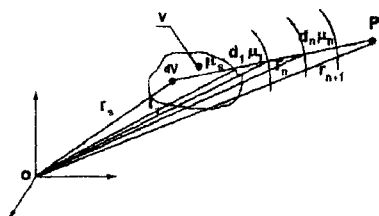


Рис. 3 Схема интегрирования по определению мощности дозы от источника произвольной формы до точки P

в этой формуле постоянным геометрическим параметром является радиус-вектор детектора  $\vec{r}_{n+1}$ , а радиусы-векторы элементарного объема источника  $\vec{r}_s$  и радиусы-векторы, характеризующие положение областей многослойной защиты, - переменными величинами.

Приведенные функции ослабления для интенсивности  $I$  без изменения могут быть использованы и для определения поля излучения по другим функционалам.

Алгоритм первой программы с использованием упрощенных формул включает в себя задание исходных данных (геометрических и радиационных характеристик источника, пределов изменения положения точки детектирования в пространстве и т.д.), которые

вносятся в таблицу Microsoft Excel экспортированную в Mathcad. Результаты получаются в виде массива значений мощности, которые далее представляются в виде графиков.

Вторая программа позволяет определять мощность дозы с помощью интегрирования с учетом всех радионуклидов источника излучения, изменения их активности в результате распада (учет времени) Исходными данными для программы являются геометрические характеристики источника и точки детектирования ( $x_r, y_r, z_r$ ); линейная, поверхностная или объёмная активности источника ( $A_l, A_s, A_v$ ); гамма-постоянные (керма-постоянные) радионуклидов; постоянные распада; линейные коэффициенты ослабления и т.д. Программа позволяет определять мощность дозы излучения, создаваемой набором источников. На рис. 4 показано распределение поля мощности дозы в помещении с заданным расположением оборудования и трубопроводов, полученное с помощью расчетной программы.

Третья программа, позволяет определять мощность дозы излучения от неоднородных цилиндрических источников (например, теплообменников). Расчетная модель предполагает представление рассматриваемого теплообменника в виде набора цилиндрических и эллиптических тел с объемной и поверхностной активностью.

Для расчета зоны с теплообменными трубами, наиболее сложной с геометрической точки зрения, проводится гомогенизация пространства, занятого трубами. Для этого определяется суммарная активность радионуклидов в отложениях на поверхности труб, обечайк через

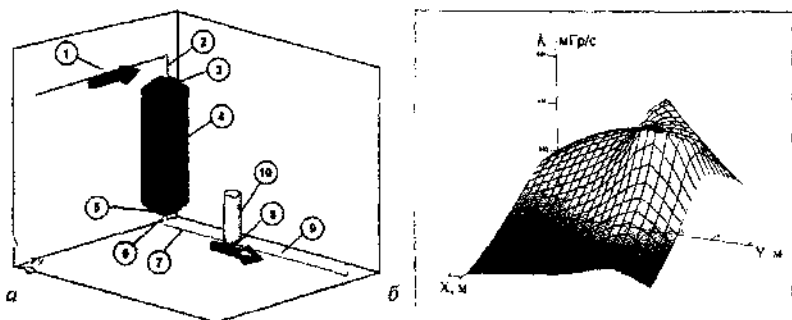


Рис.4. Схема размещения оборудования в помещении (а) и распределение интегральной мощности дозы в горизонтальной плоскости на высоте 1 м от пола (б). 1-10 – элементарные источники (участки трубопроводов, эллиптические днища и т.д.)

площадь поверхности, омываемой радиоактивной средой,

$$S_{от} = \Pi \cdot h; \quad \Pi = (D_H + D_B + d_H \cdot n) \cdot \pi.$$

где  $\Pi$  – смачиваемый периметр расчетной зоны,  $D_H$  – внутренний диаметр наружной обечайки,  $D_B$  – наружный диаметр внутренней обечайки,  $d_H$  – наружный диаметр теплообменных труб,  $n$  – количество теплообменных труб,  $h$  – высота теплообменных труб.

При выборе состава и значений активности отложений на поверхности ПТО натрий-натрий БН-600 можно использовать данные по отложениям на поверхности выемной части главных циркуляционных насосов первого контура (табл.1), опыт замены которых достаточно представителен.

Расчет общей активности, заключенной в рассматриваемом объеме проводится по формуле  $A = \sum_{i=1}^n S_{от} \cdot A_{Si}$ , где  $A_{Si}$  - поверхностная активность  $i$ -го радионуклида,  $S_{от}$  - площадь поверхности с радиоактивными отложениями.

Таблица 1. Активность отложений на поверхности ПТО, Бк/м<sup>2</sup>

Радионуклид	Поверхность, контактирующая с газом	Поверхность, контактирующая с натрием
Цезий-134	$3,7 \times 10^7 \dots 3,0 \times 10^9$	$1,4 \times 10^8 \dots 0,9 \times 10^8$
Цезий-137	$7,9 \times 10^7 \dots 1,2 \times 10^{10}$	$2,4 \times 10^8 \dots 1,75 \times 10^8$
Цезий-136	$6,4 \times 10^5 \dots 3,1 \times 10^7$	$2,6 \times 10^7$
Марганец-54	$4,0 \times 10^6$	$1,5 \times 10^8 \dots 3,4 \times 10^9$
Кобальт-60	$6,9 \times 10^5 \dots 4,0 \times 10^7$	$6,9 \times 10^6 \dots 1,5 \times 10^6$
Цирконий-95	-	$1,7 \times 10^7$
Натрий-22	-	$1,35 \times 10^6$

Расчет эквивалентной объемной активности проводится по формуле  $A_V = A / V$ , где  $V$  - объем расчетной зоны, м<sup>3</sup>.

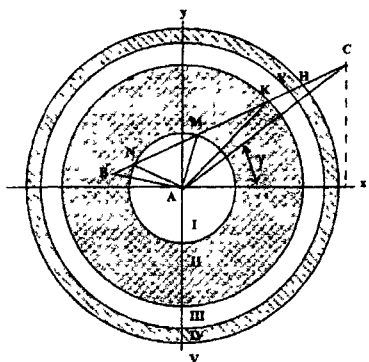


Рис.5. Расчетная модель теплообменника в защитном контейнере: I, III, V - газовый промежуток; II - зона теплообменных труб; IV - защитный контейнер; В - точка выхода излучения, С - точка определения радиационного параметра, N, M, K, Y, H - точки грани I...V зон.

Алгоритм расчета включает в себя разбиение объекта на составные части, представляемые в виде однородных тел, расчет параметра радиационной обстановки, создаваемой каждым телом-источником, а затем всеми телами-источниками в заданной точке.

При определении самопоглощения в источнике и ослабления излучения в защите необходимо определять путь, который проходит излучение в источнике и защите, который зависит от расположения расчетной точки (рис.5). На рис.6 представлены результаты расчета.

Автоматизированная программа в приложении Access позволяет определять мощность дозы посредством задания геометрии источника (точечный, кольцевой, дисковый, цилиндрический и др.), состава радиоактивных отложений и их активности, времени. Алгоритм определения мощности дозы заключается в разбиении источника на множество точечных источников, определении мощности дозы

каждого точечного источника на заданном расстоянии и суммировании мощностей доз от всех источников

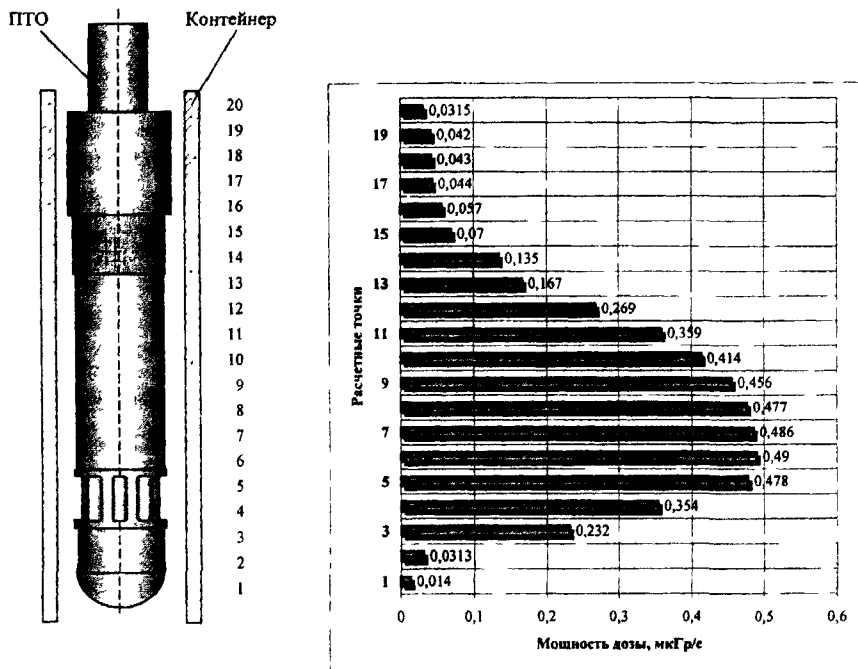


Рис 6. Расчетная схема ПТО:

*а* – расчетные точки, *б* – мощность дозы на поверхности защитного контейнера

**В четвертой главе** рассматривается решение задачи минимизации облучения работников при движении в радиационно-опасных зонах путем оптимизации траектории перемещения с использованием методов динамического программирования

Доза, получаемая при техническом обслуживании и ремонте, является суммой трех составляющих: дозы, полученной по пути к рабочей площадке и обратно, при перемещении между обслуживаемыми объектами; при выполнении работ; при подготовке к работе и завершении работ (уборке рабочего места, сдаче его и т.д.). Среди этих составляющих дозы облучения, подлежащих оптимизации, несомненный интерес представляет минимизация облучения персонала при перемещении от объекта к объекту, поскольку данный вопрос не рассматривался в отечественных и зарубежных источниках.

Снижение «транзитных доз» представляет собой важную задачу в общем процессе оптимизации облучения ремонтного персонала. Для сокращения доз, получаемых при пере-

мещении, на ряде зарубежных станций используются подробные карты, которые получают при входе в реакторное здание и на различные отметки внутри здания.

Однако на объектах атомной энергетики и промышленности не используется оптимизация пути перемещения работников с целью сокращения доз, получаемых при движении.

При выполнении ремонтных работ выбор пути с минимальной дозой облучения во время перемещения не представляет сложности, так как количество обслуживаемых объектов ограничено одним-двумя. При техническом обслуживании количество объектов может быть значительным, поэтому требуется использование специальных программ. Оптимизация траектории движения работников дает возможность минимизировать их облучение при перемещениях в рабочей зоне в помещении, на загрязненной территории.

Существуют задачи двух типов – открытая и закрытая. Применительно к рассматриваемому вопросу открытая задача соответствует условию входа и выхода через разные точки, закрытая – через одну. В последние годы было предложено много методов решения задачи. Одни из них неэффективны, другие не гарантируют оптимального решения, некоторые требуют принятия интуитивных решений, что затрудняет программирование.

Среди существующих математических методов наиболее эффективными (в вычислительном отношении) оказались методы, основанные на идеях динамического программирования, поскольку гарантируют оптимальность, обеспечивают удобство программирования решения, а также являются универсальными, т.е. приспособленными для решения задач различного типа. Метод динамического программирования также применим для качественного исследования задачи.

В ходе диссертационного исследования в сотрудничестве с кафедрой «Прикладная математика» УГТУ-УПИ (научный консультант – зав.кафедрой, д.ф.м.н., проф. А.Н.Сескин) впервые разработана расчетная программа (алгоритм), позволяющая определять оптимальную траекторию перемещения работника, обеспечивающую минимальное облучение.

В главе рассмотрена возможность применения метода динамического программирования для решения маршрутной задачи последовательного обхода множеств, более общей в сравнении с известной в математике задачей коммивояжера. Если в задаче коммивояжера переход из города в город являлся действием, определенным единственным образом, то в реализуемой задаче допускается многовариантность упомянутого перехода. Рассматривается одна из возможных постановок такого рода, в рамках которой города заменяются множествами, по которым следует организовать перемещения в том или ином порядке. Предполагается, что данные множества, именуемые целевыми, попарно не пересекаются, то или иное начальное состояние целевым множествам не принадлежит, сами целевые множества являются конечными. В наиболее распространенном случае задачи обхода непустых ограниченных и замкнутых множеств в конечномерном арифметическом пространстве, решение

сводится фактически к упомянутому случаю посещения конечных множеств, выбираемых из соображений аппроксимации «первоначальных» целевых множеств.

Для рассматриваемой задачи, при построении алгоритма, так называемое уравнение Беллмана модифицировано в виде выражения

$$V_s(m, K, N) = \min_{k \in K} (c_{m,k} + V_{s-1}(k, K \setminus \{k\}, N)) \quad (1)$$

где  $V_s(m, K, N)$  – оптимальный результат по обходу множества  $K$  из точки  $m$ ;  $c_{m,k}$  – элемент, находящийся на пересечении  $m$ -й строки и  $k$ -го столбца, характеризует полученную дозу облучения на перемещении от  $m$ -го до  $k$ -го объекта.

Уравнение Беллмана, представлено в нетрадиционной форме, связанной со слоями  $V_0, V_1, \dots, V_N$  этой функции. Решение задачи включает в себя рекуррентное построение слоев функции Беллмана, т.е.  $V_0, V_1, \dots, V_N$ , и, на этой основе построение отдельного маршрута обхода объектов из  $\overline{1, N}$ .

Для оценки эффективности оптимизации пути перемещения персонала при техническом обслуживании были просчитаны несколько реальных вариантов движения работников в зоне контролируемого доступа. Для решения подобных задач было специально разработано программное обеспечение на языке программирования DELPHI, позволяющее определять

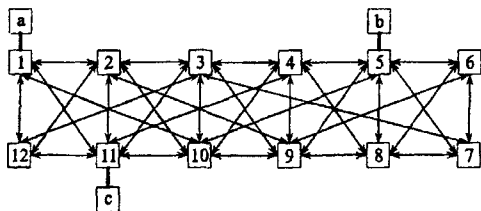


Рис 7 Схема возможных путей перемещения между объектами ТООР: 1...12 – объекты ТООР; a, b, c – возможные точки входа и выхода

оптимальный маршрут и сумму затрат.

На рис.7 приведена схема возможных путей движения персонала, а в табл 2 – дозовые затраты при перемещении на участках между отдельными объектами (значение « $\infty$ » в матрице означает отсутствие возможного прохода).

Объекты ТООР, рассматриваемые в данной расчетной схеме, могут располагаться в различных помещениях (боксах) и на различных высотных отметках. Путь между объектами в расчетной схеме выражается в виде эффективной дозы облучения  $E_{a-b}$ , получаемой в процессе движения между обслуживаемыми объектами  $a-b$ :  $E_{a-b} = \sum P_i \cdot k \cdot t_i$ , где  $P_i$  – радиационный параметр  $i$ -й зоны (мощность дозы, мощность воздушной кермы и т д),  $k$  – коэффициент перехода от радиационного параметра  $P_i$  к эффективной дозе,  $t_i$  – время, за которое

работник пересечет  $i$ -ю зону с радиационным параметром  $P_i$ :  $t_i = \frac{S_i}{v_i}$ , где  $S_i$  – ширина  $i$ -й

зоны, м;  $v_i$  – скорость движения работника, м/с.

Таблица 2. Данные для расчета оптимального пути перемещения между объектами ТООР

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	∞	8,2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	23	5,6	7,5
2	8,2	∞	11	∞	∞	∞	∞	∞	22	13,2	9,8	11
3	∞	11	∞	23	∞	∞	17,5	∞	17,5	22	11,5	31
4	∞	∞	23	∞	7,8	∞	∞	21,5	11	13,2	24	∞
5	∞	∞	∞	7,8	∞	11	19	7,8	16,5	19,8	∞	∞
6	∞	∞	∞	∞	11	∞	19	20	27,5	∞	∞	∞
7	∞	∞	17,5	∞	19	19	∞	21	∞	∞	∞	∞
8	∞	∞	∞	21,5	7,8	20	21	∞	15	∞	∞	∞
9	∞	22	17,5	11	16,5	27,5	∞	15	∞	13	∞	∞
10	23	13,2	22	13,2	19,8	∞	∞	∞	13	∞	10	∞
11	5,6	9,8	11,5	24	∞	∞	∞	∞	∞	10	∞	22
12	7,5	11	31	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	22	∞

С использованием описанных методов расчета были найдены оптимальные пути перемещения для возможных вариантов входа и выхода работника в радиационно-опасную зону (табл. 3). На рис. 8 приведены результаты сравнения доз, получаемых при перемещении по исходному варианту маршрута и найденным оптимальным маршрутам при заданных вариантах входа и выхода в зону контролируемого доступа

Таблица 3

Вариант	Вход	Выход	Путь	Доза, мкЗв
1 (исходный)	a	a	1→2→3→4→5→6→7→8→9→10→11→12→1	168,5
2	b	b	5→8→9→4→10→11→1→12→2→3→7→6→5	139,6
3	a	b	1→12→2→3→11→10→4→9→8→7→6→5	142,9
4	c	a	11→10→4→9→8→5→6→7→3→2→12→1	134
5	c	b	11→1→12→2→3→7→6→8→9→10→4→5	140,6

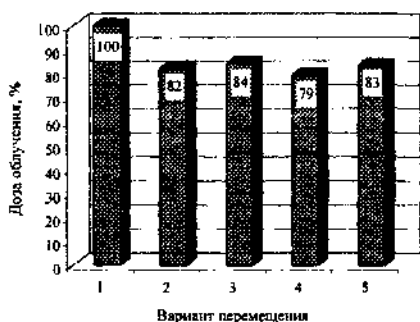


Рис. 8. Относительная облучаемость персонала при перемещении

Как следует из приведенных данных, оптимизация пути перемещения персонала позволяет сократить «транзитную» дозу облучения на 16...21%.

Достоверные данные по дозам, получаемым при перемещении между объектами технического обслуживания, в литературе отсутствуют. В ряде работ даются приближенные оценки,

составляющие 2...15% от коллективной дозы Исходя из этих оценок, при годовой коллективной дозе 4,42 чел·Зв/блок (среднее значение для энергоблока с РБМК-1000) оптимизация пути перемещения снижает облучаемость персонала на 14,14...139,23 чел·мЗв.

**Пятая глава.** Как следует из рис.1, активное обучение ремонтного персонала позволяет добиваться определенного снижения коллективных доз при выполнении им меньшего числа однотипных операций. Необходимое количество таких операций в радиационно опасных зонах можно сократить путем активного обучения.

Высокий уровень сложности оборудования современных АЭС, наличие радиоактивного загрязнения, не допускающие использование общезаэнергетических технологий ремонта, потребовали создания специального учебно-методического обеспечения для подготовки ремонтного персонала, включающего в себя:

- теоретическую часть по основному оборудованию и системам;
- компьютерную диалоговую систему контроля усвоения информации;
- систему связанных графических и технологических модулей, позволяющую эмуляцию ремонтных процедур в реальном и ускоренном масштабах времени;
- тренажеры-имитаторы;
- концепцию полномасштабного УТЦ для отработки наиболее радиационно опасных операций по техническому обслуживанию и ремонту.

В главе описываются разработанные автором в рамках головного проекта национального учебно-тренировочного центра (Смоленского УТЦ) подготовки ремонтного персонала для АЭС с реакторами РБМК методология и учебно-методическое обеспечение (УМО) по основным направлениям подготовки и повышения квалификации.

В состав учебно-методического обеспечения вошли комплекты методических материалов, определяющие форму и порядок организации учебного процесса, и являющиеся необходимым условием эффективной организации процесса обучения.

При разработке практического курса учитывались: возможность имитации реальных рабочих условий; изучение и закрепление реальных навыков, необходимых на производстве; дополнительные виды обучения теоретическим знаниям и умениям, необходимым для более глубокого и прочного усвоения и закрепления навыков практической деятельности; различные виды инструктажей, необходимых для безопасного ведения процесса обучения; оценка выполнения практических работ; реальное время выполнения алгоритма операций в учебном и контрольном режимах; нормативы выполнения производственных заданий; ремонтпригодность оборудования и оснастки, применяемых в учебном процессе (доступность, съемность, возможность временного и постоянного крепления, возможность замены и т.п.).



Требования к специальному образованию и профессиональной подготовке разрабатывались на основе анализа функциональной деятельности ремонтного персонала Смоленской и Курской АЭС с учетом требований Единого тарифно-квалификационного справочника работ и рабочих профессий

Выходной контроль является важной частью процесса подготовки специалистов, во многом определяющей качество подготовки, поэтому, он должен удовлетворять требованиям валидности. Для реализации этих требований были проанализированы системы теоретических знаний, а также специфических и логических приемов деятельности, предусмотренных целями подготовки специалистов. В результате были определены связи между тремя составляющими знаниями, специфическими и логическими приемами деятельности. Это позволило разработать задания, требующие применения данных знаний в контролируемых видах деятельности.

Разработка комплекта учебных материалов проводилась в восемь этапов с согласованием каждого из них с заказчиком.

В результате поэтапного внедрения учебно-методического обеспечения в процесс подготовки ремонтного персонала в национальном учебно-тренировочном центре в г. Десногорске (Смоленском УТИ), являющемся головным УТИ по подготовке специалистов



Рис.9. Дозозатраты при ремонте арматуры Ду300 АЭС с РБМК-1000 (в расчете на одну задвижку): 1...6 – ремонтные кампании в 2001...2004 гг.

для АЭС России, Украины и Литвы с реакторами РБМК, за период с 1999 г. было подготовлено 2147 специалистов. Это позволило значительно повысить качество ремонтного обслуживания оборудования и систем АЭС, сократить время пребывания работников в радиационно-опасных зонах, и тем самым снизить их облучаемость (Справка о внедрении от Смоленского УТИ)

Анализ влияния подготовки персонала иллюстрирует диаграмма изменения дозозатрат при ремонте арматуры Ду300 РБМК-1000 (рис 9) в расчете на единицу оборудования.

Аналогичные результаты дают предварительные оценки снижения облучаемости ремонтного персонала, обучавшегося в учебном комплексе НИИАР (г. Димитровград)

Основными направлениями исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых на кафедре «Атомная энергетика» УГТУ-УПИ по организации и совершенствованию подготовки ремонтного персонала АЭС являются создание тренажерной базы для подго-

товки ремонтного персонала для особо сложных, дозозатратных работ, разработка учебно-методического обеспечения подготовки по различным специализациям

## ВЫВОДЫ

1. Экологическая и экономическая приемлемость АЭС определяется дозовыми нагрузками, возникающими при обслуживании, ремонте, реконструкции, снятии с эксплуатации.

2. В результате анализа фактологических данных по облучаемости ремонтного персонала в период более 50-ти кампаний по ремонту основного оборудования АЭС впервые количественно установлена связь радиационных факторов и перепростоя энергоблоков АЭС в ремонте и как следствие снижение коэффициента использования установленной мощности.

3. Впервые разработаны математические модели и прикладные программные комплексы с использованием математического пакета Mathcad и приложения Access, определяющие дозовые поля для тел сложной геометрической формы (от систем трубопроводов и оборудования), позволяющие планировать облучаемость ремонтного персонала и мероприятия по ее снижению в условиях действующих АЭС.

4. Впервые разработана расчетная программа оптимизации дозовых затрат при технологическом перемещении персонала. Программа предлагается в качестве базовой для решения задачи оптимизации облучаемости персонала при проведении масштабных работ по модернизации, демонтажу радиоактивного оборудования при снятии АЭС с эксплуатации.

5. Проведена оценка эффективности основных мероприятий по снижению облучаемости ремонтного персонала на отдельных этапах организации технического обслуживания и ремонта и разработана концепция по их оптимизации.

6. Результаты диссертационного исследования использованы для оптимизации работ по ТОиР с учетом облучаемости персонала при модернизации и продлении ресурса оборудования АЭС с реакторами ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000, проведении работ по замене парогенераторов, технологических каналов на АЭС концерна «Росэнергоатом» и в ПО «Атомэнергоремонт».

7. Разработанные материалы по оптимизации ремонтных работ с учетом дозовых затрат персонала внедрены в процесс подготовки и повышения квалификации ремонтного персонала в Смоленском УТЦ, учебном комплексе НИИАР, УТП АЭС концерна «Росэнергоатом».

8. В рамках реализации головного проекта учебно-тренировочного центра (Смоленского УТЦ) для подготовки ремонтного персонала для АЭС России, Украины, Литвы с реакторами РБМК разработаны содержательная часть методологии подготовки ремонтного персонала и учебно-методическое обеспечение, что позволило повысить качество ремонтного обслуживания оборудования и систем АЭС, сократить время пребывания работников в радиационно-опасных зонах, и, тем самым, снизить их облучаемость.

9 Разработанная концепция оптимизации ремонтных работ может являться основой для оптимизации работ на радиоактивном оборудовании неэнергетического назначения (атомные подводные лодки, химкомбинаты и т.д.).

#### **Публикации по теме диссертации:**

1 Ташлыков О.Л. и др. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС / О.Л. Ташлыков, А.Г. Кузнецов, О.Н. Арефьев. М.: Энергоатомиздат, 1995 Кн 2 352 с

2.Щеклеин С.Е., Велькин В.И., Ташлыков О.Л. К проблеме снижения радиационных нагрузок на персонал при проведении ремонтных работ на АЭС Труды конференции «Безопасность биосферы». Екатеринбург, 1998

3 Создание учебно-методических комплексов для подготовки ремонтного персонала АЭС // Ю.И. Сорокин, С.Е. Щеклеин, О.Л. Ташлыков, В.И. Велькин, В.Г. Чепрасов, В.Т. Стасюк / Проблемы подготовки специалистов для ядерной энергетики Сборник методических работ М., Издательство МЭИ, 2000. С. 32-36.

4 Ташлыков О.Л. Оптимизация ремонтных работ на АЭС с учетом дозовых затрат персонала // Научные труды I отчетной конференции молодых ученых ГОУ УГТУ-УПИ / Сборник тезисов Издательство ГОУ УГТУ-УПИ Екатеринбург 2001 С. 204-205.

5 Ташлыков О.Л. Требования к выходному контролю подготовки специалистов // Новые образовательные технологии в ВУЗе / Сборник тезисов Всероссийской научно-методической конференции. Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2001. С.159-160.

6.Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л. Опыт разработки учебно-методического обеспечения подготовки специалистов по ремонту оборудования АЭС // Новые образовательные технологии в ВУЗе / Сборник тезисов Всероссийской научно-методической конференции. Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2001. С. 61-62.

7 Ташлыков О.Л. О проблеме получения достоверных данных по дозовым нагрузкам ремонтного персонала АЭС // Научные труды II отчетной конференции молодых ученых ГОУ УГТУ-УПИ / Сборник тезисов. Издательство УГТУ-УПИ. Екатеринбург 2002. С.190-191

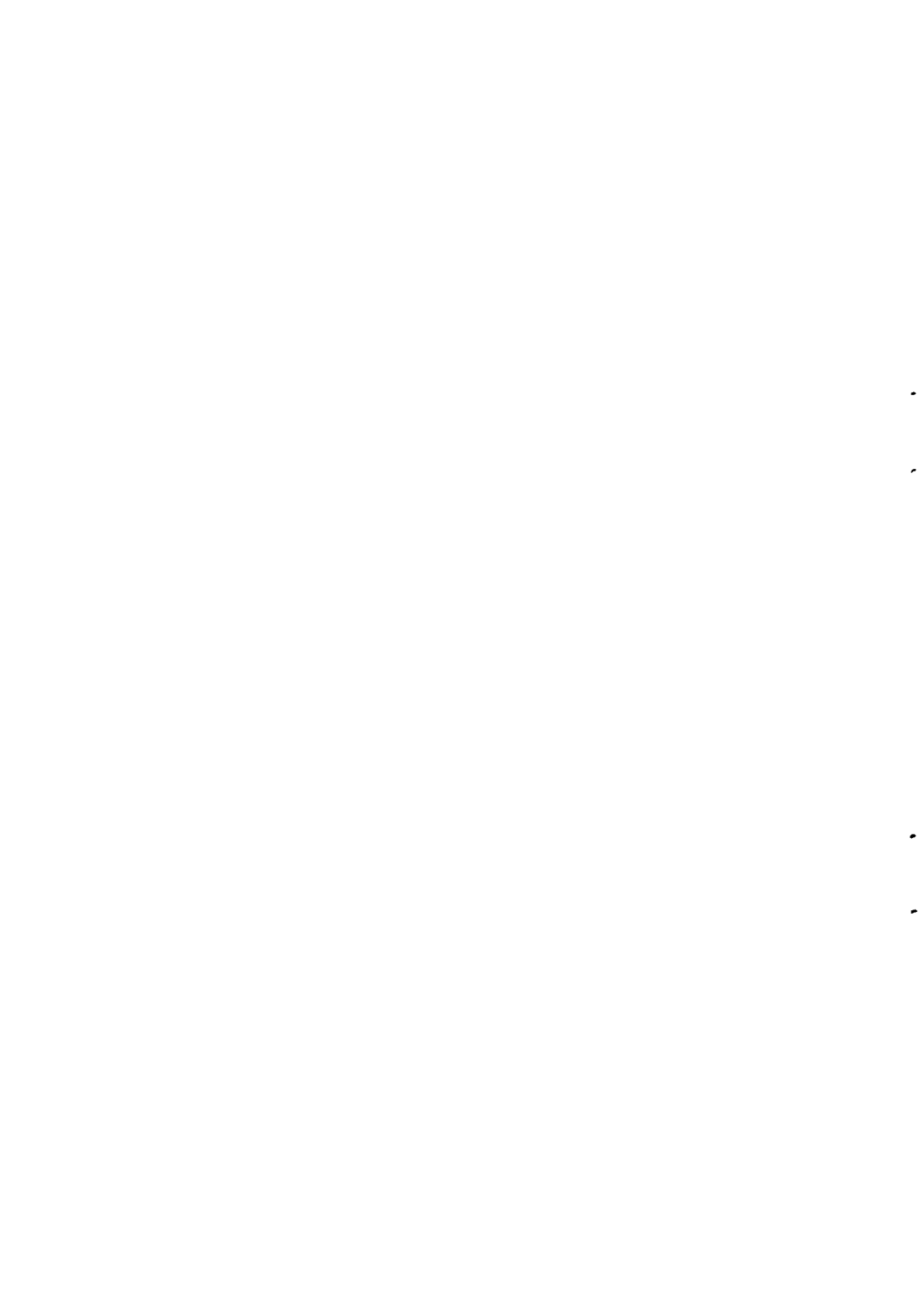
8 Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. О роли обратной связи в оптимизации ремонтных работ и снижении дозовых затрат персонала // Международный конгресс «Энергетика 3000» / Тезисы докладов 21-23 октября 2002 г – Обнинск, ИАТЭ, 2002 г С. 99-101

9.Ташлыков О.Л. Комплексная система оценки дозовых затрат при проведении технического обслуживания и ремонта АЭС // Научные труды III отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ / Сборник тезисов. – Екатеринбург, 2002. С. 212-213,

10. Ташлыков О.Л. Планирование дозовых нагрузок ремонтного персонала АЭС // Научные труды IV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ / Сборник тезисов Издательство ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Екатеринбург 2003. С. 398-399.

11. Ташлыков О.Л. Ремонт оборудования атомных станций: Учеб. пособие для вузов / Под ред. С.Е.Щеклеина. Екатеринбург. Издательство УМЦ УПИ. 2003. 320 с.
12. Ташлыков О.Л., Гончар А.А. Компьютерное моделирование радиационных полей в комплексе мероприятий по реализации принципа ALARA на АЭС // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции – Екатеринбург, 2003 г. С 98-101.
13. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Маркелов Н.И. Математическое моделирование дозовых полей при планировании облучения ремонтного персонала // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №1. – С.39-44.
14. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Маркелов Н.И. Радиационный фактор в проблеме повышения коэффициента использования установленной мощности АЭС // Известия вузов Ядерная энергетика. – 2004. – №1. – С.45-53.
15. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л. О роли обучения в снижении дозовых нагрузок ремонтного персонала АЭС // Экология. Экономика. Безопасность и подготовка кадров для атомной энергетики / Сборник научных трудов. Екатеринбург. УГТУ-УПИ. 2001. С.19-21.
16. Опыт работы Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС / С.Е.Щеклеин, О.Л.Ташлыков, В.И.Велькин, А.Г.Шастин, Ю.И.Сорокин, В.Н.Дементьев, Н.И.Маркелов // Вестник УГТУ-УПИ. 2004, №3 (33). С.251-258.
17. Ташлыков О.Л. О влиянии на эффективность дезактивации конструкционных особенностей систем реакторной установки // Вестник УГТУ-УПИ Научные труды VI отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ - Екатеринбург 2004. С. 187-188.
18. Щеклеин С.Е., Ташлыков О.Л., Велькин В.И., Шастин А.Г., Дементьев В.Н., Маркелов Н.И., Сорокин Ю.И. Опыт сотрудничества концерна «Росэнергоатом» и Уральского государственного технического университета в области подготовки специалистов для технического обслуживания и ремонта оборудования АЭС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №3. – С.121-129.
19. Ташлыков О.Л., Сесекин А.Н., Гончар А.А., Щеклеин С.Е. Об алгоритмизации задачи оценки дозовых нагрузок при планировании ремонтного обслуживания АЭС // Сборник трудов седьмой научно-технической конференции, посвященной 40-летию работы Белоярской АЭС. Том 3.: - Заречный, 2004. С. 161-166.
20. Ташлыков О.Л., Гончар А.А., Щеклеин С.Е. Создание компьютерного интерфейса для прогнозирования дозовых затрат на стадии планирования ремонтного обслуживания АЭС // Сборник трудов седьмой научно-технической конференции, посвященной 40-летию работы Белоярской АЭС. Том 3.. - Заречный, 2004. С. 166-172.

21. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Планирование дозовых затрат ремонтного персонала с помощью компьютерного моделирования // Сборник трудов научно-технической конференции, посвященной 40-летию работы Белоярской АЭС Том 3 : - Заречный, 2004 С 172-179
22. Ташлыков О.Л., Браженко В.А. Анализ влияния технологии производства работ на дозовые затраты ремонтного персонала // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции – Екатеринбург, ГОУ ВПО «УГТУ– УПИ», 2004 г. -С 216-219
23. Ташлыков О.Л., Горбунов А.А. Пути реализации снижения дозовых затрат ремонтного персонала посредством воздействия на фактор расстояния // Энерго- и ресурсосбережение Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции – Екатеринбург, , 2004 г. С.214-216.
24. Ташлыков О.Л., Горбунов А.А. Оптимизация ремонтных работ на атомных электростанциях / Сборник тезисов докладов Всероссийского молодежного научного симпозиума «Безопасность биосферы – 2005» 4-5 мая 2005 г Екатеринбург, УГТУ-УПИ 2005 С 96
25. Куклин М., Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л. О возможности оптимизации облучения персонала при перемещении в радиационных полях с использованием методов динамического программирования // Энерго- и ресурсосбережение Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. -Екатеринбург, ГОУ ВПО «УГТУ– УПИ», 2005.
26. Сесекин А.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Куклин М.Ю., Ченцов А.Г., Кадников А.А. Использование метода динамического программирования для оптимизации траектории перемещения работников в радиационно опасных зонах с целью минимизации облучения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. №2 (в печати).
27. Кадников А.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Оптимизация работ по замене парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции. – Москва, «Росэнергоатом», 2006. с 141-143
28. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Маркелов Н.И. Оптимизация ремонтных работ с учетом дозовых затрат персонала / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции. – Москва, «Росэнергоатом», 2006. с.143-145.



---

Плоская печать

Формат 60 x 84 1/16  
Тираж 80

Бумага писчая  
Заказ № 192

---

Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ-УПИ  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19

2006A  
14570

**# 14570**