МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ
И ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ МИНАТОМА РОССИИ

Методические рекомендации МР 30-1490-2001

Издание официальное

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1. Разработаны творческим коллективом специалистов ГНЦ «Институт биофизики», ДБЧС Минатома России, Государственного концерна «Росэнергоатом» и ГНЦ НИИ Атомных реакторов.
Руководитель творческого коллектива – к.т.н. Савкин М.Н. (ГНЦ «Институт биофизики»).

2. Исполнители: к.т.н. Савкин М.Н., к.м.н. Грачев М.И., Титов А.В., Ядыкина В.С. (ГНЦ «Институт биофизики»).
Соисполнители: к.т.н. Панфилов А.П. (ДБЧС Минатома России), Усольцев В.Ю., к.ф-м.н. Орищенко А.В., Назаров А.В. (ГНЦ НИИ Атомных реакторов), к.т.н. Безруков Б.А. (Государственный концерн «Росэнергоатом»).

3. Документ соответствует требованиям Законов РФ: «О радиационной безопасности населения» № 3–ФЗ от 09.01.96, «О стандартизации» № 5154–1 от 10.06.93. и «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52–ФЗ от 30.03.99.

4. Утверждены и введены в действие ДБЧС Минатома России 1 ноября 2001 г.

5. Внедрены впервые.

Содержание

1. Область применения 91
2. Нормативные ссылки 91
3. Термины и определения 91
4. Общие положения 93
5. Внедрение принципа оптимизации радиационной защиты на предприятии 93
6. Стратегия снижения доз облучения 95
7. Рекомендации по проведению оптимизации 95
7.1. Постановка задачи 95
7.2. Задание вариантов и факторов 96
7.3. Количественное определение факторов для каждого варианта 98
7.4. Сравнение и выбор вариантов 101
7.5. Анализ чувствительности 102
7.6. Представление результатов 103
7.7. Принятие решения 103
Библиографические данные 103
Приложение 1. Принцип оптимизации в радиационной защите 104
Приложение 2. Подходы к выбору числовых значений стоимости 1 чел.-Зв 105
Приложение 3. Методы поддержки принятия решений 106
Приложение 4. Стандартные таблицы для коэффициентов дисконтирования будущих затрат 108
Приложение 5. База данных 109
Приложение 6. Оценка доз облучения 110
Приложение 7. Примеры проведения оптимизации 111
Приложение 8. Применение процедуры «ПРОСМОТР ALARA» с использованием массивов индивидуальных доз персонала 116
Приложение 9. Список исполнителей 125

Согласованы с Заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации по объектам и территориям, обслуживаемым ФУ «Медбиоэкстрем», О.И.Шамовым 31 октября 2001 г.

Утверждены Руководителем Департамента безопасности и чрезвычайных ситуаций Минатома России А.М.Агаповым 1 ноября 2001 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛА ПРЕДПРИЯТИЙ МИНАТОМА РОССИИ

Методические рекомендации
МР 30-1490-2001
Дата введения – с момента утверждения

© Министерство Российской Федерации по атомной энергии.
Настоящие методические рекомендации не могут быть полностью или частично воспроизведены и тиражированы без разрешения Минатома России.

1.Область применения

1.1. Настоящие рекомендации распространяются на проведение оптимизации радиационной защиты персонала при нормальной работе предприятий Минатома России.

1.2. В настоящих Рекомендациях приведены общие положения, порядок и методы проведения оптимизационных исследований и даны рекомендации по применению принципов оптимизации на предприятиях Минатома России в связи с внедрением Норм радиационной безопасности НРБ-99 и Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99.

1.3. Настоящие Рекомендации предназначены для использования службами радиационной безопасности и лицами, ответственными за обеспечение радиационной безопасности персонала на предприятиях Минатома России, и службами Федерального управления «Медбиоэкстрем», осуществляющими надзор за обеспечением радиационной безопасности персонала.

2. Нормативные ссылки

В настоящих Рекомендациях нашли отражение следующие нормативные документы:

- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). СП 2.6.1.758-99. М.: Минздрав России, 1999;
- Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). СП 2.6.1.799-99. М.: Минздрав России, 2000;
- Общие требования к построению, изложению и оформлению санитарно-гигиенических и эпидемиологических нормативных и методологических документов. Р1.1.003-96. М.: Минздрав России, 1998;

3.Термины и определения

ALARA просмотр (обзор). Систематизированный сбор и анализ данных о фактической радиационной защите для проверки соответствия исследуемой ситуации в определенный момент времени оптимальному варианту защиты [3].

Анализ «ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА». Количественный метод оптимизации радиационной защиты, используемый для определения условий, при которых облучение снижено настолько, что его любое дальнейшее уменьшение будет неоправданным с позиции принципа оптимизации. Различают общий, дифференциальный и расширенный анализ «ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА» [3].

База данных. Совокупность данных, организованных по определенным правилам,

предусматривающим общие принципы описания, хранения и манипулирования данными, независимая от прикладных программ [ГОСТ 20886-85].

Вариант радиационной защиты. Специальный проект защиты, или набор эксплуатационных процедур, или технология выполнения защитного мероприятия [3].

Дисконтирование. Процедура приведения разновременных затрат к заданному моменту времени с учетом темпа падения уровня абсолютных цен [3].

Доза эффективная коллективная. Мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения; она равна сумме индивидуальных эффективных доз. Единица эффективной коллективной дозы – человеко-зиверт (чел.-Зв) [НРБ-99].

Доза эффективная. Величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T ,$$

где H_T – эквивалентная доза в органе или ткани T; W_T – взвешивающий коэффициент для органа или ткани T. Единица эффективной дозы – зиверт (Зв) [НРБ-99].

Методы оптимизации. Количественные методы оценки различных вариантов защиты, выявления отличий между ними и выбора наилучшего варианта [3].

Персонал. Лица, работающие с техногенными источниками ионизирующего излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б) [НРБ-99].

Принцип нормирования. Непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения [НРБ-99].

Принцип оптимизации (принцип ALARA). Поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения [НРБ-99].

Принцип обоснования. Запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением [НРБ-99].

Процедура оптимизации. Установленный порядок решения задач оптимизации радиационной защиты [3].

Расходы основные (капитальные затраты). Все расходы от предварительного планирования до ввода в эксплуатацию. Основные расходы могут быть как прямыми (изготовление и установка оборудования), так и косвенными (подготовка персонала) [3].

Расходы эксплуатационные (текущие затраты). Все расходы, оцениваемые обычно за год, на обслуживание и оплату труда, управление и эксплуатацию, затраты на технические и административные нужды, а также налоги [3].

Рекомендации. Документ в области стандартизации, метрологии, сертификации, содержащий добровольные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки (правила, процедуры), методы (способы, приемы) выполнения работ соответствующих направлений, а также рекомендуемые правила оформления результатов этих работ. Рекомендации разрабатывают при целесообразности предварительной проверки работ до разработки и принятия соответствующих Правил или Стандартов. [ГОСТ Р 1.10-95].

Риск радиационный. Вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения [НРБ-99].

Ставка процентная. Норма доходности финансово-кредитных сделок, размер которой зависит от вида кредита, его срока, своевременности погашения. Размеры процентных ставок, устанавливаемые коммерческими и государственными банками во главе с центральным (национальным) банком, формируют иерархическую систему процентных ставок [7].

Ущерб для здоровья. Математическое ожидание величины нанесенного вреда здоровью лицам, подвергшимся облучению с учетом вероятности и тяжести последствий радиобиологических эффектов, как стохастических, так и детерминированных [3].

Фактор. Мера или качество, с помощью которого различаются варианты радиационной защиты [3].

Примечание: Термины и их определения из [3] приведены в переводе авторов настоящих Рекомендаций.

4. Общие положения

4.1. Радиационная безопасность персонала считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности (обоснование, оптимизация, нормирование) и требования радиационной защиты, установленные Федеральным законом «О радиационной безопасности населения» № 3–ФЗ от 09.01.96 (Собрание законодательства Российской Федерации, 1996, № 3, ст.141), НРБ-99 и ОСПОРБ-99.

4.2. Контроль за реализацией основных принципов должен осуществляться путем проверки выполнения следующих требований:

- принцип обоснования должен применяться на стадии принятия решения уполномоченными органами при проектировании новых источников излучения и радиационных объектов, выдаче лицензий и утверждении нормативно-технической документации на использование источников излучения, а также при изменении условий их эксплуатации;
- принцип оптимизации предусматривает поддержание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных (ниже пределов, установленных НРБ-99), так и коллективных доз облучения, с учетом социальных и экономических факторов;
- принцип нормирования, требующий непревышения индивидуальных пределов доз и других нормативов радиационной безопасности, должен соблюдаться всеми организациями и лицами, от которых зависит уровень облучения людей.

4.3. Принцип оптимизации имеет важное практическое значение для обеспечения радиационной безопасности на всех этапах жизнедеятельности радиационно-опасного объекта.

4.4. В условиях нормальной эксплуатации источника излучения оптимизация облучения персонала (совершенствование радиационной защиты) должна осуществляться при уровнях облучения в диапазоне от соответствующих пределов доз до уровня регистрации 0,5 мЗв/год индивидуальной эффективной дозы.

4.5. Процедура оптимизации радиационной защиты заключается в последовательном выполнении по определенным правилам ряда этапов. Общая схема, иллюстрирующая эти этапы, приведена на рис.1.

4.6. В соответствии с ОСПОРБ-99 реализация принципа оптимизации, как и принципа обоснования, должна осуществляться по специальным методическим указаниям, утверждаемым федеральными органами государственного надзора за радиационной безопасностью, а до их издания – путем проведения радиационно-гигиенической экспертизы обосновывающих документов. Настоящие Рекомендации разработаны для предварительной апробации процедуры проведения оптимизационных исследований на предприятиях Минатома России.

5. Внедрение принципа оптимизации радиационной защиты на предприятии

5.1. Ответственность за реализацию принципа оптимизации возлагается на службы и лица, ответственные за организацию и обеспечение радиационной безопасности на объектах предприятий (ОСПОРБ-99).

5.2. Организационными структурами, которые призваны обеспечить внедрение принципа могут являться:

- группа оптимизации в составе службы радиационной безопасности;
- секции технического (научно-технического) совета предприятия.

5.2.1. Задачами группы оптимизации являются:

- просмотр ALARA с целью выявления недостатков в обеспечении радиационной безопасности и определения области, где улучшение может быть полезным;
- создание и наполнение баз данных для оптимизации;

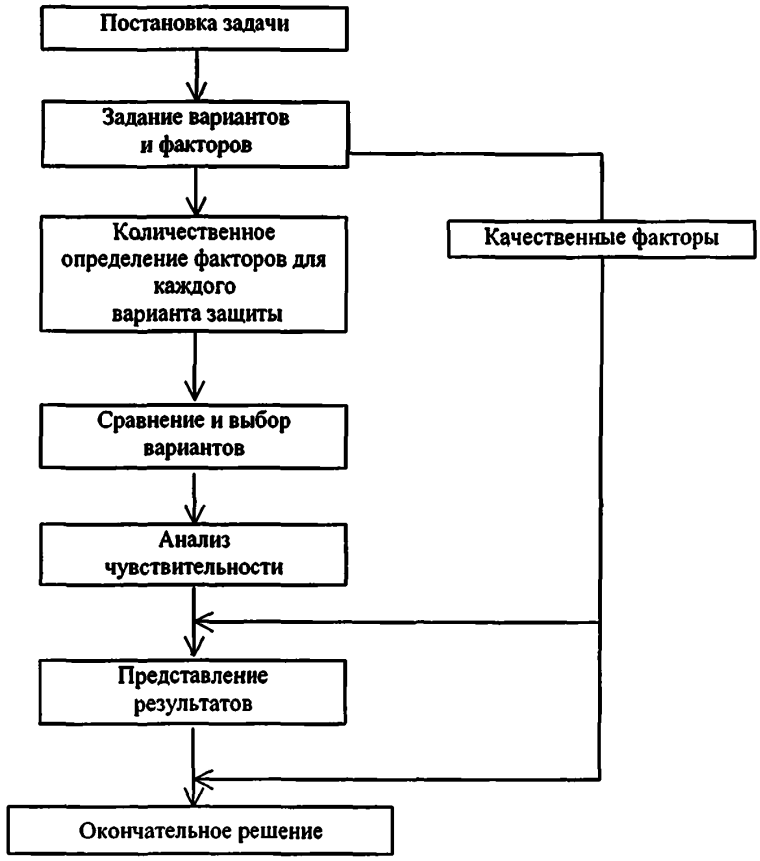

Рис.1. Основные шаги процедуры оптимизации.

- проведение процедуры оптимизации;
- разработка соответствующих инструкций;
- контроль над внедрением и выполнением требований новых мер защиты.

5.2.2. В задачи секции технического совета входят:

- адаптация методических материалов к условиям конкретных предприятий;
- воспитание и обучение персонала предприятий.

5.3. Для стимулирования внедрения оптимизации, критического подхода и стремления к знаниям в вопросах радиационной безопасности необходимо прививать и поддерживать культуру безопасности, которая обеспечивает:

- использование принципов оптимизации как основы управления радиационной безопасностью;
- немедленное выявление и устранение проблем, влияющих на защиту и безопасность;
- четкое распределение обязанностей каждого лица в области обеспечения радиационной безопасности и наличие у каждого лица надлежащей подготовки и квалификации;
- четкое разграничение полномочий в принятии решений по вопросам безопасности;
- принятие организационных мер по обеспечению обмена соответствующей информа-

цией, касающейся безопасности.

5.4. Подготовка и обучение должны касаться не только специалистов, занимающихся обеспечением радиационной безопасности, но и всего персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения.

6. Стратегия снижения доз облучения

6.1. При выработке стратегии снижения доз облучения персонала следует исходить из следующих основных положений ОСПОРБ-99:

- индивидуальные дозы должны в первую очередь снижаться там, где они превышают допустимый уровень облучения;
- мероприятия по коллективной защите персонала в первую очередь должны осуществляться в отношении тех источников излучения, где возможно достичь наибольшего снижения коллективной дозы облучения при минимальных затратах;
- снижение доз от каждого источника излучения должно, прежде всего, достигаться за счет уменьшения облучения критических групп для этого источника излучения.

6.2. Для определения области, где необходимо улучшение радиационной защиты, проводится «просмотр ALARA» – системный просмотр особых ситуаций или существующей программы радиационной защиты. Цель таких просмотров – не только снижение доз, но также – выявление неэффективных мер защиты.

6.3. Оптимизация с целью снижения индивидуальных доз ниже существующих пределов доз отличается от оптимизации с целью улучшения радиационной защиты, когда нет превышения пределов доз.

В первом случае задачей исследований является анализ возможных вариантов защиты, при которых выполняется требование не превышения доз (принцип нормирования) и нахождения среди них варианта, удовлетворяющего принципу оптимизации.

Во втором случае задача состоит в выборе наиболее оптимального варианта защиты по сравнению с существующим вариантом.

7. Рекомендации по проведению оптимизации

В полном объеме процедура оптимизации, в соответствии со схемой, приведенной на рис.1, применяется, как правило, для решения крупных задач, связанных с расширением производства, дорогостоящим ремонтом или заменой оборудования. Для решения текущих задач вполне достаточно проведение отдельных этапов, как показано в примерах Приложения 7.

7.1. Постановка задачи

Перед началом проведения оптимизационных исследований необходимо точно поставить задачу с целью исключения напрасных усилий и ресурсов в выполнении последующего анализа.

Постановка задачи включает четыре этапа:

- осознание сути задачи;
- определение цели исследования;
- определение границ области исследования;
- проведение консультаций и окончательная формулировка задачи.

Осознание сути задачи.

На этом этапе необходимо оценить сложность задачи, ее статус, с точки зрения уровня принятия решения, время и средства, требуемые для ее решения.

По сложности все задачи можно условно разбить на четыре группы:

- простые задачи, не требующие специальных организационных и технических мероприятий;
- относительно простые задачи, требующие некоторых вычислений и включающие малое число факторов;
- сложные задачи, требующие серьезных расчетов и усилий специалистов различного

профиля;

• стратегические задачи – задачи с серьезным социальным и политическим значением.

Статус задач определяется уровнем принятия окончательного решения:

• самим специалистом, проводящим исследование;

• начальником службы радиационной безопасности объекта или предприятия;

• руководителем предприятия;

• руководителями более высокого ранга.

Постановка задачи позволит определить необходимость проведения дальнейших шагов оптимизации, если решение задачи не очевидно для опытного специалиста в области радиационной безопасности, и обозначить круг специалистов других специальностей (экономистов, технологов, конструкторов и т.д.), которых следует привлечь к исследованиям.

Определение цели исследования.

Следует точно и недвусмысленно определить и записать цель исследования с определенным уровнем детализации. Это особенно важно в случаях, когда оптимизационное исследование проводят одни, а решение принимают другие лица.

Определение границ области исследования.

Необходимо четко определить, что должно входить в оптимизационный анализ и что остается за его пределами, в том числе:

• необходимо ли рассмотрение доз облучения других групп персонала;

• каковы ограничения финансовых ресурсов, которые могут быть израсходованы для решения задачи, и как они соотносятся с ожидаемыми затратами на внедрение защитной меры;

• какие уровни точности и детализации необходимы при проведении анализа.

Проведение консультаций и окончательная формулировка задачи.

Чтобы убедиться, что задача поставлена правильно, необходимо проконсультироваться со специалистом, принимающим решение, а, при необходимости, и с руководителем более высокого ранга. Если постановка задачи будет признана правильной, ее следует оформить документально. Только после этого можно будет приступать к дальнейшему анализу.

7.2. Задание вариантов и факторов

Варианты радиационной защиты.

Варианты представляют собой альтернативные действия, направленные на радиационную защиту, являющиеся возможными решениями задачи. Вариант радиационной защиты имеет целью снижение дозы облучения (индивидуальной или коллективной), снижение вероятности облучения, или снижение затрат на защиту при условии непревышения достигнутого уровня безопасности персонала.

Обобщенным показателем уровня безопасности установок, технологий, организации производства и культуры безопасности применительно к конкретным людям является индивидуальная доза (рис.2).

Индивидуальная доза облучения персонала зависит от следующих параметров на рабочих местах и в рабочих помещениях:

• мощности дозы внешнего гамма-нейтронного излучения, потоков бета-частиц;

• объемной активности радионуклидов в воздухе;

• времени облучения.

Коллективная доза определяется как сумма индивидуальных доз персонала, т.е. зависит как от величины индивидуальных доз, так и от численности персонала.

В связи с этим варианты радиационной защиты должны быть связаны с уменьшением указанных выше составляющих.

Снижение мощности дозы на рабочих местах и в рабочих помещениях может быть достигнуто путем:

• установки дополнительной физической защиты;

• снижения мощности источника излучения на период проведения работ;

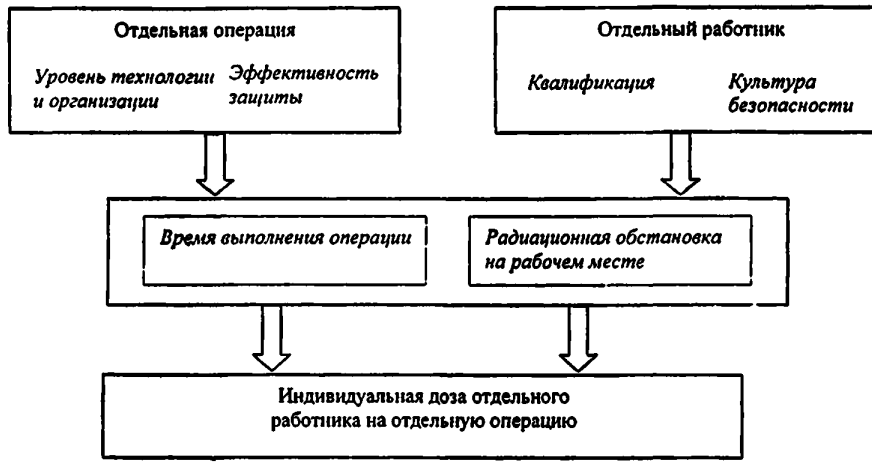

Рис.2. *Схема формирования индивидуальной дозы отдельного работника на отдельную операцию.*

• дезактивации рабочего места и помещения до начала работы, когда значимо внешнее облучение от поверхностного загрязнения.

При наличии ингаляционного пути воздействия необходимо рассмотреть использование дополнительных средств индивидуальной защиты и варианты, связанные со снижением концентрации радионуклидов в рабочем помещении (например, с помощью принудительной вентиляции, или применением мер, снижающих утечки радионуклидов из источника).

Снижение времени облучения обычно достигается за счет оптимизации регламента работ, эффективного управления работами, использованием более совершенных рабочих средств и специальным обучением персонала.

Уменьшение численности облучаемого персонала достигается внедрением автоматических устройств или робототехники, пересмотром периодичности выполнения работ и т.д.

Для ситуаций, когда индивидуальные дозы близки или могут превышать дозовые пределы или контрольные уровни, следует рассмотреть также вариант с увеличением численности персонала.

Факторы в вариантах радиационной защиты.

Фактор, используемый в оптимизационной задаче, определяется как некоторая мера или качество, с помощью которого различаются варианты радиационной защиты.

Основными факторами в любой оптимизационной задаче являются:

• затраты на осуществление варианта защиты, включая прямые капитальные затраты, косвенные основные расходы, эксплутационные расходы и косвенную прибыль;

• дозы облучения (коллективные и/или индивидуальные, их распределение во времени и т.п.).

В отдельных случаях могут быть значимы и другие факторы, например, угроза физического увечья от нерадиационных факторов, неудобства в работе при использовании средств индивидуальной защиты и т.п.

Составление перечня вариантов и факторов.

На стадии эксплуатации практическими задачами оптимизации могут быть:

• проверка соответствия предлагаемого варианта радиационной защиты принципу оптимизации;

• проверка соответствия действующей системы обеспечения радиационной безопасности принципу оптимизации;

• снижение индивидуальных или коллективных доз облучения определенной группы персонала.

В первом случае варианты уже заданы: существующий и новый предлагаемый.

В остальных случаях необходимо рассмотреть возможные варианты и определить оптимальный вариант.

Подход к формированию списка вариантов может быть следующим:

• Вся работа выбранной группы персонала разбивается на элементарные эпизоды, различающиеся по месту и условиям работы, длительности работы, путям радиационного воздействия, дозам облучения и т.п.

• Оцениваются дозы облучения при выполнении работы в этих эпизодах (индивидуальные и коллективные) и отбираются эпизоды, при которых формируются основные дозовые нагрузки.

Результаты оценок доз рекомендуется представить в следующем табличном виде.

Эпизод работы	Место работы	Источники излучения	Факторы радиационного воздействия	Продолжительность работы	Доза облучения	Условия работы (степень комфортабельности)	Используемые средства защиты степень автоматизации работы)

• В выбранных эпизодах работы рассматриваются возможные меры по снижению доз облучения. Для этого рекомендуется использовать метод «мозгового штурма», т.е., когда эксперты предлагают не только очевидные варианты, но и менее очевидные, а может быть, на первый взгляд, и невыполнимые. На этом этапе важно зафиксировать все варианты и факторы без анализа их значимости и возможности осуществления.

• После составления исчерпывающего списка, он делится на два: один – со всеми возможными факторами, другой – со всеми возможными вариантами, и детально обсуждается с целью определения только осуществимых вариантов и значимых, по мнению экспертов, факторов, которые будут использованы в последующем анализе. Отобранные варианты могут представлять варианты снижения доз в отдельном эпизоде работы или комбинацию вариантов защиты в нескольких эпизодах работы рассматриваемой группы персонала.

В составленный перечень вариантов и значимых факторов могут попасть варианты, выходящие за установленные границы исследования, или предполагающие более высокий уровень принятия решения, чем предполагалось при постановке задачи. Поэтому необходимо проконсультироваться с руководителем, принимающим решение, и, при необходимости, с другими экспертами или администрацией предприятия.

7.3. Количественное определение факторов для каждого варианта

Содержание работы на данном этапе состоит в количественной оценке каждого фактора в единых показателях, например, в денежном эквиваленте, и определения неопределенности (погрешности) этих оценок.

Расходы на защиту.

Расходы на защиту в общем случае состоят из разового капиталовложения (основные расходы: прямые и косвенные) и расходов на последующую ежегодную эксплуатацию.

Общая структура расходов представлена на рис.3.

Основные составляющие расходов, которые следует принимать во внимание для наиболее часто используемых защитных мер, приведены в Приложении 5.

Возможно, что при некоторых вариантах защиты образуются отрицательные расходы, т.е. доходы, например, за счет снижения затрат по заработной плате после автоматизации процесса работы. Для определения затрат на радиационную защиту используются три метода:

• грубая оценка затрат;

• оценка приведенных затрат;

• оценка ежегодных затрат.

Грубая оценка затрат на защиту определяется выражением:

$$X = X_C + X_O \cdot t, \qquad (1)$$



***Рис.3.** Структура затрат на внедрение защитных мер.*

где: X_C – основные расходы; X_O – годовые эксплуатационные расходы; t – срок службы оборудования в годах. Грубую оценку затрат применяют в тех случаях, когда можно пренебречь временными изменениями ценности денежных ресурсов.

Если временными изменениями денежных ресурсов пренебречь нельзя, то следует применять дисконтирование, т.е. приведение затрат к заданному моменту времени:

$$X = X_C + \sum_{n=1}^{T} \dot{X}_n \cdot (1+r)^{-n}, \qquad (2)$$

где: X_n – эксплуатационные затраты в n-год после начала эксплуатации, r – процентная ставка (тождественное название – норма дисконтирования).

В оптимизационных исследованиях следует ориентироваться на величину процентной ставки, установленную в государственном секторе.

Если финансовые средства на приобретение, монтаж и эксплуатацию системы радиационной защиты берутся взаймы с последующими ежегодными выплатами долга, то альтернативой вычисления приведенных затрат являются расчеты ежегодных затрат. В этом случае капитальные затраты разносят на запроектированное время жизни защитного оборудования таким образом, чтобы они могли быть приплюсованы к ежегодным расходам по эксплуатации и техническому обслуживанию.

Выплаты в n-й год X_n, необходимые, чтобы расплатиться за капитальные затраты X_C,

будут следующими:

$$X_n = X_t \cdot \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1}. \qquad (3)$$

Определение стоимости радиационного ущерба здоровью.

Для оптимизации необходимо, чтобы радиационный ущерб определялся в стоимостном выражении. Так как радиационный ущерб здоровью при дозах, не приводящих к возникновению детерминированных эффектов, пропорционален коллективной дозе, то принимается, что экономический эквивалент ущерба здоровью Y_1 также пропорционален коллективной дозе:

$$Y_1 = \alpha \cdot S, \qquad (4)$$

где: α – стоимость единицы коллективной дозы, S – коллективная доза.

С приближением индивидуальных доз к дозовым пределам (или превышением его) вводится вторая составляющая ущерба. Как правило, вторая составляющая принимается во внимание при дозах, превышающих ~(25...30)% предела дозы (примерно 5 мЗв/год).

Экономический эквивалент второй составляющей, Y_2, принимается равным:

$$Y_2 = \sum \beta_j \cdot S_j, \qquad (5)$$

где: β_j – стоимость единицы коллективной дозы для j-го диапазона индивидуальных доз, S_j – величина коллективной дозы для j-го диапазона индивидуальных доз.

При рассмотрении обеих составляющих радиационного ущерба суммарный ущерб (Y_1+Y_2) обычно представляют в виде $\sum \alpha(d_j) \cdot S_j$, где $\alpha(d_j) = \alpha + \beta_j$, а d_j – значение индивидуальной дозы.

Подходы, используемые для выбора числовых значений α и $\alpha(d_j)$, приведены в Приложении 2.

Количественная оценка факторов с использованием понятия полезности.

При наличии в оптимизационном исследовании факторов, которые нельзя оценить количественно в денежном эквиваленте, используется количественная оценка с помощью понятия «полезности», u_{ij}, j-го фактора в i-ом варианте защиты и весовых коэффициентов, k_j, отражающих важность j-го фактора в оптимизационном исследовании. Обычно значения u_{ij} выбираются в диапазоне от 0 до 1, а k_j нормируются так, чтобы их сумма по всем факторам равнялась 1.

«Полезность», равная 1, присваивается j-му фактору в том варианте защиты, в котором он имеет наилучшее, с точки зрения оптимизации, значение, а 0 – в варианте, где его значение наихудшее. Например, с точки зрения оптимизации, необходимо получать наибольшее значение предотвращенной дозы при минимальных затратах на защиту. Поэтому «полезность» такого фактора как стоимость защиты максимальна в варианте защиты с минимальной стоимостью, а фактора «радиационный ущерб» – в варианте с минимальной коллективной дозой, т к. при этом значение предотвращенной дозы по сравнению с нулевым вариантом максимально. *Для промежуточных значений количественного эквивалента фактора* «полезность» обычно определяется исходя из линейной зависимости (см. рис.4, зависимость А). При наличии каких-либо дополнительных ограничений (например, по максимальным финансовым средствам, которые можно истратить на защиту, или по максимальной индивидуальной дозе) эксперты могут выбрать другую зависимость, при которой «полезность» фактора более резко снижается до 0 при приближении его количественного значения к пороговому значению, например, как зависимость Б на рис.2, аналитическое выражение которой принимается в виде $a - b \cdot exp(c \cdot x)$.

Значения весовых коэффициентов определяют двумя методами: подстановкой или прямой оценкой.

С помощью подстановки весовые коэффициенты могут быть оценены для факторов, определенных количественно в одинаковых единицах – денежных или других (например, в баллах):

$$k(X_n)/R(X_n) = k(X_m)/R(X_m),$$

$$R(X) = R_{макс.}(X) - R_{миним.}(X),$$

где: $k(X_n)$ *и* $k(X_m)$ – весовые коэффициенты факторов X_n и X_m, соответственно; $R_{макс.}(X)$ и $R_{миним.}(X)$ – максимальные и минимальные количественные эквиваленты фактора X.

Прямая оценка заключается в определении весовых коэффициентов на основании экспертных оценок степени важности факторов. Факторы одинаковой степени важности должны иметь одинаковый вес.

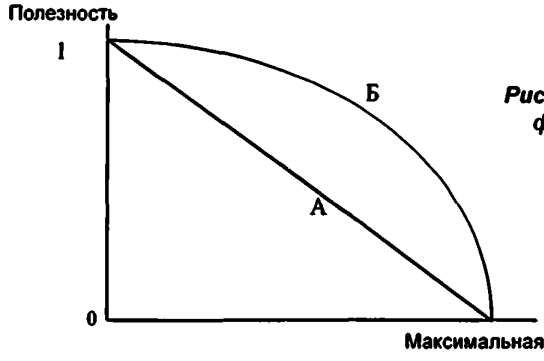

Рис. 4. Линейная и нелинейная функция эффективности

7.4. Сравнение и выбор вариантов

Целью данного этапа является определение оптимального варианта радиационной защиты.

7.4.1. При наличии большого числа вариантов необходимо провести предварительный анализ с целью исключения из дальнейшего рассмотрения экономически невыгодных вариантов. Для этого используется скрининговый метод, известный как анализ СТОИМОСТЬ–ЭФФЕКТИВНОСТЬ. Описание данного метода приведено в Приложении 1.

7.4.2. Для выбора оптимального варианта из числа отобранных и базового (нулевого) варианта используются следующие методы поддержки принятия решений:

- анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА;
- дифференциальный анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА;
- расширенный анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА;
- многофакторный анализ эффективности.

Краткое описание данных методов приводится в Приложении 1.

7.4.3. Первые три метода используются в тех случаях, когда значимые факторы могут быть заданы количественно в денежных единицах, т.е. когда значимыми факторами являются стоимость защиты и радиационный ущерб.

Анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА и дифференциальный анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА используется в предположении, что коллективная доза является достаточно хорошим показателем радиационного ущерба. Эти методы представляют собой версии одного метода и дают одинаковые результаты.

При необходимости включения в оптимизационные исследования уровней индивидуальных доз в качестве дополнительного компонента стоимости радиационного ущерба, используется расширенный анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА.

Все эти методы довольно просты и могут быть реализованы специалистами по радиационной безопасности предприятия.

Многофакторный анализ эффективности является более трудоемким методом, требующим проведения экспертных оценок «полезности» и весовых коэффициентов для факторов, включенных в оптимизационные исследования. Он используется, когда значимых факторов слишком много, или некоторые факторы сложно задать в денежных единицах.

Отметим, что при рассмотрении в качестве значимых факторов стоимости защиты и радиационного ущерба, методы анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА, дифференциальный анализ ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА и многофакторный анализ эффективности идентичны, если в последнем используется линейная модель определения «полезности», а весовые коэффициенты определены в соответствии с п.7.3.

7.5. Анализ чувствительности

Цель анализа чувствительности – определить устойчивость результатов анализа к неопределенностям задания факторов, а также к принятым предположениям и допущениям. Такой анализ проверяет относительную значимость различных источников неопределенности, входящих в процедуру оптимизации.

В процедуре оптимизации источниками неопределенностей, которые рассматриваются на данном этапе, являются:

- значения параметров, входящих в аналитическую процедуру;
- факторы, включенные в аналитическую процедуру;
- другие альтернативные варианты, исключенные из рассмотрения на предыдущих шагах оптимизации.

Чувствительность к значениям параметров.

Параметры, включенные в процесс оптимизации, определяются либо непосредственно по данным наблюдения, измерения и оценок, либо, при отсутствии возможности их прямого измерения, исходя из предположений и экспертных оценок. В обоих случаях они задаются с погрешностями, которые должны быть определены на этапе количественного задания факторов.

Из всех параметров, использованных для количественной оценки какого-либо фактора, следует выделить те, погрешности которых вносят определяющий вклад в итоговую погрешность фактора.

При оценке стоимости варианта защиты следует рассмотреть диапазон варьирования капитальных и эксплуатационных затрат, включая возможные изменения цен в период от проведения оптимизационных исследований до начала внедрения данной защитной меры в результате инфляционных процессов. Если для определения затрат на защиту применяются методы оценки приведенных или ежегодных затрат, следует рассмотреть также чувствительность к значениям параметра «норма дисконтирования».

Для определения основных источников неопределенности оценок индивидуальных и коллективных доз анализируются погрешности используемых средств ИДК или средств измерения параметров радиационной обстановки (указаны в технических условиях, паспортах на данные средства), определения времени, затрачиваемого на выполнение эпизода работы, расчетных методов и т.д. Когда доза оценивается по результатам измерения параметров радиационной обстановки в рабочем помещении, неопределенность ее оценки зависит также от диапазона варьирования измеряемой величины по помещению. При оценке доз облучения от ингаляционного поступления радионуклидов основная неопределенность может быть обусловлена погрешностью дозового коэффициента, зависящего от дисперсности аэрозолей.

Обязательно следует определить чувствительность результатов оптимизации к параметру α в диапазоне от 1 до 5 его официально установленных значений. Если официально установленных значений α нет, то следует рассмотреть чувствительность результатов к изменению α в диапазоне от значения годового душевого национального дохода до 2–3 значений дохода предприятия в расчете на 1 человека из персонала группы А.

При использовании в оптимизационном исследовании метода многофакторного анализа эффективности анализируется чувствительность результатов к значениям принятых весовых коэффициентов в диапазоне от минимальных до максимальных значений экспертных оценок.

Для проведения анализа чувствительности существует довольно много способов, но в большинстве задач достаточно использовать простейший – изменение одного параметра в

пределах области его неопределенности и пересчет результатов задачи оптимизации. Рекомендуется сначала рассмотреть крайние значения неопределенности параметра. Если при этом решение остается неизменным, то, следовательно, данный параметр не является критическим в данном оптимизационном исследовании. В противном случае следует рассмотреть, насколько реальным является выбранное значение параметра и предпринять меры по возможному его уточнению.

Может также оказаться полезным графическое представление результатов анализа чувствительности, т.е. построение зависимости суммарных затрат для каждого варианта защиты от значений параметра в пределах его неопределенности.

Чувствительность к выбору факторов.

В качестве оптимизационного исследования были выбраны наиболее значимые с точки зрения экспертов факторы, которые включались в анализ. На этапе анализа чувствительности следует проверить, не могут ли нерассмотренные факторы повлиять на результаты исследования.

Чувствительность к выбору вариантов защиты.

В заключительной части анализа чувствительности следует пересмотреть выбор вариантов защиты. В процессе исследования могут возникнуть новые варианты или необходимость пересмотра, т.е. варианты, которые не были включены на предыдущих этапах.

7.6. Представление результатов

При представлении результатов оптимизации для принятия окончательного решения должны быть коротко и понятно отражены все этапы оптимизации, в том числе:

- цель исследования;
- обоснование выбора контингента персонала;
- источники информации, использованной при исследовании;
- рассмотренные варианты защиты и обоснование их выбора для последующего анализа;
- рассмотренные факторы и обоснование их значимости;
- обоснование выбора метода поддержки принятия решений;
- принятые значения параметров и возможный диапазон их варьирования;
- специалисты, привлеченные для экспертных оценок;
- использованные методы для расчетов дозовых величин, стоимости защиты и т.п.;
- результаты, полученные при исследовании (оптимальный вариант защиты);
- результаты анализа чувствительности с указанием диапазона значений α, в котором предлагаемый вариант оптимален;
- обоснование проведения дополнительных исследований (при необходимости).

Четкое представление результатов особенно важно в случаях, когда процесс исследования и принятия решения осуществляется различными лицами.

7.7. Принятие решения

Применение процедуры оптимизации приводит к получению оптимального результата с различными оговорками. Поэтому в большинстве случаев результат оптимизации не является конечным решением и может рассматриваться как рекомендация, помогающая ответственному лицу принять оптимальное решение.

Окончательное решение всегда остается прерогативой специалиста, ответственного за его принятие.

Библиографические данные

1.Рекомендации МКРЗ. Оптимизация радиационной защиты на основе анализа соотношения ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА. Публикация 37 МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Optimization and Decision-Making in Radiological Protection. ICRP Publication 55, Ann. ICRP 20(1), Oxford: Pergamon Press, 1989.
3. Radiation Protection. ALARA from theory towards practice. EUR 13796 EN, Final report.

Brussels, Luxembourg: Commission of the European Communities, 1991.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99). СП 2.6.1.758-99. М.: Минздрав России, 1999.
5. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения. Серия изданий по безопасности № 115, МАГАТЭ, Вена, 1997.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). Санитарные правила и нормы СП 2.6.1.799-99. М.: Минздрав России, 2000.
7. В.Коноплицкий, А.Филина. Это бизнес. Толковый словарь экономических терминов. Киев: «Альтерпрес», 1996.
8. Implication of Commission Recommendation that Doses be Kept as Low as Reasonably Achievable. ICRP Publication 22. Oxford: Pergamon Press, 1973.
9. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Ч.1. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Публикация 60, ч.1, 61 МКРЗ, М.: Энергоатомиздат, 1994.
10. C.Lefaure. Monetary Values of the Person-Sievert. From Concept to Practice: The Findings of an International Survey. CEPN Report № 254, 1998.
11. J.Lochard, C.Lefaure, C.Schieber and T. Schieder. A model for the determination of monetary values of the man-sievert. J. Radiol. Prot. Vol 16. №3, pp.201-204, 1996.
12. T. Schieder, G.Leblanc andC.Schieber. The use of the willingness to pay approach for the determination of monetary values of man-sievert. CEPN Working Document. Fontenay-aux-Roses: CEPN, 1996.
13. C. Lefaure. International survey on the use of the monetary value of the person-sievert. Risk and Prevention. Bulletin of the Nuclear Protection Evaluation Centre. №17, 1999.

Приложение 1. Принцип оптимизации в радиационной защите

В 1990 г. Международная Комиссия по радиологической защите (МКРЗ) опубликовала рекомендации (Публикация 60), в которых были определены три фундаментальных принципа, обычно называемые обоснование, оптимизация и нормирование, которые составляют основу современной системы радиационной защиты. В принятых в России Нормах Радиационной Безопасности НРБ-99 данные принципы сформулированы в следующей редакции:

- не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);
- поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

Применение этих принципов представляет собой переход от ограничения индивидуальных доз к снижению доз до оптимального уровня. В основе концепции оптимизации уровней облучения (*ее другое тождественное название* ALARA, *являющееся сокращением выражения* «As Low As Reasonably Achievable» – «настолько низко насколько разумно достижимо») лежат две важные предпосылки:

- отсутствие порога для стохастических эффектов;
- ограниченность средств, которые могут быть использованы для обеспечения радиационной защиты.

Отсутствие пороговой дозы возникновения стохастических эффектов при воздействии ионизирующего излучения на организм человека свидетельствует, что безопасного уровня радиации не существует, и, следовательно, необходимо стремиться к снижению облучения, насколько это возможно.

С другой стороны, радиационная защита, как и многие другие практические задачи, подчиняется «закону убывающей эффективности»: первоначальные затраты на защиту могут привести к значительному снижению доз облучения, однако, последующие затраты дают все меньший эффект. Если бы ресурсы были неограниченны, то этот закон не имел бы значения для радиационной защиты. Но, т.к. неограниченных ресурсов не бывает, закономерен вопрос: как далеко нужно идти в снижении доз? Решение следует искать в некотором компромиссе между снижением доз и стоимостью защитных мероприятий, которые могут быть приняты. Другими словами, необходима определенного рода оптимизация радиационной защиты.

Принцип оптимизации содержит два ключевых момента:

• не следует минимизировать дозы любой ценой, т.к. при достигнутом оптимальном уровне защиты и при дозах, не превышающих установленные допустимые пределы, нет смысла продолжать вкладывать в защиту дополнительные ресурсы. Они могу быть размещены с большей пользой где-нибудь еще, например, для улучшения медицинского обслуживания персонала предприятий;

• он основан на отсутствии наблюдаемой пороговой дозы для стохастических эффектов. Но даже при наличии пороговой дозы, компромисс между снижением дозы и соответствующими затратами был бы необходим при уровнях, превышающих этот порог и не достигающих допустимых пределов доз.

Приложение 2. Подходы к выбору числовых значений стоимости 1 чел.-Зв.

Денежное выражение радиационного ущерба α является основным параметром при оптимизации радиационной защиты. Это понятие впервые появилось в Публикации 22 МКРЗ [8] в связи с предложением использования анализа «польза–вред» для выбора оптимального варианта защиты. В своей Публикации 37 [1] МКРЗ подчеркнула необходимость принять во внимание «субъективные» аспекты восприятия радиационного риска личностями и различие радиационного риска для населения и персонала. И, наконец, в Публикации 60 МКРЗ [9] акцент при оптимизации защиты смещается на учет распределения индивидуальных доз облучения, что предполагает использование набора значений $\alpha(d_i)$.

В соответствии с НРБ-99 величина α должна устанавливаться методическими указаниями федерального уровня Госсанэпиднадзора. Как свидетельствует международный опыт, органами, регулирующими радиационную безопасность, определена величина α только в 8 странах. При этом установленные значения рассматриваются в виде основной справочной величины, имеющей рекомендательный статус, т.к. считается, что оптимизация радиационной защиты – это дело предприятий, и величина α, являющаяся инструментом управления, может устанавливаться ими самими [10]. Отметим, что на атомных производствах США и европейских стран установленные значения α, как правило, в несколько раз выше рекомендованных регулирующими органами.

В мировой практике чаще всего используется обобщенная модель для установления стоимости единицы коллективной дозы, применимая к различным видам облучения (профессиональное, медицинское, облучение населения от техногенных источников) в зависимости от выбранных параметров модели [11]. Эта модель проиллюстрирована на рис.П1.

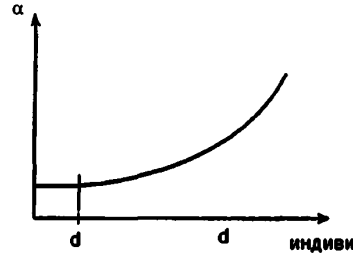

Рис.П1. Модель оценки радиационного ущерба.

Математическое выражение зависимости, приведенной на рис.П1, определяется формулами:

$$\alpha(d) = \alpha_{Base} \quad \text{для } d < d_o,$$
$$\alpha(d) = \alpha_{Base}\,(d/d_o)^a \quad \text{для } d > d_o$$

Для практической реализации данной модели необходимо определить три параметра: α_{Base}, d_o и a.

Параметр «α_{Base}» является денежным эквивалентом потенциального ущерба здоровью от облучения в коллективной дозе 1 чел.-Зв. В соответствии с рекомендованными МКРЗ коэффициентами риска, облучение в коллективной дозе 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 0,88 чел.-года для персонала. Для установления денежного эквивалента потери 1 чел.-года используются в основном два метода: метод WIP и метод человеческого капитала.

Метод WIP (Willingness To Pay – готовность платить) основан на проведении опроса с целью выявления кто и сколько готов платить за небольшие снижения степени риска [12]. Основная проблема состоит в том, как довести до понимания опрашиваемых лиц суть риска. Для этого изменения степени риска должны быть достаточно значительными, сам риск – известным, и в выборе должны фигурировать осмысленные суммы денег. Поэтому, хотя данный метод считается наиболее обоснованным теоретически, он не нашел широкого применения.

Второй метод является сугубо экономическим и основан на использовании для оценки денежного эквивалента потери 1 чел.-года значения валового национального продукта на душу населения. В случае профессионального облучения данный эквивалент может быть установлен на уровне годового дохода предприятия (или отрасли в целом) в расчете на 1 человека из всего персонала или только персонала группы А. По европейским странам значения α_{Base} варьируются в пределах от 17 до 170 долларов США (на 1997 г.) на 1 чел.-мЗв [13].

Величина «d_o» является уровнем индивидуальных доз, ниже которого не принимается во внимание распределение индивидуальных доз. Ее значение зависит от принятого значения приемлемого риска для профессионального облучения. Значения d_o, установленные на атомных объектах ряда европейских стран, варьируются от 1 до10 мЗв/год [13].

Параметр «a» характеризует стремление к снижению высоких индивидуальных доз. Анализ литературных данных показал, что принятые значения этого параметра варьируются в пределах от 1,2 до 1,5.

Приложение 3. Методы поддержки принятия решений

П3.1. Анализ СТОИМОСТЬ–ЭФФЕКТИВНОСТЬ (эффективность затрат).

Анализ СТОИМОСТЬ–ЭФФЕКТИВНОСТЬ рекомендуется использовать перед проведением более подробного анализа для исключения при прочих равных условиях наиболее дорогостоящих вариантов реализации защитного мероприятия.

Отбор вариантов для дальнейшего анализа проводится по следующей схеме:

1) Для каждого i-го варианта реализации защитного мероприятия рассчитываются затраты X_i и значение ожидаемой коллективной дозы S_i;

2) Варианты с близкими значениями S_i объединяются в одну группу, образуя таким образом j группу;

3) Внутри каждой j-ой группы выделяются варианты с минимальными затратами $X_{min,\,j}$, которые будут сравниваться между собой с помощью описанных ниже методов.

Остальные варианты в дальнейшем анализе не рассматриваются.

Данный анализ удобно проводить графическим способом: построением графика зависимости стоимости защиты от значения коллективной дозы для каждого варианта, как показано на рис.П2. Затем через нижние точки проводится кривая (монотонно спадающая) таким образом, чтобы ниже ее не лежала ни одна точка. Проведенная линия соединяет точки, соответствующие вариантам, которые следует использовать для дальнейшего анализа. Для случая, показанного на рис.П2., таких вариантов оказалось 5.



Рис.П2. Кривая СТОИМОСТЬ – ЭФФЕКТИВНОСТЬ.

П3.2. Анализ соотношения «ЗАТРАТЫ–ВЫГОДА».

П3.2.1. Дифференциальный анализ.

Этот метод учитывает только два значимых фактора: стоимость защитного мероприятия X и коллективную дозу S_i.

Метод основан на сравнении дополнительных расходов при переходе от варианта с меньшими затратами X_{i-1} варианту с большими затратами X_i в сопоставлении с соответствующим снижением коллективной дозы $\Delta S_i = S_{i-1} - S_i$. Решение перейти от варианта $(i-1)$ к более дорогостоящему варианту (i) может быть принято, если:

$$\left|\frac{\Delta X_i}{\Delta S_i}\right| = \left|\frac{\Delta X_{i-1} - \Delta X_i}{\Delta S_{i-1} - \Delta S_i}\right| \le \alpha. \qquad (П1)$$

Оптимальным является вариант, при котором значение отношения $\Delta X_i / \Delta S_i$ наиболее близко к величине α снизу.

П3.2.2. Интегральный анализ (метод итоговой стоимости).

Как и в предыдущем методе, рассматриваются два фактора: затраты на защитное мероприятие X_i и уровни коллективных доз S_i, выраженные в денежном эквиваленте.

Для каждого варианта определяется суммарная стоимость $П_i$:

$$П_i = X_i + \alpha S_i. \qquad (П2)$$

Оптимальным считается вариант с минимальным значением суммарной стоимости.

П3.2.3. Расширенный анализ.

Этот метод применяется в тех случаях, когда использование только значений коллективной дозы недостаточно для описания причиненного здоровью ущерба, например, при существенном различии доз облучения рассматриваемого контингента персонала. В этом случае для расчета итоговой стоимости ущерба здоровью (Y) должно использоваться соотношение:

$$Y = \alpha \cdot S + \sum_j \beta_j \cdot S_j. \qquad (П3)$$

Оптимальным считается вариант с минимальным значением итоговой стоимости, определяемой, как $(X_i + Y_i)$.

П3.3. Многофакторный анализ эффективности.

Данный метод используется в тех случаях, когда в анализ включено большое количество значимых факторов в том числе и тех, которые сложно задать в денежных единицах, то есть факторы, как количественной, так и качественной природы. Данный метод следует применять для различных сложных стратегических решений высокого уровня, когда необходимо учитывать социальные предпочтения и последствия реализации аварийных мероприятий.

При использовании многофакторного метода проводятся следующие операции:

1) Ранжирование всех факторов по относительной значимости путем приписывания весовых множителей k_i (более значимый с точки зрения экспертов фактор имеет большее

значение k_j).

2) Далее проводится последовательное рассмотрение каждого фактора по всем вариантам. При этом рассматриваемому фактору j приписывается число u_{ij}, отражающее его ранг (полезность) в варианте (i) по сравнению с его полезностью в других вариантах.

Значения k_j и u_{ij} могут выбираться из любого числового диапазона, например, диапазона 0–1 с соблюдением адекватного сопоставления их значений по факторам и вариантам.

3) Оптимальным считается вариант, для которого величина $U_i = \sum_j k_j \cdot u_{ij}$ принимает максимальное значение.

Очевидно, что выбор оптимального варианта будет правильным, если к оценке полезности и значимости факторов будут привлечены компетентные эксперты, отражающие различные точки зрения на проблему (научные работники, лица, принимающие решения, местные руководители, общественные деятели и т.д.).

Приложение 4. Стандартные таблицы для коэффициентов дисконтирования будущих затрат

П4.1. Коэффициент дисконтированной стоимости.

Коэффициент текущей дисконтированной стоимости f_n, выплачиваемой через n лет, равен:

$$f_n = \frac{1}{(1+r)^n}, \qquad (П5)$$

где: r – годовая процентная ставка.

Числовые значение величины f_n приведены в табл.П1.

Таблица П1. *Коэффициент текущей дисконтированной стоимости, f_n.*

Год, n	Годовая процентная ставка, r (%)						
	0,01	0,1	1	3	5	7	10
1	0,9999	0,999001	0,990099	0,970874	0,952381	0,934579	0,909091
5	0,9995	0,995015	0,951466	0,862609	0,783526	0,712986	0,621921
10	0,999001	0,990055	0,905287	0,745094	0,613913	0,508349	0,385543
15	0,998501	0,985119	0,861349	0,641862	0,481017	0,362446	0,239392
20	0,998002	0,980208	0,819544	0,553676	0,376889	0,258419	0,148644
25	0,997503	0,975322	0,779768	0,477606	0,295303	0,184249	0,092296
30	0,997005	0,97046	0,741923	0,411987	0,231377	0,131367	0,057309
40	0,996008	0,960809	0,671653	0,306557	0,142046	0,06678	0,022095
50	0,995013	0,951253	0,608039	0,228107	0,087204	0,033948	0,008519
70	0,993025	0,932426	0,498315	0,126297	0,032866	0,008773	0,001266
100	0,99005	0,904883	0,369711	0,052033	0,007604	0,001152	7,26E-05

Таблица П2. *Фактор оборота капитала.*

Год. n	Годовая процентная ставка, r(%)						
	0,01	0,1	1	3	5	7	10
5	0,20006	0,2006	0,20604	0,218255	0,230975	0,243891	0,263797
10	0,100055	0,100551	0,105582	0,117231	0,129505	0,142378	0,162745
15	0,6672	0,067201	0,072124	0,083767	0,096342	0,109795	0,131474
20	0,050053	0,050527	0,055415	0,067216	0,080243	0,094393	0,117746
25	0,040052	0,040522	0,045407	0,057428	0,070952	0,085811	0,110168
30	0,033385	0,033852	0,038748	0,051019	0,065051	0,080586	0,106079
40	0,025051	0,025516	0,030456	0,043262	0,058278	0,075009	0,102259
50	0,20051	0,020514	0,025513	0,038865	0,054777	0,07246	0,100859
70	0,014336	0,014799	0,019933	0,034337	0,051699	0,07062	0,100127
100	0,010051	0,010513	0,015866	0,031647	0,050383	0,070081	0,100007

П4.2. Фактор оборота капитала.

Фактор оборота капитала k_n применяется при переводе текущей стоимости в серию постоянных годовых платежей. Он определяется по следующей формуле:

$$k_n = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}, \qquad (П6)$$

где: r – годовая ставка процента; n – количество лет.

Числовые значения k_n приведены в табл.П2.

Приложение 5. База данных

Для проведения оптимизационных исследований необходима следующая информация:

- пути и динамика формирования дозы облучения в процессе выполнения работы выбранной группы персонала;
- используемые методы дозиметрии и погрешности определения доз;
- параметры радиационной обстановки в местах проведения работ и характеристики источников облучения;
- подробный регламент проведения работ;
- план помещений, в которых проводятся работы с обозначением расположения работающих по отношению к источникам излучения;
- какие другие группы персонала работают в данных помещениях;
- используемые рабочие средства при проведении работ;
- степень автоматизации работ;
- существующая система радиационной защиты выбранной группы персонала, и каковы расходы на ее поддержание;
- экономические и стоимостные данные.

Для успешного применения принципа оптимизации на предприятии необходимо создание и регулярное пополнение базы данных, содержащей блоки с дозиметрическими и экономическими данными и информационный блок.

Дозиметрический блок должен содержать сведения об источниках облучения различных групп персонала, уровни полей ионизирующего излучения в рабочих помещениях, результаты индивидуального дозиметрического контроля по профессиям и специальностям, дозовые и временные затраты по видам работ и операциям.

Распределение интегральных доз облучения персонала (годовых или при выполнении отдельных работ) следует представлять по интервалам индивидуальных доз, соответствующим интервалам для значений β.

Важное значение в оптимизационных исследованиях имеет информация о дозах облучения при выполнении отдельных операций. Оценка дозы может быть проведена по измеренным значениям мощности дозы на месте работы и времени, затрачиваемом на выполнение работы (см. Приложение 6). Если требуется высокая степень точности определения дозы, необходимо использовать дозиметры в масштабе реального времени, позволяющие получить величину индивидуальной дозы за любые промежутки времени.

Экономический блок заполняется данными, необходимыми для количественной оценки факторов, в том числе сведениями о стоимости защитных материалов, средств индивидуальной защиты, суммарными затратами на уже внедренные защитные мероприятия, годовыми ставками процента и т.п.

Информационный блок содержит нормативно-методические документы по следующим вопросам:

- проведение оптимизации и внедрение ее результатов в систему радиационной защиты;
- расчет доз от различных источников;
- расчет доз при использовании мер защиты;
- расчет экономических параметров и т.п.

В данный блок следует также включить перечень возможных защитных вариантов, которые рассматривались в процессе оптимизации, и варианты, внедренные на других предприятиях.

Приложение 6. Оценка доз облучения

(В настоящем Приложении использованы материалы В.Ф.Козлова «Планирование доз облучения персонала»).

Эффективная доза облучения за определенный период времени равна сумме дозы от внешнего гамма-нейтронного излучения и ожидаемой дозы внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов за этот период.

Интегральную дозу облучения персонала можно представить в виде суммы доз при выполнении отдельных эпизодов работы:

$$E_i = \sum_j E_{i,j}, \qquad (П7)$$

где: E_i – эффективная доза облучения i-го сотрудника; $E_{i,j}$ – эффективная доза облучения i-го сотрудника при выполнении j-го эпизода работы.

Доза за определенный эпизод работы определяется по результатам пооперационного ИДК (наиболее предпочтительный способ) или расчетным методом по измеренным значениям параметров радиационной обстановки P_j (мощности дозы гамма-излучения, плотности потока нейтронного излучения, объемной концентрации радионуклидов в воздухе) на месте проведения работы и времени, затрачиваемом на выполнение данного эпизода работы, t_j:

$$E_{i,j} = k \cdot P_j \cdot t_j, \qquad (П8)$$

где: k – коэффициент перехода от значения радиационного параметра к мощности эффективной дозы.

Для оптимизационных исследований важно иметь информацию о вкладе в дозу облучения при выполнении эпизода работы от различных источников или различных узлов установки:

$$E_{i,j} = \sum_n E_{i,j,n}, \qquad (П9)$$

где: $E_{i,j,n}$ – доза от n-го источника.

Таким образом, интегральную дозу облучения i-го сотрудника можно представить в виде:

$$E_i = \sum_j \sum_n E_{i,j,n} = \sum_j \sum_n (k_n \cdot P_{j,n} \cdot t_j). \qquad (П10)$$

Коллективная доза определяется, как сумма доз по всем сотрудникам определенной профессии, цеха и т.д.

Снижение дозы облучения персонала может быть достигнуто в результате снижения параметров радиационной обстановки, которое может быть учтено с помощью коэффициента $\alpha^p_{j,n} (\alpha^p_{j,n} < 1)$, или за счет уменьшения времени выполнения эпизода работы, которое может быть учтено с помощью коэффициента $\alpha^t_{j,n} (\alpha^t_{j,n} < 1)$.

Тогда ожидаемая доза облучения после внедрения защитного мероприятия определяется по формуле:

$$E_i = \sum_j \sum_n E_{i,j,n} = \sum_j \sum_n (k_n \cdot P_{j,n} \cdot \alpha^p_{j,n} \cdot t_j \cdot \alpha^t_{j,n}). \qquad (П11)$$

Значения коэффициентов $\alpha^p_{j,n}$ и $\alpha^t_{j,n}$ определяются расчетным или экспериментальным путем.

Приложение 7. Примеры проведения оптимизации

П7.1. Выбор контингента персонала.

Исходными данными при выборе контингента персонала, для которого необходимо про-

Таблица П3. Результаты индивидуального дозиметрического контроля на предприятии.

Объект	Год проведения контроля	Численность персонала	Значения доз по персоналу, мЗв/год			Количество человек с превышением 20 мЗв/год.	Коллективная доза, чел.-Зв
			средняя	миним.	максим.		
Завод №1	1997	524	2,3	1,0	10	-	1,20
Завод №1	1998	547	3,2	1,2	18	-	1,75
Завод №2	1997	460	2.2	0.5	14	-	1,01
Завод №2	1998	469	2,4	0,2	14	-	1,13
Завод №3	**1997**	**2587**	**2,0**	**1,0**	**30**	**10**	**5,17**
Завод №3	**1998**	**2587**	**2,8**	**1,0**	**45**	**16**	**7,24**
РМЦ	1997	170	1.8	0,4	1,4	-	0,31
РМЦ	1998	221	3.7	0.5	1,4	-	0,82
Управление	1997	109	2,9	0,2	15	-	0.32
Управление	1998	109	3.1	0.2	15	-	0,34
ВВО	1997	8	2,2	0,1	13	-	0,018
ВВО	1998	6	2,8	0,1	14	-	0,015

ведение оптимизационных исследований, являются результаты индивидуального дозиметрического контроля облучения. Необходимо проанализировать данные индивидуального дозиметрического контроля персонала за несколько лет в отдельных радиационно-опасных объектах и выделить объекты, где имеют место максимальные индивидуальные дозы и/или в которых имеют место наибольшие коллективные дозы.

Для примера, приведенного в таблице П3, наиболее неблагоприятная обстановка имеет место на заводе 3.

В выделенных объектах следует рассмотреть дозы облучения персонала по различным подразделениям (службам, лабораториям и т.п.), определить подразделения, в которых имеют место стабильно высокие индивидуальные и/или коллективные дозы, и установить критическую группу персонала в данном подразделении. Результаты анализа доз облучения персонала по подразделениям рекомендуется представить в более подробном виде, как представлено в табл.П4.

По данным табл.П5 наиболее облучаемым является персонал цеха №2, а, как следует из табл.П3, критической группой являются аппаратчики.

Задачей оптимизационных исследований для данной критической группы является снижение индивидуальных доз ниже пределов, установленных в НРБ-99. Задача сложная, требующая серьезных экономических и дозиметрических расчетов. Должны рассматриваться не менее трех факторов: коллективная доза, индивидуальная доза и стоимость радиационной защиты. Окончательное решение принимается руководством завода (предприятия).

Цель исследования: определить оптимальный вариант радиационной защиты операторов, обеспечивающий выполнение требований НРБ-99 по нормированию облучения персонала.

Границы исследования: рассматриваются дозы облучения операторов. Варианты радиационной защиты должны обеспечивать снижение годовой дозы наиболее облучаемой части операторов не менее чем в 2,3 раза. Уровни точности и детализации условий формирования доз облучения – высокие.

Необходимы консультации с экономистами, технологами, со специалистами в области расчетов физической защиты и с руководством завода.

П7.2. Оценка затрат по внедрению защитных мероприятий.

Основные статьи расходов, которые необходимо учитывать при рассмотрении наиболее часто применяемых вариантов защиты, приведены в табл.П6.

***Таблица П4.** Рекомендуемое представление результатов ИДК по отдельным подразделениям.*

Подразделение завода №3	Год	Численность персонала подразделения	Коллективная доза, чел.-Зв				
			по всему персоналу	в диапазоне доз, ΔE_j; мЗв/год, (численность персонала в j-ом диапазоне индивидуальных доз)			
				< 6	6–12	12–20	> 20
Цех №1	1997	800	1,2	0,48 (720)	0,42 (60)	0,30 (20)	-
Цех №1	1998	800	1,7	0,74 (713)	0,59 (65)	0,37 (22)	-
Цех №2	**1997**	**700**	**1,9**	**0,81 (602)**	**0,51 (67)**	**0,33 (26)**	**0,25 (10)**
Цех №2	**1998**	**700**	**2,7**	**0,79 (574)**	**0,71 (74)**	**0,60 (36)**	**0,60(16)**
Цех №3	1997	900	1,4	0,45 (800)	0.60 (80)	0,35 (20)	-
Цех №3	1998	900	1,9	0,58 (785)	0.9 (90)	0,42 (25)	-
Управление	1997	87	0,26	0,12 (72)	0,07 (10)	0,07 (5)	-
Управление	1998	87	0,36	0,14 (68)	0,12 (12)	0,1 (7)	-
Служба доз. контроля	1997	100	0,41	0,18 (80)	0,08(10)	0,15 (10)	-
Служба доз. контроля	1998	100	0,58	0,28 (75)	0,10 (10)	0,25 (15)	-

***Таблица П5.** Представление результатов ИДК по отдельным специальностям цеха №2.*

Специальность	Год	Численность персонала данной специальности	Коллективная доза, чел.-Зв				
			по всему персоналу	в диапазоне индивидуальных доз, ΔE_j, мЗв/год, (численность персонала в j-ом диапазоне индивидуальных доз)			
				< 6	6–12	12–20	> 20
дозиметристы	1997	30	0,10	0,04 (25)	0,03 (3)	0,03(2)	-
дозиметристы	1998	30	0,12	0,05 (25)	0.04 (3)	0,03 (2)	-
аппаратчики	**1997**	**100**	**0,94**	**0,13 (30)**	**0,32 (40)**	**0,24 (20)**	**0,25 (10)**
аппаратчики	**1998**	**111**	**1,64**	**0,08 (20)**	**0,45 (45)**	**0,51 (30)**	**0,60 (16)**
ремонтники	1997	40	0,20	0,06 (25)	0,08 (11)	0,06 (4)	-
ремонтники	1998	40	0,22	0,06 (22)	0.10 (14)	0,06 (4)	-
слесари	1997	90	0,2	0,15 (85)	0,05 (5)	-	-
слесари	1998	90	0,22	0.15 (83)	0,07 (7)	-	-
операторы	1997	30	0.06	0,03 (27)	0.03 (3)	-	-
операторы	1998	30	0,10	0.05 (25)	0,05 (5)		-
прочие	1997	410	0.40	0.40 (410)	-	-	-
прочие	1998	310	0,40	0,40 (399)			-

П7.3. Примеры оптимизационных исследований.

1) Задача исследования: следует ли дезактивировать рабочие места и установку перед началом проведения плановых ремонтных работ (капитальном ремонте)?

Исходные данные:

- источник излучения – загрязненные поверхности установки и стены помещения;
- основной путь радиационного воздействия – внешнее гамма-облучение;
- ожидаемые дозы за время проведения работы (по данным ИДК за предыдущие работы) не превышают 0,3 ПГД.

Рассматривается два варианта:

Таблица П6.

Вариант защиты	Основные расходы		Эксплуатационные
	Косвенные	Прямые	
Дополнительная физическая защита	Разработка конструкторской документации	Стоимость защиты (материалы, изготовление и монтаж)	Можно пренебречь, т.к. в большинстве случаев они значительно ниже, других затрат.
Применение СИЗ	Амортизация.	Стоимость самого изделия.	Дезактивация, хранение.
Использование робототехники	Амортизация. Налог.	Стоимость робототехники, пуско-наладочные работы.	Техническое обслуживание. Профилактические работы. Снижение расходов на зарплату (в случае сокращения численности персонала).
Повышение квалификации персонала		Стоимость обучения. Стоимость тренажеров.	Техническое обслуживание тренажеров.
Дезактивация рабочего помещения (установок, территории)		Стоимость дезактивационных средств. Расходы на проведение дезактивации	
Установка принудительной вентиляции	Разработка конструкторской документации (при необходимости).	Стоимость вентиляционного оборудования. Стоимость монтажа.	Техническое обслуживание, электроэнергия
Замена загрязненного оборудования (участков трубопроводов. воздухопроводов)		Стоимость нового оборудования. Стоимость демонтажа и захоронения загрязненного оборудования и монтажа нового. Ущерб от простоя в период проведения монтажа.	
Увеличение численности персонала	Налог.		Зарплата дополнительному персоналу. Затраты на обслуживание персонала.

• «нулевой» – дезактивация не проводится;

• «предлагаемый» – провести дезактивацию.

При «нулевом варианте» имеется один фактор – дозы облучения персонала, проводящего ремонтные работы.

Радиационный ущерб составляет:

$$Y = \alpha \cdot k \cdot P_\gamma \cdot t_p \cdot N_p, \qquad (П12)$$

где: P_γ – мощность дозы гамма-излучения в месте проведения работ; t – время проведения работ; k – коэффициент перехода от мощности дозы к эффективной дозе; N_p – численность персонала, проводящего ремонтные работы.

При предлагаемом варианте значимы два фактора: стоимость дезактивации X (см. табл.П6) и радиационный ущерб.

Облучению подвергаются две группы персонала: персонал, проводящий дезактивацию, и персонал, проводящий ремонтные работы.

Коллективная доза равна сумме коллективных доз по этим группам персонала:

$$S = k \cdot P_\gamma \cdot \alpha^p \cdot t_p \cdot N_p + k \cdot P_\gamma \cdot t_Д \cdot N_Д, \qquad (П13)$$

где: α^p – коэффициент снижения мощности дозы в результате дезактивации; N и t – то же, что в (П8), нижний индекс «$Д$» относится к персоналу, проводящему дезактивацию.

Полная стоимость варианта равна:

$$Y = \alpha \cdot (k \cdot P_\gamma \cdot \alpha^p \cdot t_p \cdot N_p + k \cdot P_\gamma \cdot t_Д \cdot N_Д) + X. \qquad (П14)$$

Предлагаемый вариант может быть принят, если выполняется условие:

$$\alpha \cdot k \cdot P_\gamma \cdot t_p \cdot N_p > \alpha \cdot (k \cdot P_\gamma \cdot \alpha^p \cdot t_p \cdot N_p + k \cdot P_\gamma \cdot t_Д \cdot N_Д) + X. \qquad (П15)$$

Однако выполнение вышеприведенного условия не означает, что предлагаемый вариант удовлетворяет принципу оптимизации, т.е. при его внедрении дозы, полученные персоналом, будут столь малыми, насколько возможно достигнуть. Для ответа на это требуется рассмотрение других возможных вариантов и проведение оптимизационных исследований в полном объеме.

2) Замена загрязненного оборудования (участков трубопроводов, воздухопроводов и т.п.).

Рассматривая данное защитное мероприятие, следует учитывать, что с течением времени после замены по мере загрязнения нового оборудования происходит увеличение доз облучения персонала.

Динамика загрязнения может быть описана экспоненциальным законом:

$q \sim [1 - exp(-\eta \cdot t)]$ (η – постоянная осаждения радионуклидов), а накопленная за время t доза $H \sim \int [1 - exp(-\eta \cdot t)]dt$. (П16)

Время действия данной меры защиты (время, за которое надо оценивать дозы персонала) определяется из условия загрязнения оборудования до уровней загрязнения заменяемого оборудования.

При оценке коллективной дозы следует также учитывать дозы, полученные ремонтным персоналом за время работы.

Затраты определяются основными расходами.

3) Дополнительная физическая защита.

Эта защитная мера может рассматриваться как в задачах по обеспечению непревышения установленного предела эффективной дозы, так и улучшения радиационной защиты, когда значимым фактором радиационного воздействия является внешнее облучение.

Перед включением данной меры в оптимизационные исследования следует определить оптимальную толщину защиты.

При оценке затраты на защиту (см. табл.П6) можно принять следующие допущения:

• стоимость разработки конструкторской документации, $X_{К.Д.}$, не зависит от толщины защиты;

• стоимость материалов и изготовления защиты пропорциональна объему защиты

$$X_{ИЗГ} = X_V \cdot h \cdot l \cdot d, \qquad (П17)$$

где: h, l, d – высота, длина и толщина защиты, соответственно, и X_V – стоимость единицы объема устанавливаемого защитного материала;

• стоимость монтажа защиты также пропорциональна объему защиты,

$$X_{монт} = X_{V,монт} \cdot h \cdot l \cdot d. \qquad (П18)$$

Суммарные затраты на защиту равны:

$$X = (X_V + X_{V,монт}) \cdot h \cdot l \cdot d + X_{К Д} \qquad (П19)$$

Коллективная доза определяется выражением:

$$S = (\sum N_i \cdot t_i) \cdot \tau \cdot E_o B(\mu \cdot d) \cdot exp(-\mu \cdot d), \qquad (П20)$$

где: N_i – численность i-ой группы персонала; t_i – время нахождения i-ой группы персонала под воздействием данного источника облучения, ч/год; τ – срок службы защиты (или срок службы источника излучения), год; E_o – мощность эффективной дозы на рабочем месте без защиты; $B(\mu \cdot d)$ – фактор накопления; μ – коэффициент ослабления излучения защитным материалом.

Оптимальная толщина защиты соответствует минимальному значению $(X+\alpha \cdot S)$, которое определяется из условия $\partial(X+\alpha \cdot S))/\partial d = 0$.

В дальнейших оптимизационных исследованиях используется вариант с полученным оптимальным значением толщины защиты $d_{опт.}$, если нет каких-либо дополнительных ограничений по толщине (весе) защиты, связанных с конструкционными особенностями источника излучения, здания, в котором расположен источник и т.п. Если ограничения существуют и полученное оптимальное значение $d_{опт.}$ превышает максимально возможную толщину $d_{макс.}$, то рассматривается вариант защиты с $d_{макс.}$.

В задачах по обеспечению непревышения дозового предела вариант с физической защитой толщиной $d_{опт}$ рассматривается, если она обеспечивает требуемую кратность ослабления дозы. В противном случае следует включить в исследования вариант с минимальной толщиной защиты, при которой дозы не будут превышать установленного предела.

4) Применение средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД).

При рассмотрении в качестве варианта защитной меры применение СИЗОД, следует принимать во внимание следующее:

• возможное увеличение времени выполнения работы;

• возникающие неудобства (ощущение дискомфорта) в работе.

Увеличение времени выполнения работы необходимо учитывать при оценке доз облучения, когда доза формируется не только от ингаляционного поступления радионуклидов, но и от внешнего облучения.

Во втором случае следует ввести дополнительный фактор «уровень дискомфорта», описываемый качественно. Для количественной оценки данного фактора используется показатель «полезность» (см. п.7.3), определяемый на основании экспертных оценок, например, как показано в табл.П7.

5) Установка вытяжной вентиляции.

В ограниченном пространстве, вентилируемом со скоростью потока Q, м^3/с, и в котором поступление радиоактивных веществ из источников происходит с постоянной скоростью V, Бк/с, устанавливается равновесная объемная концентрация радионуклидов в воздухе C, равная V/Q, Бк/м^3. Ожидаемая коллективная доза от ингаляционного поступления радиоак-

Таблица П7.

Ощущение дискомфорта	Оценка дискомфорта	Полезность*
Тяжело работать	1	0
Значительные трудности	2	0,33
Незначительные трудности	3	0,66
Отсутствует	4	1
* Примечание: Для оценки «полезности» принята линейная зависимость от уровня дискомфорта. В зависимости от реальных условий на рабочем месте эксперты могут принять и другой вид зависимости.		

тивных аэрозолей может быть выражена в виде:

$$S = \sum_i \sum_j (V / Q_j) t_i d_j (v_{л.в.})_i \tau. \qquad (П21)$$

где: t_i – время нахождения i-сотрудника в данном помещении в течение года, с/год; $(v_{лв})_i$ – скорость легочной вентиляции i-сотрудника, Бк/м^3; d_j – дозовый коэффициент при ингаляционном поступлении j-го радионуклида, Зв/Бк; τ – срок службы установки, год.

Суммирование производится по всему персоналу, работающему в данном помещении, (индекс «i») и по всем радионуклидам (индекс «j»).

Основная неопределенность оценки дозы может быть обусловлена неопределенностью дозовых коэффициентов, если отсутствуют данные о дисперсном составе радиоактивных аэрозолей (например, значения дозовых коэффициентов для аэрозолей с AMAD 1 и 10 мкм может различаться в 2 и более раз). Это следует учитывать при анализе чувствительности (см. п.7.5).

Из затрат на вентиляцию, приведенных в П6.2., в большинстве случаев (если не требуется перестройки зданий и длинных трубопроводов) основные расходы определяются стоимостью установки $C_{уст}$, зависящей от ее производительности (объема прокачиваемого воздуха), и эксплуатационными расходами, основную часть которых составляет стоимость потребляемой электроэнергии. С достаточной точностью можно принять, что потребление электроэнергии системой вентиляции пропорционально объему прокачиваемого воздуха. При сделанных предположениях затраты на вентиляцию будут равны:

$$X = C_{уст.}(Q) + b \cdot c \cdot \tau \cdot Q, \qquad (П22)$$

где: b и c – константы, представляющие, соответственно, стоимость единицы электроэнергии и энергию, расходуемую на кондиционирование и циркуляцию единицы объема воздуха.

Для приведения эксплуатационных расходов к одной дате необходимо использовать метод дисконтирования.

Как и в случае с физической защитой, в оптимизационные исследования следует включать вариант вентиляционной системы с оптимальными параметрами, в данном случае с оптимальной скоростью прокачиваемого воздуха, которая определяется из условия:

$$\partial(X + \alpha \cdot S) / \partial Q = 0. \qquad (П23)$$

Приложение 8. Применение процедуры «ПРОСМОТР ALARA» с использованием массивов индивидуальных доз персонала

П.8.1. Постановка задачи.

Индивидуальные дозы (ИД) персонала, объединенные в массив по признаку установки, технологии, производства и т.д., дают информацию о безопасности объекта в целом (рис.П3). При их формировании действует вся совокупность радиационных факторов на объекте, как систематически присутствующих в технологических процессах, так и возникающих периодически, под действием случайных факторов.

На АЭС распределение ИД персонала удовлетворительно описывается логнормальным или гибридным распределением, представляющим собой сочетание логнормального и бета-распределений. Однако типичные примеры функций распределения персонала реакторной установки ВК-50, радиохимического комплекса ГНЦ НИИАР за 1992 г. (рис.П4), показывают, что одномодальное логнормальное распределение (сплошная линия) не является универсальным средством описания массивов ИД персонала объектов научно-исследовательского профиля (исследовательских реакторов, комплексов защитных камер и т.д.).

Характерной особенностью является многомодовость распределений, что свидетельствует о том, что данные распределения являются суммой нескольких одномодальных субраспределений. Задача заключается в разработке формализованной процедуры их выделения и нахождении таких параметров, которые отражали бы влияние реальных технологических или административных факторов и, следовательно, объективно характеризовали безопасность объекта.

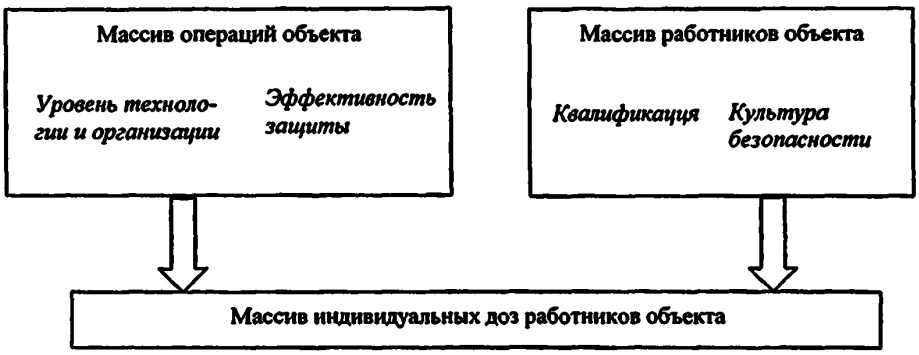

Рис.П3. Схема формирования массива индивидуальных доз персонала.

П.8.2. Выделения субраспределений и нахождения их параметров.

Ни один вид стандартных статистических распределений не удовлетворяет требованиям, в которых предполагается существование единого фиксированного семейства параметров, учитывающих основные особенности таких многомодовых распределений. Среди прочих наиболее предпочтительно биномиальное распределение, которое обладает интересными возможностями: при ограниченном и фиксированном числе исходных параметров форма функции распределения может меняться от симметричной до скошенной как в левую, так и в правую сторону на линейной шкале. Однако это распределение обладает и существенным недостатком. Во-первых, оно дискретно, а во-вторых, область значений аргумента функции распределения ограничена целыми числами. Специалисты ГНЦ НИИАР предлагают использовать модифицированное биномиальное распределение с непрерывно определенной функцией вероятности реализации аргумента которое имеет вид:

$$P(r)=C(M,r)\cdot p^{r}\cdot(1-p)^{M-r}, \qquad (П24)$$

где:

$$r=\alpha(X-X_0), \qquad (П25)$$

$$X_0 \le X \le \frac{M}{\alpha}+X_0, \qquad (П26)$$

$$p=\frac{M}{N}, \qquad (П27)$$

$$C(M,r)=\frac{\Gamma(M+1)}{\Gamma(r+1)\cdot\Gamma(M-r+1)} \qquad (П28)$$

где $\Gamma(r)$ – гамма-функция, которая определена стандартным образом:

$$\Gamma(r)=\int_0^{\infty} e^{-t}\cdot t^{r-1}dt. \qquad (П29)$$

Значения $P(r)$ могут быть табулированы либо определены посредством использования специально созданной программы расчётов.

Пример аппроксимации распределения ИД с помощью набора модифицированных биноминальных субраспределений приведен на рис.П5. Данные массива доз упорядочены, и их ряд значений разбит на классы – равновеликие по длине интервалы, на которые делится каждая декада логарифмической шкалы. Предпочтительно выбирать семиинтервальное разбиение декады, при котором весь диапазон шкалы доз (0,01÷100 мЗв) делится на 28 классов (рис.П5). Функции модернизированных биноминальных распределений также про-

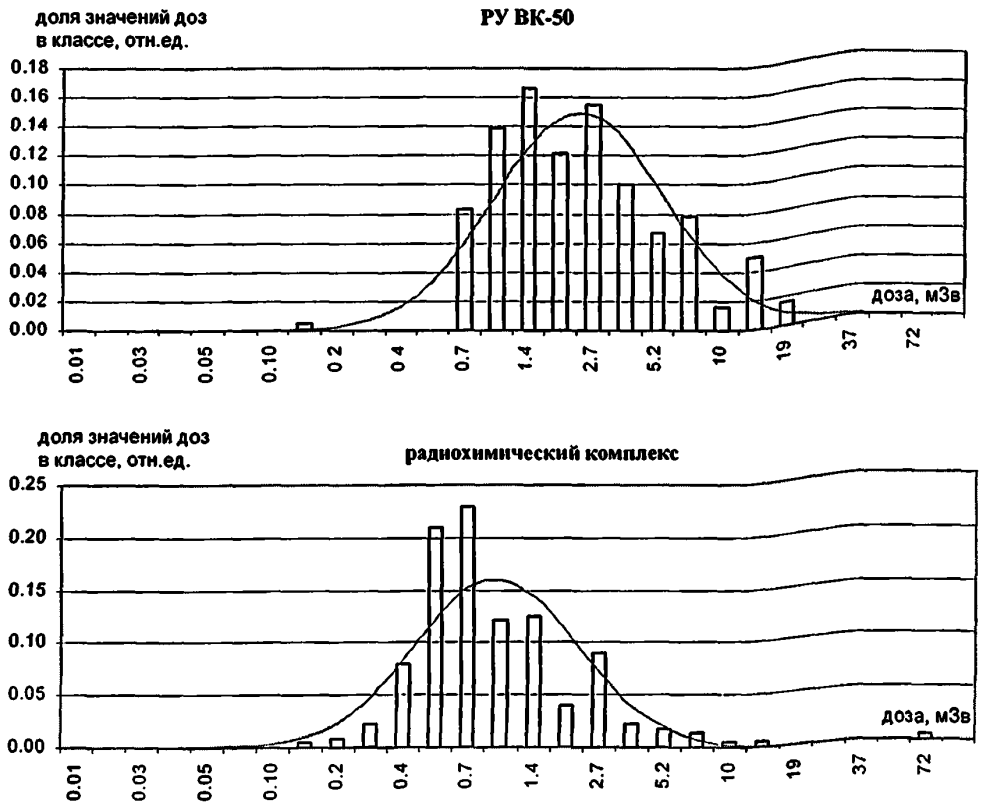

Рис.П4. Типичные гистограммы распределений ИД.

интегрированы в этих интервалах индивидуальных доз.

В качестве параметров отдельного i-го субраспределения могут служить его центр тяжести E_i и вес Y_i в массиве.

$$E_i = \frac{\sum_j E_j \cdot n_{ij}}{\sum_j n_{ij}}, \qquad (П30)$$

$$Y_i = \frac{\sum_j n_{ij}}{\sum_i \sum_j n_{ij}}, \qquad (П31)$$

где E_i – доза, приписываемая j-му классу (здесь и далее его правая граница), n_{ij} – число доз i-го субраспределения, попавших в j-й класс.

Меры, направленные на улучшение радиационной обстановки, оказывают влияние, прежде всего, на дозовые характеристики субраспределений. Административные меры должны приводить к перераспределению численности (весов) субраспределений и их вклада в коллективную дозу S_i.

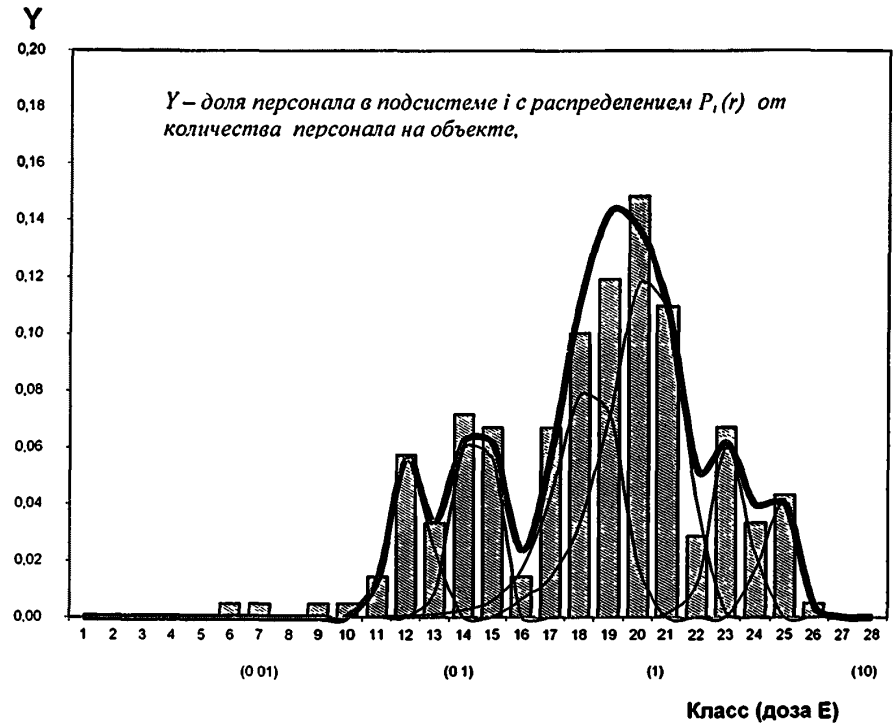

Рис.П5. Функция распределения ИД персонала реакторной установки ВК-50.

$$S_i = \frac{\sum_j E_j \cdot n_{ij}}{\sum_i \sum_j E_j \cdot n_{ij}}. \qquad (П32)$$

Таким образом, совместное рассмотрение всех перечисленных параметров субраспределений и коллективной дозы объекта позволяет качественно оценить эффективность принятых мер.

Левые субраспределения расположены в области доз, которые можно считать фоновыми для данного объекта. Соответственно, они характеризуют условия работы тех лиц, которые облучаются характерным для этого объекта фоном, и их дозы практически не зависят от действия факторов административных или тех, которые обусловлены выполнением специальных работ. Изменения этих параметров субраспределений в различные годы и их интерпретацию можно рассмотреть на примере реакторной установки СМ-3. В 1992 году проводилась модернизация установки с заменой корпуса реактора, реконструкцией экспериментальных установок, ремонтом оборудования, капитальными строительными работами в здании реактора. В 1993 году установка выведена на мощность. Коэффициент использования реактора представлен на рис.П6.

На рис.П7 приведены графики изменений центра тяжести первого (левого) субраспределения с 1992 по 1999 годы и, для сравнения, центра тяжести распределения индивидуальных доз сотрудников охраны ГНЦ НИИАР, который по характеру их работы в институте можно считать усредненной характеристикой категории облучения Б.

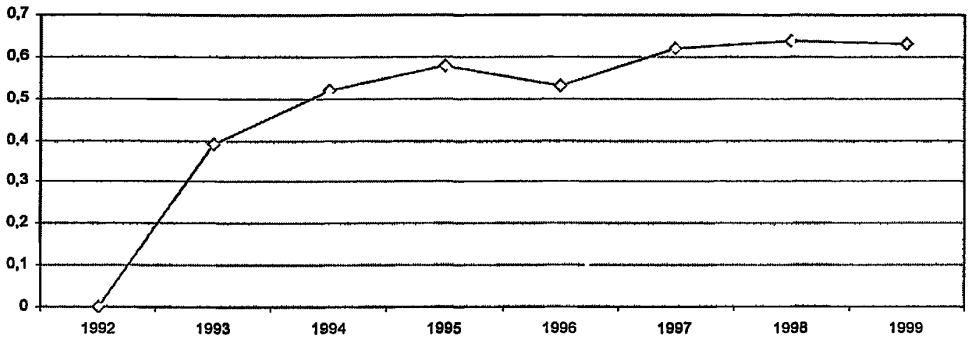

Рис.П6. Коэффициент использования РУ СМ-3.

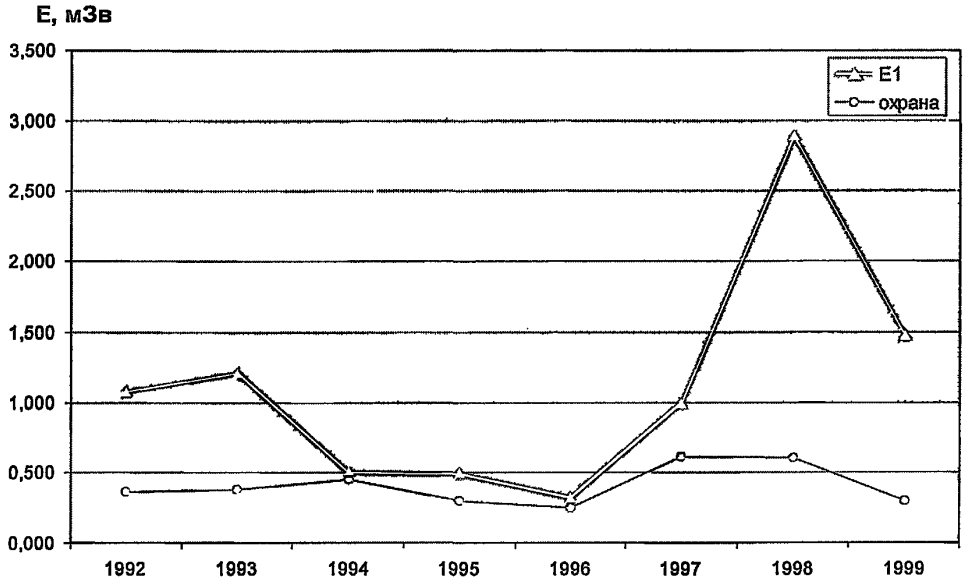

Рис.П7. Изменение центра тяжести первого (левого) субраспределения.

В 1992–1993 годах повышенный фон на установке объясняется работами по ее модернизации и наведению последующего порядка. В 1994–1996 годах значения фоновых условий СМ-3 и в институте практически совпадали. Дальнейшее повышение фона на установке объясняется причинами технологического порядка.

Поскольку лица группы Б персонала не работают непосредственно в полях ионизирующих излучений, то их дозы не могут быть выше любых доз персонала группы А. Следовательно, центр тяжести Е1 первого (левого) субраспределения служит верхней оценкой облучения персонала группы Б на этом объекте.

П.8.3. Интерпретация результатов исследования субраспределений ИД на примере СМ-3.

В табл.П8 представлены коэффициенты корреляции K_Y между весами субраспределений и коллективной дозой и K_S между вкладами субраспределений в коллективную дозу и коллективной дозой.

Первые два субраспределения имеют отрицательные коэффициенты, т.е. когда коллек-

Таблица П8. *Коэффициенты корреляции между весами субраспределений и коллективной дозой K_Y и между вкладами субраспределений в коллективную дозу и коллективной дозой K_S.*

Номер субраспределения	1	2	3	4	5	6
K_Y	–0,43	–0,09	0.54	0.15	0,70	–0,26
K_S	–0,48	–0,50	0,48	0,01	0,72	–0,31

тивная доза увеличивается, их вклад в дозу и вес, соответственно, уменьшаются. Следовательно, оба они определяют фоновые условия объекта. На рис.П8 приведены их суммарные параметры. *Коэффициент корреляции между весом и вкладом в коллективную дозу* близок к единице, т.е. вклад в коллективную дозу практически полностью определяется весом (численностью) этих субраспределений.

Коэффициенты корреляции последнего субраспределения также отрицательны. Это иллюстрирует тот факт, что снижение индивидуальных доз наиболее облучаемого персонала за счет административных (ограничительных) мер, т.е. перераспределения доз между отдельными группами, приводит к увеличению коллективных доз. Это обусловлено снижением квалификации персонала и увеличением времени его нахождения в высоких полях ионизирующих излучений при выполнении работ. Таким образом, наряду со снижением индивидуальных доз необходимо снижать и количество облучаемого персонала, иначе снижения коллективных доз может и не быть.

Основное влияние на коллективную дозу имеют третье и пятое субраспределения. Можно предположить, что в третью группу входит персонал, который мало испытывает на себе действие административного фактора, и степень управления их облучением невелика. В пятую группу, видимо, входит персонал, выполняющий специальные работы в высоких полях излучений с соблюдением специальных ограничений и использованием различных средств и способов защиты. Для него влияние административных факторов должно быть велико. Четвертая группа занимает промежуточное положение: для нее существенно влияние как фоновых условий, так и административных факторов.

В таблице П9 представлены параметры субраспределений всех рассматриваемых массивов ИД персонала реактора СМ-3.

1992 год. Вклад в коллективную дозу вносят примерно поровну первые 3 субраспределения. Вес субраспределений уменьшается с ростом номера, но это уменьшение компенсируется увеличением центра тяжести. Таким образом, облучение персонала обусловлено, в основном, радиационной обстановкой на разных участках здания. Управление облучением персонала практически отсутствует.

1993 год. Реактор вышел на мощность. Коллективная доза возросла. Причины этого – рост фона, перераспределение персонала между субраспределениями со смещением доз в сторону старших номеров. Результатом этого стало появление пятой группы с центром тяжести 15 мЗв. Вес этой группы невелик, но, за счет высоких доз, ее вклад в коллективную дозу практически равен вкладу остальных групп. В эту группу входит высококвалифицированный персонал, занимавшийся отладкой экспериментальных и облучательных устройств.

1994 год. Реактор вышел в рабочий режим эксплуатации. Коллективная доза по сравнению с предыдущим годом возросла незначительно. Выделилась шестая группа с центром тяжести 24,7 мЗв. Центр тяжести пятой группы возрос незначительно. Обе эти группы состоят из персонала группы транспортной технологии. Это связано с возрастанием количества перегрузок облученных материалов (облучательных мишеней и экспериментальных устройств), которые на этом реакторе осуществляются в незащищенном виде по воздуху без применения каких-либо защитных транспортных контейнеров. Значительно уменьшился вклад в коллективную дозу и вес первого субраспределения. При этом возросли вес и вклад в коллективную дозу третьего и четвертого субраспределений. Таким образом, в этом году фоновые условия несколько улучшились за счет наведения порядка на здании после

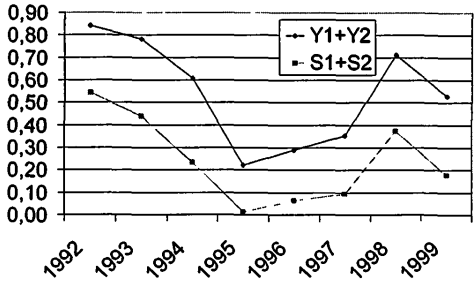

Рис.П8. *Суммарные параметры фоновых распределений ИД персонала СМ-3.*

Таблица П9. *Параметры субраспределений всех рассматриваемых массивов ИД персонала реактора СМ-3.*

год	параметр	Номер субраспределения						кол.доза
		1	2	3	4	5	6	
1992	E_i	1,08	2,8	5,5	11,3			360
	Y_i	0,63	0,21	0,13	0,03			
	S_i	0,29	0,25	0,29	0,16			
1993	E_i	1,2	2,9	4,9	8,6	15,0		640
	Y_i	0,56	0,22	0,12	0,06	0,04		
	S_i	0,23	0,21	0,19	0,17	0,20		
1994	E_i	0,50	1,8	3.9	7,7	15,9	24,7	690
	Y_i	0,14	0,47	0,19	0,15	0,03	0,03	
	S_i	0,02	0.22	0,18	0,29	0,12	0,17	
1995	E_i	0,49	0,49	5,7	14,7	31,2	47,8	1330
	Y_i	0,11	0,11	0,41	0,32	0,03	0,02	
	S_i	0,01	0,01	0,26	0,52	0,11	0,10	
1996	E_i	0,32	1,1	2,2	6,5	15,3	30,4	730
	Y_i	0,07	0,22	0,38	0,27	0,05	0,01	
	S_i	0,006	0,06	0,21	0,43	0,19	0,11	
1997	E_i		0,99	3,0	7,3	17,1	35,2	1810
	Y_i		0,09	0.26	0,42	0,14	0,08	
	S_i		0,01	0.08	0,33	0,26	0,31	
1998	E_i		2,9	6,2	11,4	19,4	32,9	1530
	Y_i		0,47	0,24	0,19	0,05	0,05	
	S_i		0,18	0,20	0,28	0,13	0,22	
1999	E_i		1,5	3.5	7,6	12,3	24,4	1520
	Y_i		0,23	0,30	0,22	0,11	0,14	
	S_i		0,04	0,14	0,22	0,18	0,43	

окончания реконструкции. Облучение остальных групп персонала возросло за счет увеличения количества штатных для этого реактора работ. Специальных мер по управлению облучением персонала, видимо, не предпринималось.

1995 год. В этом году наряду с небольшим увеличением коэффициента использования реактора проводилось два планово-предупредительных ремонта (ППР). Это привело к тому, что фоновые условия улучшились, вес этих субраспределений практически не увеличился. Однако произошло существенное возрастание коллективной дозы. Основной вклад в коллективную дозу принадлежит четвертой группе персонала. Центр тяжести и вес соответствующего субраспределения выросли почти в два раза. В эту группу входит персонал служб, занимающихся ремонтом и техническим обслуживанием систем реактора. Возросли соответствующие параметры третьего субраспределения. Это связано с привлечением к ППР менее квалифицированного персонала. Для пятого и шестого субраспределений, характеризующих персонал группы транспортной технологии, также в два раза возросли центры тяжести, но их вес не изменился. Таким образом, здесь была попытка ограничить облучение пятой и шестой групп персонала за счет перераспределения работ и увеличения численности персонала, привлекаемого к малоквалифицированным работам.

1996 год. Коэффициент использования реактора был ниже, чем в предыдущий год. Техническое обслуживание реактора проводилось в штатном режиме. Соответственно, снизились величины центров тяжести субраспределений с третьего по шестое и незначительно – веса третьего и четвертого субраспределений. Возрос вес первых (фоновых) субраспределений. В результате произошло существенное снижение коллективной дозы.

1997 год. Реактор вышел практически на максимальный коэффициент использования. Причем, существенно то, что в этот период в рамках программы изготовления радионуклидной продукции интенсивно накапливался ^{60}Co. Возросло количество перегрузок, которое практически пропорционально коэффициенту использования реактора. Это привело к резкому возрастанию коллективной дозы. Хотя субраспределений стало пять, а не шесть, это можно трактовать, как исчезновение не шестого, а первого субраспределения. Тогда рост коллективной дозы объясняется практически только увеличением веса трех старших субраспределений. Т.е. за счет увеличения мощности дозы в местах выполнения специальных и штатных работ по обслуживанию и эксплуатации систем реактора увеличилось облучение персонала группы транспортной технологии и персонала, осуществляющего ремонт и техническое обслуживание систем. Судя по тому, что при этом центры тяжести этих субраспределений практически не изменились, можно полагать, что специальных мер по ограничению облучения персонала, кроме перераспределения персонала между группами, не принималось.

1998 год. В режимах эксплуатации реактора практически ничего не изменилось. Этот год отмечен большим количеством работ по дезактивации экспериментальных петель и первого контура реактора. Количество ^{60}Co в бассейнах установки в этом году было максимальным. Возросли центры тяжести четвертого и пятого субраспределений, незначительно снизился центр тяжести шестого. Но, одновременно с этим, снизились веса этих субраспределений. Вес второго (при отсутствующем первом) субраспределения и его центр тяжести возросли. Таким образом, можно предположить, что, несмотря на увеличение количества работ на первом контуре и петлях реактора, эти работы выполнялись без привлечения большого количества персонала. Заметна попытка ограничения облучения персонала группы транспортной технологии не за счет перераспределения работ, а, скорее всего, за счет более правильной организации этих работ, уменьшения количества облучаемых лиц. И, хотя при этом возросли фоновые показатели радиационной обстановки, произошло снижение коллективной дозы.

1999 г. В режимах эксплуатации реактора также ничего не изменилось по сравнению с предыдущим годом. Снизились центры тяжести всех субраспределений. По-видимому, это следствие дезактивационных работ предыдущего года и разгрузки бассейнов от ^{60}Co. Но коллективная доза не изменилась. Это объясняется только перераспределением персонала между группами, возрастанием веса старших субраспределений за счет второго. Этот

шаг вынужденный, вызванный необходимостью значительного снижения индивидуальных доз в шестой группе персонала. В противном случае отсутствует всякая возможность для этого персонала выйти в 2000 г. и далее на дозы примерно 20 мЗв, как того требуют НРБ-99.

Таким образом, можно считать, что в рамках перехода на НРБ-99 работа по снижению дозовых нагрузок начата впервые в 1997 г. Наиболее серьезные сдвиги в направлении новых норм произошли в 1998 году. Поскольку достигнутого снижения индивидуальных доз пока недостаточно, необходимы технические меры, аналогичные тем, которые были предприняты в 1998 году. Как промежуточный этап, возможно административное вмешательство для ограничения доз персонала шестой группы, но при этом будет возрастание коллективных доз. В этом случае этот факт будет являться следствием не какого-либо ухудшения уровня безопасности объекта, а откликом на эти административные воздействия.

Библиографические данные к Приложению 8

1. Егоров Ю.А., Носков А.А. Радиационная безопасность на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. А.А.Носков, Б.А.Безруков, И.В.Долженков. Особенности формирования дозовых затрат на АЭС при переходе на новые дозовые пределы. В сборнике тезисов докладов VII Российской научной конференции «Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок». 22-24 сентября 1998 г., Обнинск.
3. Баронкина Н.В., Крайнов Е.В., Орищенко А.В., Усольцев В.Ю. Оптимизация разбиения логарифмической шкалы площадей треков на облученных нейтронами пластинах из пластика CR-39 по классам. В сборнике «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства», вып.2, ДНЦ АТН РФ, Дмитровград, 2000.
4. Назаров А.В., Орищенко А.В., Усольцев В.Ю. Математическое моделирование непрерывного биномиального распределения при анализе случайно распределенных величин. В сборнике «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства», вып.2, ДНЦ АТН РФ, Дмитровград, 2000.

Приложение 9. Список исполнителей

Оптимизация радиационной защиты персонала предприятий Минатома России

Рекомендации

Руководитель творческого коллектива **к.т.н,**	М.Н. Савкин
Руководитель службы стандартизации **д.т.н., с.н.с.**	Ю.С. Степанов

Исполнители: **Государственный научный центр - Институт биофизики** **к.т.н**	М.Н. Савкин
к.м.н.	М.И. Грачев А.В. Титов В.С. Ядыкина
Соисполнители: **ДБЧС Минатома России** **к.т.н**	А.П. Панфилов
ГНЦ НИИ Атомных реакторов	В.Ю. Усольцев
к.ф-м.н.	А.В. Орищенко А.В. Назаров
Государственный концерн «Росэнергоатом» **к.т.н**	Б.А. Безруков

gost.e-ecolog.ru