МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

Кафедра №1
Кафедра радиационной физики и безопасности атомных технологий

Озтурк Микаил

Выпускная квалификационная работа специалиста на тему:

Оценка риска перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута Балаковская АЭС – производственное объединение «Маяк»

Выпускная квалификационная

работа защищена

«___»_____2020г.

Оценка _____

Секретарь ГЭК _____

Москва 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕР
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ
(НИЯУ МИФИ)

Кафедра №1
Кафедра радиационной физики и безопасности атомных технологий

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ НА ТЕМУ:

Оценка риска перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута Балаковская АЭС – производственное объединение «Маяк»

Студент _____Озтурк Микаил

Руководитель проекта _____ доцент, к.ф.-м.н. Костерев В.В.

Рецензент _____ с.н.с , Зубарев В.Н.

И.О. Зав.кафедрой №1 _____доцент, к.ф.-м.н. Демин В.М.

Москва 2020 г.

Аннотация на дипломную работу

Тема дипломной работы «Оценка риска перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута Балаковская АЭС – производственное объединение Маяк »

Дипломная работа состоит из : введения, трех основных глав, поделенных на параграфы, заключение и списка использованных литературов.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, цель и задачи исследования.

В первой главе приведен анализ литературы для задач оценки риска безаварийной перевозки отработавшего ядерного топлива, рассмотрены основные пределы доз для населения и персоналов, проведена оценка риска безаварийной перевозки ОЯТ для маршрута с Балаковской АЭС на производственное объединение «Маяк», проведены анализ и сравнение результатов расчетов безаварийной перевозки.

Во второй главе приведен анализ риска аварийной перевозки ОЯТ, построены деревья отказов для сценариев аварий при транспортировке ОЯТ и проведены расчеты вероятностей аварийных перевозок ОЯТ, проведена оценка риска аварийной перевозки ОЯТ для маршрута с Балаковской АЭС на производственное объединение «Маяк».

В третьей главе используется Гауссова модель для расчета рассеивания загрязняюших вешеств в атмосферном воздухе, проведены анализ и сравнение результатов расчетов аварийной перевозки.

В заключении приведены основные результаты проведенного исследования. Общий объем работы 65 страниц.

Содержание

Введение…….....2

Обзор литературы.....6

Оценка риска безаварийной перевозки отработавшего ядерного топлива железнодорожным транспортом…….....11

Основные пределы доз для населения и персоналов…….....18

Формулировка оценки риска безаварийной перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута с Балаковской АЭС на производственное объединение «Маяк».....19

Анализ риска аварийной перевозки отработавшего ядерного топлива железнодорожным транспортом.....29

Возникновения сценарии радиоционных и ядерных аварий при транспортировки свежего ядерного топлива и отработавшего ядерного топлива.....34

Расчеты вероятностей аварийных перевозок отработавшего ядерного топлива.....39

Формулировка аварийной перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута с Балаковской АЭС на производственное объединение «Маяк».....43

Гауссовая модель рассеяния примеси в атмосфере.....50

Заключение.....64

Список использованной литературы …….....65

Введение

Транспортировка ОЯТ необходима для доставки его на завод по переработке или в долговременное хранилище. Транспортировку отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) во всем мире производят тремя видами транспорта (автомобильным, железнодорожным и водным). Независимо от способа ОЯТ главным условием этого процесса является безопасность, т.е. недопущение попадания радиоактивных веществ в биосферу, в том числе и в случае аварии на транспорте. Поэтому задачи корректной оценки риска транспортировки и управления этим риском находятся среди приоритетных задач.

Управление безопасностью и риском при транспортировке радиоактивных материалов составляет важную сферу деятельности государственных органов управления на всех уровнях власти и административного аппарата производственных и других объектов, представляющих техногенную опасность для человека и окружающей среды. Основной целью такого управления являются установление и поддержание научно обоснованного приемлемого уровня безопасности и риска при техногенных воздействиях. Поэтому многие государства приняли законы, позволяющие безопасность населения окружающей среды. Международное агентство по атомной энергии(МАГАТЭ), созданное в рамках Организации Объединенных Наций(ООН) в 1957 году, ведущий мировой форум научно-технического сотрудничества в области мирного использования ядерных технологий. Изложение основных положений и целей деятельности МАГАТЭ по ядерной безопасности посвящена разработке норм безопасности ядерных установок и обеспечения сохранности радиоактивных источников, безопасной перевозки радиоактивных материалов и обращения с радиационными грузами. Рекомендации МАГАТЭ в области безопасности используются многими странами в качестве основы для разработки внутригосударственных норм и правил. Они включают руководящие материалы, касающиеся выбора площадки, проектирования и эксплуатации АЭС. Нормы относятся к установкам и деятельности, связанным с радиационными рисками, включая ядерные установки, использование радиационных и радиоактивных источников, перевозку радиоактивных материалов и обращение с радиоактивными отходами

В изданных в 2016 г. Министерство путей сообщения (МПС) России "Правилах перевозок опасных грузов по железным дорогам" содержится ряд прямых отсылок к Рекомендациям ООН как нормативному документу. К важнейшим международным

документам, имеющим рекомендательный характер, относятся и "Рекомендации ООН по перевозке опасных грузов", и "Правила безопасной перевозки радиоактивных веществ", издаваемые МАГАТЭ.

Следует указать, что международные основные нормы радиационной безопасности и установленные на их основе отечественные нормы и стандарты радиационной безопасности (НРБ-99, ОСПОРБ-99) имеют концептуальное соответствие, что сняло целый ряд негативных последствий, в том числе недоверие в обществе к отечественным нормативам и устранение принципиальных трудностей в экономике при выполнении совместных с другими странами работ, проектов, связанных с использованием источников ионизирующих излучений, уничтожением запасов ядерного оружия и т.д.

В России на текущий момент сложилась острая ситуация с регламентацией перевозок радиационных грузов, обусловленная тем, что многие положения "Правил безопасности при транспортировании радиоактивных веществ (ПБТРВ-73)" и "Основных правил безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов (ОПБЗ-83)" имеют несоответствия между собой и противоречат как действующей отечественной законодательной и нормативной базе обеспечения радиационной безопасности, так и международным нормам. Учитывая, что Россия в современном мире вступает в полномасштабное сотрудничество с другими странами в области использования ядерных технологий, принципиально важным шагом явилась разработка новых национальных "Правил безопасности при транспортировании радиоактивных материалов (ПБТРМ-2004)", основывающихся на требованиях современных отечественных норм радиационной безопасности и синхронизированных с Правилами МАГАТЭ.

Транспортирование ОЯТ осуществляется по железной дороге литерными вагон-контейнерными поездами в составе локомотива, вагонов сопровождения для размещения вооруженной охраны и обслуживающего персонала, вагонов прикрытия и вагонов с ОЯТ. В Российской Федерации транспортирование отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) с АЭС реактора типа ВВЭР-1000 в хранилище Горно-химического комбината осуществляется с использованием транспортного упаковочного комплекта ТУК-13, разработанного в конце восьмидесятых годов. С целью улучшения топливоиспользования, повышения надежности и экономических показателей реакторных установок ВВЭР-1000 и строительством новых АЭС с реактором типа ВВЭР-1200, происходит постоянное совершенствование и внедрение новых тепловыделяющих сборок. Новые ТВС, реакторов типа ВВЭР-1000/1200 имеют

большее начальное обогащение топлива (по урану-235 до 5%), большую глубину выгорания топлива (70 ГВт·сут/тU). Радикальным решением проблемы для безопасного транспортирования ОТВС реактора типа ВВЭР-1000/1200 с увеличенной массой ядерного топлива и глубиной выгорания является создание транспортного упаковочного комплекта (ТУК), отвечающе- го современным требованиям по безопасности и по своим характеристикам не уступающего аналогичным разработкам ведущих зарубежных фирм. В рамках выполнения договора, заказчик ОАО “Концерн Росэнергоатом”, РФЯЦВНИИЭФ разработал концепцию создания транспортного упаковочного комплекта ТУК-137 для безопасного транспортирования отработавших тепловыделяющих сборок реакторов типа ВВЭР-1000 с увеличенной массой и глубиной выгорания ядерного топлива.

Габаритно-массовые характеристики ТУК-137 [5] приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1

Габаритно-массовые характеристики ТУК-137

Наименование параметра	Значение параметра
Длина (высота) ТУК, мм	6165
Наружный диаметр ТУК, мм	2770
Проходной диаметр загрузочного отверстия, мм	1510
Масса корзины, кг	4455
Масса корзины с 20 ОТВС, т	19
Масса силовой (внутренней) крышки с устройством поджима ОТВС, кг	3790
Масса наружной крышки, кг	3136
Масса контейнера с корзиной, т	110
Масса загруженного 20 ОТВС ТУК, т (масса одной ОТВС ≈ 730кг)	не более 125

Маршруты перемещения ОЯТ, в основном, проходят от АЭС до ПО «Маяк» и к ФГУП «ГХК» под Красноярском. Кроме этого, в ПО «Маяк» регулярно поступает ОЯТ из хранилищ БТБ Северного и Тихоокеанского флотов. В ближайшие годы планируется рост числа железнодорожных перевозок в связи с планами ГК «Росатом» по вывозу основного количества ОЯТ из хранилищ АЭС в ФГУП «ГХК» и ПО «Маяк», а также

вывоз ОЯТ с бывших БТБ на Северо-Западе России (губа Андреева, Гремиха). Для транспортировки ОЯТ используются следующие модификации вагонов: В-60М2, В-60М2-МБ, 61-524, 61-524-МБ, 10-9960, 11-9873. Вагоны оборудованы комплексами АСБТ, обеспечивающими мониторинг и физическую защиту перевозимого груза.

Обзор литературы задачи

Работа [1] посвящена вопросу подходов к оценке риска для перевозки радиоактивных материалов. В начале работе излагается концепцию «триплет риска» как событие, вероятности возникновения события и последствия этого события. Автор подчёркивает важность учитывать оценку риска ионизирующего излучения извне радиоактивных грузов при их транспортировке. Автор приводит основные параметры формулы для оценки риска перевозки радиационных грузов. Автор показывает, как можно рассчитать оценку риска перевозки радиационных грузов. Автор даёт оценку риска транспортных аварий, при которых радиоактивный груз не повреждён и транспортных аварий, при которых радиоактивный груз повреждён.

В документе [2] описываются упаковки радиационных грузов. Это требование не препятствует перевозке радиоактивных материалов с низкой удельной активностью или объектов с поверхностным радиоактивным загрязнением вместе с другими предметами. Перевозка таких предметов и документов в упаковке, или перевозка радиоактивных материалов с низкой удельной активностью, или объектов с поверхностным радиоактивным загрязнением совместно с другими предметами может разрешаться при условии, если обеспечено отсутствие их взаимодействия с упаковочным комплектом или с его радиоактивным содержимым, которое уменьшило бы безопасность упаковки. Упаковочные комплекты, используемые для перевозки радиоактивных материалов, не должны использоваться для хранения или перевозки других нерадиоактивных грузов. На транспортных средствах могут перевозиться упаковки с радиоактивными материалами совместно с другими грузами в соответствии с правилами перевозок опасных грузов, действующими на соответствующих видах транспорта. Загрузка упаковочных комплектов радиоактивными материалами, их подготовка к отправке и загрузка на транспортное средство, а также аналогичные операции при выгрузке должны производиться в соответствии с инструкцией по эксплуатации данного упаковочного комплекта и транспортного средства. Ответственный за сопровождение груза имеет право проверять правильность выполнения грузоотправителем требований данных инструкций. Если груз не может быть доставлен грузополучателю, он должен быть помещен в безопасное для него и окружающих место, о чем информируются грузоотправитель (если грузоотправитель может быть идентифицирован), у которого запрашиваются инструкции, касающиеся дальнейших действий.

Документ [3] посвящён правилам безопасной перевозки радиоактивных материалов. В документе [3] даны нормы безопасности МАГАТЭ и процесс разработки норм безопасности МАГАТЭ. При разработке норм безопасности МАГАТЭ

принимаются во внимание выводы Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) и рекомендации международных экспертных органов, в частности, Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Некоторые нормы безопасности разрабатываются в сотрудничестве с другими органами системы Организации Объединенных Наций или другими специализированными учреждениями, включая Продовольственную и сельскохозяйственную организацию Объединенных Наций, Программу Организации Объединенных Наций по окружающей среде, Международную организацию труда, Агентство по ядерной энергии ОЭСР, Панамериканскую организацию здравоохранения и Всемирную организацию здравоохранения. Выполнение этих требований обеспечивается, во-первых, путем применения ступенчатого подхода к пределам содержимого упаковок и перевозочных средств, а также к нормативным характеристикам конструкций упаковок в зависимости от опасности, которую представляет радиоактивное содержимое. Во-вторых, их выполнение достигается путем установления требований в отношении конструкции и эксплуатации упаковок, а также обслуживания упаковочных комплектов, в том числе с учетом характера радиоактивного содержимого. Наконец, требования выполняются путем обязательного применения мер административного контроля, включая, когда это необходимо, процедуры утверждения компетентными органами.

Публикация [4] посвящена нормам радиационной безопасности. В начале публикации говорится о том, что эта публикация должна обеспечить радиационную безопасность при нормальной эксплуатации источников излучения. В работе перечисляются принципы обеспечения радиационной безопасности. В публикации дают определения принципа нормирования, принципа обоснования и принципа оптимизации. В публикации даны основные пределы доз для населения и для профессионалов. В публикации подчёркивается, что основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий.

Работа [5] посвящена риску транспортировки плутония. В работе сравниваются различные виды транспортировки плутония при помощи вероятности событий данных перевозок в России и в Америке. В работе говорится о том, что на сегодняшний день 90 контейнеров типа В участвуют в автомобильных и железнодорожных авариях в Соединенных Штатах (из примерно 3000 партий). Не наблюдалось утечки радиоактивного материала. Восемьдесят семь из этих событий включали перевозки на грузовиках, а три для железных дорог. Шестнадцать из событий были «несчастными случаями», когда авария является событием, в котором произошла смерть или травма, или транспортное средство, участвовавшее в аварии, не может двигаться далее. В работе подчёркивается, что плутоний – это стратегический материал, и любая партия

должна быть тщательно учтена. В работе отсутствуют транспортировки других радиоактивных веществ и элементов.

В статье [6] предложен метод оценки интенсивности возникновения аварий на железнодорожном и автомобильном видах транспорта. Значения интенсивностей возникновения аварий могут быть использованы для получения оценок вероятностей аварий при транспортировании грузов (в том числе опасных) железнодорожным и автомобильным видами транспорта. В статье говорится о том, что расчет интенсивностей возникновения аварий на железнодорожном транспорте России проводим по данным статистических ежегодников СССР за период 1985-1990 г. (период времени, характеризующийся устойчивой работой транспорта сети дорог бывшего СССР) и по данным статистических ежегодников Российской Федерации после 1990 г. В статье подчёркивается, что для расчета интенсивностей возникновения аварий на железнодорожном транспорте необходимо знать также массу груза «нетто» в поезде и количество аварий на железнодорожном транспорте за определенный период времени. В статье даны статистики грузооборотов железнодорожного транспорта за 1985 – 90 г.г. Приведены расчётные формулы для интенсивностей возникновения аварий. В статье показаны интенсивности аварий по видам с помощью таблиц.

Статья [7] посвящена описанию рассеяния примеси в атмосфере при аварийных случаях. Модель используется для расчета доз для сценариев аварий, связанных с выбросом радиоактивных материалов в воздухе. В статье объясняется, как метеорологические условия влияют на загрязнение окружающей среды для различных сценариев аварий.

В работе [8] освещён вопрос оценки рисков непредвиденных аварий. В работе говорится о том, что в области транспорта предотвращение несчастных случаев является ежедневным приоритетом, но не может быть на 100% успешным. Принимаются соответствующие меры для снижения частоты несчастных случаев, но остаточные риски остаются с малой вероятностью рассмотрения в случае потенциально серьезных последствий. Потом в работе даны некоторые статистики при транспортировании радиоактивных материалов. Во Франции ежегодно объявляется около 100 таких транспортных событий по сравнению с 900 000 в год. Лишь немногие события приводят к высвобождению загрязнений или аномальному внешнему облучению, и, когда это так, уровни облучения часто являются низкими. В 1977 г. произошла авария при перевозке природного гексавторида урана в северной Каролине США. В результате аварии не было никаких утечек, никаких повреждений контейнеров и радиоактивного загрязнения. В апреле 2007 года фургон, перевозивший упаковку типа B (U), содержащую закрытые источники радиоактивного цезии, столкнулся (сильный удар) с грузовиком, перевозящим молочные продукты на главной дороге

между Нанси и Парижем. Затем последовал пожар. Продолжительность пожара оценивалась пожарниками между 15 и 50 мин. Водители фургона и грузовика скончались. В этом работе показаны аварии, связанные с радиоактивными источниками, и их последствия.

Управление безопасностью и риском при транспортировке радиоактивных материалов составляет важную сферу деятельности государственных органов управления на всех уровнях власти и административного аппарата производственных и других объектов, представляющих техногенную опасность для человека и окружающей среды. Основной целью такого управления являются установление и поддержание научно обоснованного приемлемого уровня безопасности и риска при техногенных воздействиях.

Важная роль в управлении риском отводится информационной технологии управления безопасностью и риском, фундаментальным компонентом которой является аналитическая деятельность. Правильная интерпретация информации о состоянии и функционировании объектов и структур, об их взаимосвязях, а также о геофизических и других явлениях и процессах обеспечивается их корректным описанием с применением соответствующего математического аппарата. Подбор соответствующего математического аппарата зависит от типа используемой информации и качественного характера конечного результата. В настоящее время, в основном, применяется аппарат теории вероятностей и математической статистики, что, прежде всего, резко ограничивает тип обрабатываемой информации и приводит к неадекватному восприятию окружающей обстановки, а порой к некорректным результатам. На такие ограничения влияет не только тип исходной информации, но и отсутствие таковой.

При расчете риска часто приходиться оперировать с данными, которые имеют характер нечеткости и которые нельзя назвать строго статистическими. Для получения адекватных результатов обработки информации необходим корректный учет неопределенностей таких параметров. Для того чтобы корректно учитывать неопределенности нечетких параметров используется нечеткое моделирование, позволяющее получать более адекватные результаты по сравнению с результатами, которые основываются на использовании традиционных аналитических моделей и алгоритмов управления.

В данной работе была поставлена задача получения оценок риска при транспортировке отработавшего ядерного топлива с применением вероятностного подхода. Введем некоторые определения, необходимые для дальнейшего изложения.

Транспортная авария - любая авария, которая произошла с транспортным средством, перевозящим радиоактивный материал. Авария есть инцидент, при котором имеется поражение или смертельный исход, или транспортное средство повреждено настолько, что не может самостоятельно передвигаться.

Авария при операциях с грузами - включает повреждение упаковок при погрузке, разгрузке и др.

Другие аварии - включают транспортные происшествия, где имеется выход или поверхностное загрязнение радиоактивными материалами, которые превышают установленные требования для упаковки или транспортного средства.

Грузооборот в тонно-километрах – сумма произведений веса каждой партии (отправки) перевозимого груза в тоннах на расстояние ее перевозки в километрах.

Средняя масса (вес) железнодорожного грузового поезда в тоннах брутто, исключая локомотивы без вагонов и с вагонами с общим числом их осей до 40 (сумма веса грузов в поезде и веса вагонов в поезде) определяется как отношение суммы пробега грузов (грузооборота) в поездах в тонно-километрах и пробега вагонов в поездах в тонно-километрах к пробегу локомотива во главе грузового поезда с грузами и без них в локомотиво-километрах;

В том числе нетто (вес грузов в поезде) – как отношение пробега грузов (грузооборота) в поездах в тонно-километрах к пробегу локомотивов во главе поезда с грузами и без них в локомотиво-километрах.

***Величина нормируемая*:** Величина, являющаяся мерой ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека и его потомков и предназначенная для определения пределов и допустимых уровней облучения человека. [Вводится впервые].

***Величина операционная*:** Величина, используемая в РК для оценки, обычно сложно определяемой контролируемой (нормируемой) величины; операционная величина однозначно определяется через характеристики источника ионизирующего излучения или поля излучения для стандартных условий и возможно приближена по смыслу к соответствующей контролируемой величине.

Для мониторинга воздействия внешнего излучения **МКРЕ** (***Международной комиссией по радиационным единицам и измерениям***) определила понятия операционных дозовых величин [6], которые в 1990-х годах были введены в практику радиационной защиты многих стран мира. Рекомендуется использовать эти величины и в дальнейшем с небольшими предлагаемыми изменениями. Для дозиметрии внутреннего облучения не было определено никаких операционных величин, которые позволили бы напрямую оценивать эквивалентную или эффективную дозу. Для оценки эквивалентной или эффективной дозы от воздействия радионуклидов, инкорпорированных в организме человека, были разработаны различные методы. Большинство этих методов основано на различных измерениях активности и применении расчетных моделей.

Операционные величины — это защитные величины, относящиеся к организму человека, эквивалентная и эффективная дозы, на практике не измеримы. В связи с этим, для оценки эффективных доз и эквивалентных доз в органах и тканях используются операционные величины. Эти величины введены для получения консервативной оценки значений защитных величин, связанных с облучением или с потенциальным облучением лиц, находящихся в большинстве условий радиационного воздействия. Эти операционные величины часто используются для установления практических правил и указаний. Для внешнего облучения используются различные операционные величины, описываемые ниже.

Для радиационного мониторинга в ситуациях внешнего облучения (мониторинг среды или индивидуальный мониторинг) выработаны специальные операционные величины дозовых эквивалентов. При проведении штатного мониторинга значения этих величин принимаются в качестве достаточно точных оценок эффективной дозы

или дозы в коже, соответственно, особенно, если эти значения лежат ниже пределов защиты.

Операционные дозовые величины используются для мониторинга внешнего облучения потому, что:

- ✓ для мониторинга среды необходимы значения величин в точке;
- ✓ при мониторинге среды значение дозовой величины не должно зависеть от распределения падающего излучения по направлениям;
- ✓ оборудование для радиационного мониторинга должно быть калибровано в единицах физической величины, для которой существуют калибровочные эталоны.

В различных задачах, решаемых в радиационной защите, требуются разные операционные дозовые величины. Эти задачи включают проведение мониторинга среды при контроле излучения на рабочем месте для установления зон контроля и наблюдения, а также при проведении индивидуального мониторинга для контроля и ограничения индивидуального облучения. В то время как измерения среды преимущественно проводятся в воздухе, индивидуальные дозиметры носятся на поверхности тела. Поэтому в такой ситуации поле излучения, которое «видит» измерительное устройство при измерении в воздухе отлично от устройства, которое «видит» индивидуальный дозиметр, носимый на теле там, где на поле излучения сильно влияет обратное рассеяние и поглощение излучения в теле. Использование различных операционных дозовых величин отражает именно эти различия.

Индивидуальный мониторинг внешнего облучения обычно осуществляется с помощью индивидуальных дозиметров, носимых на поверхности тела, и операционная величина, установленная для такого мониторинга, учитывает это обстоятельство. Истинное значение операционной величины определяется ситуацией облучения вблизи точки ношения дозиметра.

В методических указаниях [7] говорится о соответствии между нормируемыми величинами и операционными величинами при проведении индивидуального дозиметра контроля (ИДК). Ниже в таблице 1.2 показаны положение индивидуального дозиметра для нормируемых и операционных величи

Таблица 1.2

Соответствие между нормируемыми и операционными величинами

Нормируемая величина	Операционная величина	Положение индивидуального дозиметра	d, мм	Условное обозначение
Эффективная доза внешнего облучения	Индивидуальный эквивалент дозы $H_P(10)$	На нагрудном кармане спецодежды либо внутри него	10	$H_P(10)$
Эквивалентная доза внешнего облучения кожи	Индивидуальный эквивалент дозы $H_P(0,07)$	Непосредственно на поверхности наиболее облучаемого участка кожи	0.07	$H_P(0,07)$
Эквивалентная доза внешнего облучения кистей и сто	Индивидуальный эквивалент дозы $H_P(0,07)$	На поверхности кистей и стоп	0.07	$H_P(0,07)$
Эквивалентная доза внешнего облучения хрусталика глаза	Индивидуальный эквивалент дозы $H_P(3)$	На лицевой части головы	3	$H_P(3)$
Эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота женщины	Индивидуальный эквивалент дозы $H_P(10)$	На соответствующем месте поверх спецодежды	10	$H_P(10)$

Примечание. D – глубина биологической ткани

Защитные величины, ориентированные на организм (эквивалентная и эффективная дозы), не могут быть прямо использованы при радиационном мониторинге, поскольку их невозможно измерить. Вместо E (эффективная доза) и H_T (эффективная доза на органе или ткани) измеряются операционные величины. В условиях внешнего облучения при проведении индивидуального мониторинга и мониторинга радиационной обстановки должна быть определена операционная

величина эквивалента дозы. Измерения полей излучения с помощью устройств для мониторинга радиационной обстановки обычно проводятся в открытом пространстве, а индивидуальные дозиметры носятся на поверхности тела. Поля излучения, которые «видят» эти дозиметры, различны, и для их описания следует использовать различные операционные величины. Были рекомендованы величины эквивалента дозы, основанные на дозах, измеренных на глубине 10 мм и 0.07 мм в сфере МКРЕ или теле человека, соответственно. При внешнем облучении значения Е и доз в органах рассчитываются с помощью коэффициентов перехода. При оценке доз внутреннего облучения поступление радионуклидов и возникающая в результате него эквивалентная доза, а также эффективная доза, рассчитываются на основе прямых (например, прямого прижизненного измерения содержания радиоактивности в теле человека) или косвенных (например, измерение концентраций активности в экскретах) измерений и последующего использования расчетных моделей, описывающих поведение радионуклида в организме.

Операционная величина: эквивалент дозы в мягкой ткани (обычно интерпретируемой, как «сфера МКРЕ») на соответствующей глубине d в определенной точке тела человека. Единицей измерения индивидуального эквивалента дозы является джоуль на килограмм (Дж.кг-1), а ее специальным названием является «***зиверт***» (Зв). Точкой на теле человека обычно является место ношения индивидуального дозиметра.

Операционной величиной для индивидуального мониторинга является индивидуальный эквивалент дозы, Hp(d).

Индивидуальный эквивалент дозы, Hp(d) – это эквивалент дозы в (мягкой) ткани МКРЕ на соответствующей глубине, d, под заданной точкой на поверхности тела человека. Обычно положение этой точки задается точкой ношения индивидуального дозиметра. Для оценки эффективной дозы рекомендована глубина d=10 мм, а для оценки эквивалентной дозы в коже, а также кистях рук и ступнях ног рекомендована глубина **d = 0.07 мм**.В особых случаях мониторинга дозы в хрусталике глаза предложен глубина **d = 3 мм**

Таблица 1.3

Применение операционных дозовых величин внешнего облучения

Задача	Операционные величины для:	
	Мониторинга среды	Индивидуального мониторинга
Контроль эффективной дозы	Амбиентный эквивалент дозы H*(10)	Индивидуальный эквивалент дозы, $H_P(10)$
Контроль доз в коже, кистях рук и ступнях ног и в хрусталике глаза	Направленный эквивалент дозы H’(0.07, Ω)	Индивидуальный эквивалент дозы, $H_P(0.07)$

Оценка доз при воздействии внешних источников излучения обычно выполняется или на основе данных индивидуального мониторинга с помощью индивидуальных дозиметров, носимых на поверхности тела человека, или, к примеру, в случае ретроспективных оценок, посредством измерения или оценки H*(10) с последующим использованием соответствующих коэффициентов перехода. Операционными величинами для индивидуального мониторинга являются Hp(10) и Hp(0.07). Если персональный дозиметр находился в такой точке поверхности тела человека, которая репрезентативна для его облучения, то, при условии облучения в малой дозе и, предполагая, что происходило равномерное облучение всего тела, значение Hp(10) дает оценку значения эффективной дозы с точностью, достаточной для целей радиационной защиты.

Операционная величина для индивидуального мониторинга должна позволять оценивать эффективную дозу или оценивать ее консервативно почти при всех условиях облучения. Однако, при этом требуется, чтобы точка ношения индивидуального дозиметра на теле была представительна для условий облучения. При положении индивидуального дозиметра на передней части туловища величина Hp(10) почти всегда дает консервативную оценку E даже в случаях латерального или изотропного падения излучения на поверхность тела. Однако, в случае облучения со стороны спины дозиметр, который расположен спереди и корректно измеряет Hp(10), не даст правильной оценки E. Показание индивидуального дозиметра может быть нерепрезентативным для оценки эффективной дозы и в случае облучения части тела.

Эффективная доза в организме человека не может быть измерена напрямую. Поэтому система защиты включает в себя операционные величины, которые могут быть измерены и использованы для оценки эффективной дозы. МКРЕ разработала ряд операционных дозовых величин для внешнего облучения, которые были изучены объединенной рабочей группой МКРЗ и МКРЕ (Публикация 74, ICRP, 1996b). Анализ, данный в Публикации 74, указывает на то, что операционные дозовые величины, рекомендованные МКРЕ, достигают своей цели, обеспечивая радиационную защиту «измеримыми величинами», которые адекватно представляют защитные величины. При внутреннем облучении после поступления радионуклидов, величины активностей поступления вместе с дозовыми коэффициентами, разработанными МКРЗ, также служат в качестве операционных величин.

Риск для населения при транспортировке ОЯТ оценивался для случая безаварийной перевозки. Его принято характеризовать коллективной дозой, выражаемой в чел-Зв. Коллективная доза, S, рассчитывается как сумма всех

индивидуальных доз за определенный период времени или за время выполнения определенной операции. В процессе оптимизации проводится сравнение различных мероприятий радиационной защиты и операционных сценариев в форме оценки соответствующих ожидаемых индивидуальных и коллективных доз.

При расчёте оценки риска безаварийной перевозки ОЯТ, перевозимых в железной дороге, учитывают:

1) Мощность дозы от поверхности радиационных грузов в расстоянии, определенных в нормативных документах;
2) Мощность дозы в населенном пункте, в котором население повреждают при перевозке поезда, носимые радиационные грузы;
3) Доза, создана источником в участке дороги;
4) Длина маршрута;
5) Население в участке дороги;
6) Скорость поезда.

Для получения оценок риска транспортировки опасных материалов необходима статистическая информация об инцидентах. Но с учетом того, что доступной информации по статистике инцидентов при перевозке мало, в качестве опорных данных рассмотрим всю необходимую и известную информацию по инцидентам, как по зарубежным странам, так и по России. В связи с особенностями перевозок радиоактивных материалов в Европе и Америке, необходимо проанализировать имеющуюся статистику, как по европейским странам, так и по Америке.

Риск для населения при транспортировке отработавшего топлива [3], измеряемый в чел-бэр, оценивается для двух основных вариантов:

а) ***«безаварийный риск»***, определяющий суммарную дозу, полученную населением при перевозках без аварии,

б) ***«аварийный риск»***, представляющий суммарную дозу, полученную населением при авариях, умноженную на вероятность возникновения аварии.

В таблице 1.4 приведены полученные в работе [4] безаварийные и аварийные риски.

Таблица 1.4

Риск одной железнодорожной или автомобильной перевозки облученного топлива в США, чел-бэр/год.

Железнодорожные перевозки		Автомобильные перевозки	
Безаварийный	Аварийный	Безаварийный	Аварийный
0,02	$9{,}4*10^{-6}$	0,044	$8*10^{-7}$

1 бэр= 0.01 Зв

Для того чтобы понять задачи оценки перевозки ОЯТ, показаны фигуру, представляющую собой перевозки ОЯТ на пути. Модель основана на предположении, что населенный пункт может быть адекватно представлен в виде точки на плоскости. В большинстве академической литературы по перевозке опасных материалов принимает это предположение. Фактически, считается, что все население населенного пункта находится под угрозой, если соответствующий пункт находится в зоне действия. Этот подход явно неадекватен при оценке рисков, связанных с перевозкой опасных материалов по крупным городам. Жители вблизи дорог, используемых для перевозки опасных грузов, могут составлять лишь небольшую часть всего населения крупных городов. Когда центроид крупного демографического центра находится внутри (снаружи) зоны опасности вокруг транспортных маршрутов, базовая модель, вероятно, переоценивает (недооценивает), связанный с ней риск. Мы представляем расширение базовой модели, которая включает распределение населения по географическому региону. Расширенная модель оценивает риски в населенном районе воздействия вокруг дороги опасных грузов вместо того, чтобы предполагать, что все население сосредоточено в одной точке. Это равносильно оценке индивидуальных рисков как измерению фактического расстояния каждого человека до пути, используемого для перевозки опасных материалов.

Основные пределы доз для населения и персоналов

В соответствии с документом [1], для категорий облучаемых лиц устанавливаются два класса нормативов: Основные пределы доз (ПД), приведенные в таблице 2.1;

В таблице 2.1 показаны нормируемые величины. Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

Персонал – это лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или работающие на радиационном объекте или на территории его санитарно-защитной зоны и находящиеся в сфере воздействия техногенных источников (группа Б).

В таблице 2.1 даны основные пределы доз для персонала группы А. Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия персонала группы Б, равны 1/4 значений для персонала группы А.

Таблица 2.1

Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год

* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам

Формулировка оценки риска безаварийной перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута с Балаковской АЭС в производственное объединение «Маяк»

Формулировка для оценки безвредной дозы популяции от внешнего излучения, испускаемого упаковкой радиоактивных материалов, в большинстве случаев основана на выражении для мощности дозы в зависимости от расстояния от изотропного точечного источника излучения. В Рис. 1.1. показаны связь между дорогой и участка дороги. Обозначение v - это скорость, равная соотношение дороги на время

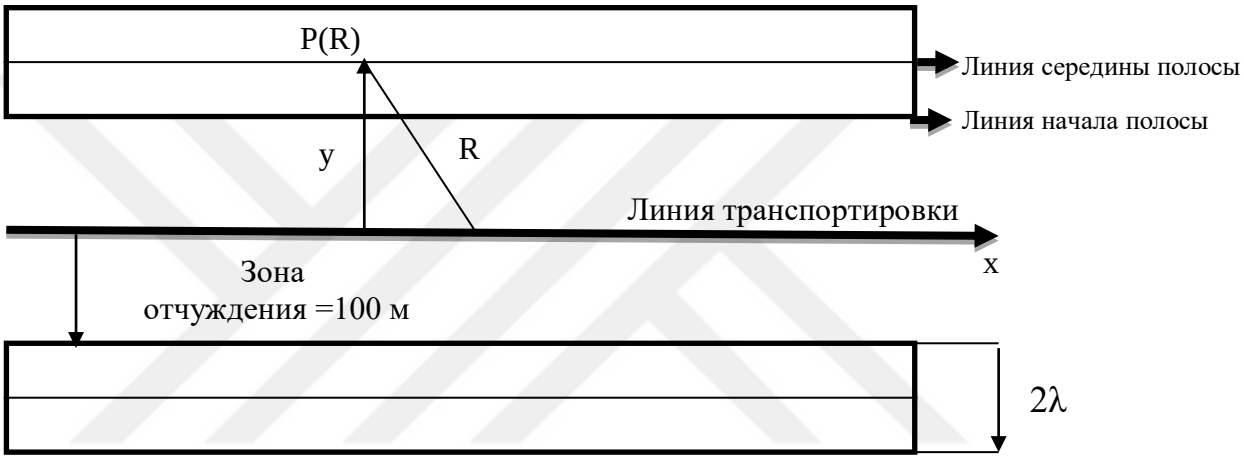

Рис. 1.1. Зависимость расстояния между источником излучения и населенным пунктом от участка дороги

Жилую застройку необходимо отделять от железных дорог санитарно-защитной зоной шириной 100 м [8], считая от оси крайнего железнодорожного пути.

Для такого источника мощность дозы обратно пропорциональна квадрату радиального расстояния от источника на больших расстояниях по сравнению с размерами упаковки. Расстояние источника от населенного пункта обозначается буквой R. P(R) – мощность дозы, рассчитанные в середине полосы проживания. $P_K(R)$ – мощность дозы, рассчитанные в начале полосы проживания (консервативная оценка).

Мощность дозы в населенном пункте обозначается P(R) и $P_K(R)$, которые рассчитывается формулой (2.1). Мощность дозы на расстоянии 1 м от поверхности контейнера упаковки обозначается $P(R_0)$, которая рассчитывается формулой (2.2). Связь между ними показывается формулой (2.3) и (2.4).

$$\mathbf{P(R)} = \frac{\mathbf{Q}}{4*\pi*\mathbf{R}^2} * \sum_{i=1}^{m} \boldsymbol{E_i} * \boldsymbol{n_{\gamma i}} * \boldsymbol{\mu_{en,m}}(\boldsymbol{E_i}) * \boldsymbol{e}^{-\mu_i R} * \boldsymbol{k}; \quad (2.1)$$

Где **Q** – активность (**Бк**),

$\mathbf{E_i}$ – энергия гамма квантов радионуклидов (**МэВ**), число которых равно m,

μ – линейный коэффициент ослабления фотонного излучения (**см$^{-1}$**),

R – расстояние между поездом и населенным пунктом (**м**),

$\boldsymbol{\mu_{en}}$ – массовый коэффициент поглощения энергии фотонного излучения(**см$^{-1}$**),

$\boldsymbol{n_{\gamma i}}$ – число фотонов на одном распаде

k – коэффициент пересчета, который равен **1.6*10^{-14}**

$$\mathbf{P(R_0)} = \frac{\mathbf{Q}}{4*\pi*\mathbf{R_0}^2} * \sum_{i=1}^{m} \boldsymbol{E_i} * \boldsymbol{n_{\gamma i}} * \boldsymbol{\mu_{en,m}}(\boldsymbol{E_i}) * \boldsymbol{e}^{-\mu_i R} * \boldsymbol{k}; \quad (2.2)$$

При оценке риска безаварийной перевозке не учтены коэффициент геометрического ослабления. Уравнивая формулы (2.1) и (2.2), получены формулы (2.3) и (2.4).

$$\mathbf{P(R)} = \mathbf{4} * \boldsymbol{\pi} * \mathbf{R^2} = \mathbf{P(R_0)} * \mathbf{4} * \boldsymbol{\pi} * \mathbf{R_0}^2; \quad (2.3)$$

$$\mathbf{P(R)} = \mathbf{P(R_0)} * \frac{\mathbf{R_0}^2}{\mathbf{R}^2} \quad (2.4)$$

Коллективные дозы для населения, рассчитываются путем интеграции по площади, занимаемой населением, так что мощность дозы – подынтегральная функция – немного сложнее, чем простая обратная квадратная зависимость.

Для того чтобы найти дозу, мощность дозы умножается и интегрируется по полосам ширины λ по обеим сторонам пути транспортировки. Из этого следует, что при интегрировании мощность дозы получена доза для одной стороны участка дороги. Поэтому найденная величина должна умножаться на две. Полученная доза называется эквивалент индивидуальной дозы на маршруте L. Она обозначается $H_p(d)$, которая рассчитывается формулой (2.6). d – глубина биологической ткани. Для измерения эквивалента индивидуальной дозы d равна 10 мм.

За значение эффективной дозы внешнего облучения [18] следует принимать:

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} * \mathbf{H_P(10)} \quad (2.5)$$

Где E – эффективная доза

F – коэффициент перехода от операционных к нормируемым величинам при контроле индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения.

При равномерном облучении человека любым ионизирующим излучением за исключением нейтронов с энергиями от 1 Эв до 30 кэВ и фотонов с энергиями менее 20 кэВ, значение коэффициента в соотношении (10) следует принимать равным 1.

$$\mathbf{H_P(10) = 2 * N * \int_0^{\infty} P(R) dt} \qquad (2.6)$$

Согласно с формулой (2.4), формула (2.6) принимает вид

$$\mathbf{H_P(10) = 2 * N * P(R_0) * R_0{}^2 * \int_0^{\infty} \frac{1}{R^2} dt} \qquad (2.7)$$

В соответствии с рисунком 2.1. R можно представить в виде: $R^2 = x^2 + y^2$, а x=v*t

$$\mathbf{H_P(10) = 2*N * P(R_0) * R_0{}^2 * \int_0^{\infty} \frac{1}{(v*t)^2+(y)^2} dt} \qquad (2.8)$$

Используем замена переменных чтобы решить интеграл. Вместо выражения v*t представим, как z, а дифференциальное выражение выглядит: d(vt) или d(z). Потому что скорость постоянная величина.

$$\mathbf{H_P(10) = 2 *N * P(R_0) * R_0{}^2 * \int_0^{\infty} \frac{1}{(z)^2+y^2} dz} =$$

$$= \mathbf{P(R_0) * R_0{}^2 * \frac{1}{v*y} * (arctg(\infty)\text{-}arctg(0))} =$$

$$= \mathbf{(\frac{\pi * R_0{}^2}{v * y}) * P(R_0) * N} \qquad (2.9)$$

Для того чтобы найти количество людей, плотность населения умножается площадь, занимаемая населением. Оно обозначается M, которое рассчитывается формулой (2.10).

$$\mathbf{M = n * 4 * \lambda * L} \qquad (2.10)$$

Для того, чтобы найти коллективную дозу на участке дороги, полученная доза умножается на население, которые находится в данных участках. Ниже приведена формула (2.11) для расчета коллективной дозы.

$$\mathbf{S = 2* H_P(10) * M} \qquad (2.11)$$

Для расчета коллективной дозы населения при перевозке ОЯТ была получена следующая формула (2.12) для расчета коллективной дозы при расчете мощность дозы

$$\mathbf{S} = \left(\frac{4 * \pi * R_0^2}{v}\right) * \frac{\lambda}{y} * n * L * P(R_0) * N \qquad (2.12)$$

Коллективная доза на маршруте длиной L обозначается S, n – плотность населения на маршруте, ν – скорость движения, L обозначает длину маршрута, N – число контейнера R_0 – радиус упаковки, $P(R_0)$ – максимальный уровень мощности дозы на расстоянии 1 м от поверхности контейнера. Y – расстояние между поездом и населенным пунктом

Где S – коллективная доза на маршруте длиной L, ν – скорость движения, n – плотность населения на маршруте, R_0 – радиус упаковки, $P(R_0)$ – максимальный уровень мощности дозы на расстоянии 1 м от поверхности контейнера.

Оценка риска перевозки ОЯТ проводилась для маршрута Балаковская АЭС – производственное объединение «Маяк», обеспеченного данными о плотности населения на различных участках. Риск для населения при транспортировке ОЯТ оценивался для случая безаварийной перевозки. Его принято характеризовать коллективной дозой, выражаемой в чел.-Зв.

В расчетах использовалось среднее значение плотности населения, которое равно 27 чел./км^2. Длина маршрута L равна 1200 км. Радиус упаковки R_0 = 2 м, число контейнера N = 8, $P(R_0)$ = 0.1 мЗв/час .[9]

Оценки безаварийного риска перевозки ОЯТ приведены с Балаковской АЭС на производственное объединение «Маяк».

Для разных ширин полос проводилось расчеты. Мощность дозы в начале полосы проживания рассчитываются (консервативная оценка). Поэтому полученные коллективные дозы обозначаются $S_1(2\lambda)$, $S_2(2\lambda)$, ….., $S_n(2\lambda)$. Скорость поезда выбрана как 30 км в час.

В таблице 2.2 показаны результаты изменений коллективной дозы по сравнению с суммой предыдущих полос в виде (S2-S1)/S1*100 (при S_0 = 0).

Коллективные дозы для разных расстояний от поезда для скорости поезда 30 км/ч при λ = 0.05 км

таблица 2.2

Коллективные дозы для расстояний от линии транспортировки	y - км	λ - км	Коллективные дозы, чел. – мкЗв	Изменение коллективных доз по сравнению с предыдущими дозами, %(добавление)
$S_1(2\lambda)$	0,15	0,05	14,5	-
$S_2(2\lambda)$	0,20	0,10	21,7	50,0
$S_3(2\lambda)$	0,25	0,15	26,0	20,0
$S_4(2\lambda)$	0,30	0,20	28,9	11,1
$S_5(2\lambda)$	0,35	0,25	31,0	7,1
$S_6(2\lambda)$	0,40	0,30	32,6	5,0
$S_7(2\lambda)$	0,45	0,35	33,8	3,7
$S_8(2\lambda)$	0,50	0,40	34,7	2,9
$S_9(2\lambda)$	0,55	0,45	35,5	2,3
$S_{10}(2\lambda)$	0,60	0,50	36,2	1,9
$S_{11}(2\lambda)$	0,65	0,55	36,7	1,5
$S_{12}(2\lambda)$	0,70	0,60	37,2	1,3
$S_{13}(2\lambda)$	0,75	0,65	37,6	1,1
$S_{14}(2\lambda)$	0,80	0,70	38,0	1,0
$S_{15}(2\lambda)$	0,85	0,75	38,3	0,8
$S_{16}(2\lambda)$	0,90	0,80	38,6	0,7
$S_{17}(2\lambda)$	0,95	0,85	38,8	0,7
$S_{18}(2\lambda)$	1,00	0,90	39,1	0,6
$S_{19}(2\lambda)$	1,05	0,95	39,3	0,5
$S_{20}(2\lambda)$	1,10	1,00	39,5	0,5
$S_{21}(2\lambda)$	1,15	1,05	39,6	0,4
$S_{22}(2\lambda)$	1,20	1,10	39,8	0,4
$S_{23}(2\lambda)$	1,25	1,15	39,9	0,4
$S_{24}(2\lambda)$	1,30	1,20	40,1	0,3
$S_{25}(2\lambda)$	1,35	1,25	40,2	0,3
$S_{26}(2\lambda)$	1,40	1,30	40,3	0,3
$S_{27}(2\lambda)$	1,45	1,35	40,4	0,3
$S_{28}(2\lambda)$	1,50	1,40	40,5	0,2
$S_{29}(2\lambda)$	1,55	1,45	40,6	0,2
$S_{30}(2\lambda)$	1,60	1,50	40,7	0,2

В таблице 2.2 приведен вклад коллективной дозы последней полосы по сравнению к коллективной дозы суммы предыдущих полос. Анализ показывает, что после 0,8 км вклад меньше 1 % для середины полосы проживания.

Коллективные дозы для разных расстояний от поезда для скорости поезда 30 км/ч при λ =0.025

таблица 2.3

Коллективные дозы для расстояний от линии транспортировки	y - км	λ - км	Коллективные дозы, чел. – мкЗв	Изменение коллективных доз по сравнению с предыдущими дозами, %(добавление)
$S_1(2\lambda)$	0,125	0,025	8,7	-
$S_2(2\lambda)$	0,150	0,050	14,5	66,7
$S_3(2\lambda)$	0,175	0,075	18,6	28,6
$S_4(2\lambda)$	0,200	0,100	21,7	16,7
$S_5(2\lambda)$	0,225	0,125	24,1	11,1
$S_6(2\lambda)$	0,250	0,150	26,0	8,0
$S_7(2\lambda)$	0,275	0,175	27,6	6,1
$S_8(2\lambda)$	0,300	0,200	28,9	4,8
$S_9(2\lambda)$	0,325	0,225	30,1	3,8
$S_{10}(2\lambda)$	0,350	0,250	31,0	3,2
$S_{11}(2\lambda)$	0,375	0,275	31,8	2,7
$S_{12}(2\lambda)$	0,400	0,300	32,6	2,3
$S_{13}(2\lambda)$	0,425	0,325	33,2	2,0
$S_{14}(2\lambda)$	0,450	0,350	33,8	1,7
$S_{15}(2\lambda)$	0,475	0,375	34,3	1,5
$S_{16}(2\lambda)$	0,500	0,400	34,7	1,3
$S_{17}(2\lambda)$	0,525	0,425	35,1	1,2
$S_{18}(2\lambda)$	0,550	0,450	35,5	1,1
$S_{19}(2\lambda)$	0,575	0,475	35,9	1,0
$S_{20}(2\lambda)$	0,600	0,500	36,2	0,9
$S_{21}(2\lambda)$	0,625	0,525	36,5	0,8
$S_{22}(2\lambda)$	0,650	0,550	36,7	0,7
$S_{23}(2\lambda)$	0,675	0,575	37,0	0,7
$S_{24}(2\lambda)$	0,700	0,600	37,2	0,6
$S_{25}(2\lambda)$	0,725	0,625	37,4	0,6
$S_{26}(2\lambda)$	0,750	0,650	37,6	0,5

$S_{27}(2\lambda)$	0,775	0,675	37,8	0,5
$S_{28}(2\lambda)$	0,800	0,700	38,0	0,5
$S_{29}(2\lambda)$	0,825	0,725	38,1	0,4
$S_{30}(2\lambda)$	0,850	0,750	38,3	0,4

Анализ в таблице 2.3 показывает, для середины полосы проживания вклад коллективной дозы последней полосы меньше 1 % после 0,55 км.

Из этого следует, что при выборе узкой полосы по сравнение с более широкой полосой вклад коллективной дозы последней полосы оказывается меньше 1% на более близком расстоянии, чем при выборе широкой полосы.

В таблице 2.4 приведены результаты расчета эквивалента индивидуальной дозы для разных скоростей поезда.

Эквивалент индивидуальной дозы для разных скоростей движения (при y = 100 м)

таблица 2.4

Скорость поезда, км/ч	**Эквивалент индивидуальной дозы, мкЗв**	**Эквивалент индивидуальной дозы, нЗв**
30	3,35E-03	3,3
35	2,87E-03	2,9
40	2,51E-03	2,5
45	2,23E-03	2,2
50	2,01E-03	2,0
55	1,83E-03	1,8
60	1,67E-03	1,7
65	1,55E-03	1,5
70	1,44E-03	1,4
75	1,34E-03	1,3
80	1,26E-03	1,3

Оценка риска безаварийной транспортировки ОЯТ для разных скоростей движения (сумма полос y = 800 м)

таблица 2.5

Скорость поезда, км/ч	Коллективная доза, чел. – мкЗв
30	38,0
35	32,6
40	28,5
45	25,3
50	22,8
55	20,7
60	19,0
65	17,5
70	16,3
75	15,2
80	14,2

В таблице 2.4 и 2.5 показаны основные результаты при транспортировке ОЯТ железнодорожным транспортом. В таблице 2.5 показаны результаты коллективных доз для разных скоростей поезда.

Оценка риска безаварийной перевозки для разной плотности населения для разных областей при скорости 30 км/ч (сумма полос у = 800 м)

таблица 2.6

Области	Плотность населения, чел./км^2	Длины маршрута, км	Количество жителей	Коллективная доза, чел. – мкЗв
Саратовская область	24,30	250	2430	7,1
Самарская область	56,9	300	6828	20,0
Оренбургская область	16	350	2240	6,6
Челябинская область	39,5	300	4740	13,9
∑		1200	16238	47,6

Оценка риска безаварийной перевозки для разной плотности населения для разных областей при скорости 40 км/ч (сумма полос у = 800 м)

таблица 2.7

Области	Плотность населения, чел./км^2	Длины маршрута, км	Количество жителей	Коллективная доза, чел. – мкЗв
Саратовская область	24,30	250	2430	5,3
Самарская область	56,9	300	6828	15,0
Оренбургская область	16	350	2240	4,9
Челябинская область	39,5	300	4740	10,4
∑		1200	16238	35,7

Оценка риска безаварийной перевозки для разной плотности населения для разных областей при скорости 50 км/ч (сумма полос у = 800 м)

таблица 2.8

Области	Плотность населения, чел./км^2	Длины маршрута, км	Количество жителей	Коллективная доза, чел. – мкЗв
Саратовская область	24,30	250	2430	4,3
Самарская область	56,9	300	6828	12,0
Оренбургская область	16	350	2240	3,9
Челябинская область	39,5	300	4740	8,3
∑		1200	16238	28,6

Оценка риска безаварийной перевозки для разной плотности населения для разных областей при скорости 60 км/ч (сумма полос у = 800 м)

таблица 2.9

Области	Плотность населения, чел./км^2	Длины маршрута, км	Количество жителей	Коллективная доза, чел. – мкЗв
Саратовская область	24,30	250	2430	3,6
Самарская область	56,9	300	6828	10,0
Оренбургская область	16	350	2240	3,3
Челябинская область	39,5	300	4740	6,9
∑		1200	16238	23,8

Оценка риска безаварийной перевозки для разной плотности населения для разных областей при скорости 80 км/ч (сумма полос у = 800 м)

таблица 2.10

Области	Плотность населения, чел./км^2	Длины маршрута, км	Количество жителей	Коллективная доза, чел. – мкЗв
Саратовская область	24,30	250	2430	2,7
Самарская область	56,9	300	6828	7,5
Оренбургская область	16	350	2240	2,5
Челябинская область	39,5	300	4740	5,2
∑		1200	16238	17,8

Коллективная доза безаварийной транспортировки тем выше, чем меньше скорость движения. При этом оценка индивидуальной дозы для населения для

расстояния от линии транспортировки y = 100 м при скорости движения 30 километров в час составляет 3.35 нЗв, что значительно ниже предела дозы для населения [4].

таблицы 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 показаны, что расчет для маршрута с постоянной плотностью населения, равной средней плотности населения дает меньшее значения коллективной дозы, чем расчет с учетом разной плотности населения для разных областей.

Анализ риска аварийной перевозки отработавшего ядерного топлива железнодорожным транспортом

Риск для населения при транспортировке отработавшего топлива [9, 10], измеряемый в чел-бэр, оценивается для двух основных вариантов:

а) «безаварийный риск», определяющий суммарную дозу, полученную населением при перевозках без аварии,

б) «аварийный риск», представляющий суммарную дозу, полученную населением при авариях, умноженную на вероятность возникновения аварии.

Немаловажным аспектом проблемы определения некоторых количественных показателей безопасности транспортировки грузов, особенно опасных, является определение вероятностных характеристик появления аварий на пути следования транспортов с грузом. Для вычисления вероятности используется такая характеристика, как интенсивность возникновения аварий I, которая определяется следующим образом:

I = число аварий (ДТП) / пробег

Проведение корректных оценок риска транспортировки радиоактивных материалов возможно только при наличии соответствующих баз данных. Проведенный поиск выявил наличие нескольких документов, существенных с точки зрения оценок вероятности инцидента при транспортировке. Прежде всего, это базы данных инцидентов при транспортировке радиоактивных материалов. Среди них – база данных Сандийской национальной лаборатории (SNL) и база данных МАГАТЭ. База данных SNL содержит информацию об инцидентах при транспортировке радиоактивных материалов, которые произошли в США, начиная с 1971 г. (таблица 1.4).

Таблица 1.4

Транспортные аварии при перевозке радиоактивных материалов в США, 1971-1999 годы.

Тип	Определение	Число
Транспортные аварии	Любая авария, которая произошла с транспортным средством, перевозящим радиоактивный материал. Авария есть инцидент, при котором имеется поражение или смертельный исход, или транспортное средство повреждено настолько, что не может самостоятельно передвигаться.	402
Аварии при операциях с грузами	Включает повреждение упаковок при погрузке, разгрузке и др.	291
Другие	Включает транспортные происшествия, где имеется выход или поверхностное загрязнение радиоактивными материалами, которые превышают установленные требования для упаковки или транспортного средства.	1256
Полное число		1949

В 1998 году МАГАТЭ начало собирать информацию относительно аварий и инцидентов при транспортировке радиоактивных материалов. Результирующая база данных, называемая EVTRAM, является обзором случаев, имевших место при транспортировке радиоактивного материала в течение 1984-1993 годов. Имели место 128 случаев, заявленных 10 государствами. В большей части случаев не было никаких радиологических последствий, а в тех случаях, где произошел выход радиоактивных материалов, радиационное воздействие было низким.

В период с 1994-1997г.г. в Румынии было перевезено 1699 контейнеров по железной дороге протяженностью 764 км и 420 контейнеров автотранспортом (протяженность маршрута 608 км). Данные по коллективным дозам при перевозках приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Оцененные коллективные дозы (чел. – Зв/год) для автотранспортных перевозок в Румынии.

Доза для населения вдоль маршрута	$0.75 * 10^{-7}$
Доза для населения при остановках	$1.12 * 10^{-6}$
Доза для экипажа трейлера	$1.0 * 10^{-3}$
Доза для других участников движения	$0.3 * 10^{-4}$
Общая коллективная доза	$0.78 * 10^{-3}$

При оценке риска автотранспортной аварии источники риска были разделены на две основные категории: столкновения (с транспортными средствами, опорами мостов, другими подвижными объектами и пр.) и пожары. Вероятность аварии для различного класса дорог варьировалась от $4.35 * 10^{-6}$ до $2.32 * 10^{-5}$ 1/км, что хорошо согласуется с результатами американских специалистов. Для железнодорожного транспорта вероятность аварии составила $1.83 * 10^{-9}$ 1/км.

В работе отечественных специалистов [6] предложен метод оценки интенсивности возникновения аварий на железнодорожном и автомобильном видах транспорта. Значения полученных интенсивностей возникновения аварий используются для получения оценок вероятностей аварий при транспортировании грузов (в том числе опасных) железнодорожным и автомобильным видами транспорта.

Для определения показателя опасности транспортирования грузов различными видами транспорта используется методология оценки риска. В качестве вероятности опасности принимается вероятность появления аварии (крушения) на пути следования

транспорта с грузом. Для вычисления вероятности используется такая характеристика, как интенсивность возникновения аварий, которая определяется также, как и в работе [6]:

λ = число аварий (ДТП)/пробег

Далее, полагая, что процесс возникновения аварийной ситуации описывается экспоненциальным законом, определяют вероятность возникновения (или отсутствия) аварии на участке следования.

Расчет интенсивностей возникновения аварий на железнодорожном транспорте России проводился по данным статистических ежегодников СССР за период 1985-1990 г. (период времени, характеризующийся устойчивой работой транспорта сети дорог бывшего СССР) и по данным статистических ежегодников Российской Федерации после 1990 г.

Для расчета интенсивностей аварий воспользуемся данными по грузообороту на железнодорожном транспорте, представленными в таблице 1.6.

Таблица 1.6

Грузооборот железнодорожного транспорта за 1985-90 г.г.

Год	Грузооборот, млрд ткм
1985	3718.4
1986	3834.5
1987	3824.8
1988	3924.8
1989	3851.7
1990	3717.1

Для расчета интенсивностей возникновения аварий на железнодорожном транспорте необходимо знать также массу груза «нетто» в поезде и количество аварий на железнодорожном транспорте за определенный период времени.

Величины средних масс грузов в поезде «брутто» и «нетто» в различные годы представлены в таблице 1.7.

Таблица 1.7

Масса грузов в поезде.

Год	Средняя масса (вес) железнодорожного поезда, т	
	«брутто»	В том числе «нетто» (масса грузов в поезде)
1985	3033	1764
1986	3094	1792

1987	3085	
1988	3120	1803
1989	3105	1789
1990	3070	1763

На основании данных таблицы отношение массы грузов в поезде к массе железнодорожного поезда «брутто» ≈ 0.578.

Исходя из этого, можно вычислить неизвестное значение массы грузов в поезде в 1987 г. Это значение равно: 3085 * 0.578 = 1783 т.

Интенсивность возникновения аварии за i-ый год рассчитывается по формуле:

$\lambda_i = N_i * g_i / G_i$,

Где N_i – количество железнодорожных аварий за i- ый год;

g_i - масса перевозимого груза (масса нетто) поездом в i- ом году;

G_i – грузооборот на железной дороге за i- ый год, ткм.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8

Интенсивность аварий на железнодорожном транспорте.

Год	Грузооборот, млрд ткм	Количество аварий	Масса грузов в поезде, т	Интенсивность λ, (1/ км)
1985	3718.4	111	1764	$5.27 * 10^{-8}$
1986	3834.5	91	1792	$4.25 * 10^{-8}$
1987	3824.8	76	1783	$3.54 * 10^{-8}$
1988	3924.8	76	1803	$3.49 * 10^{-8}$
1989	3851.7	62	1789	$2.88 * 10^{-8}$
1990	3717.1	85	1763	$4.03 * 10^{-8}$

Среднее значение интенсивности возникновения аварии на железнодорожном транспорте, вычисленное по данным таблицы 1.8, равно $\lambda_1 = 3.91 * 10^{-8}$ 1/ км.

В этой работе [6] российские ученые пришли к выводу, что на практике удобно пользоваться размерностью λ [1/час]. Переход осуществляется по формуле $\lambda_2 = \lambda_1 * V$, где в качестве скорости V принимаем линейную (участковую) скорость движения поезда.

По данным ежегодника величины линейных скоростей движения поезда в различные годы представлены в таблице 1.9.

Таблица 1.9

Линейная скорость движения грузовых поездов.

	1985	1986	1988	1989	1990
Линейная скорость, Км/час	30.9	32.3	32.3	32.5	33.0

Средняя линейная скорость движения поезда за 85-90 г.г. составляет Vср = 32.2 км. /час и мало меняется в различные периоды.

Поэтому интенсивность возникновения аварий на железной дороге равна:

$\lambda_2 = 3.91 * 10^{-8} * 32.2 = 1.26 * 10^{-6}$ (1/час).

Зная процентное соотношение различных видов аварий, можно определить интенсивности возникновения аварий по видам. Рассматривались следующие виды аварий: сходы, столкновения, пожары (просто «аварии» из рассмотрения исключаются).

Значения интенсивностей возникновения аварий, рассчитанные по видам аварий, представлены в таблице 1.11

Таблица 1.10

Распределение аварий на железной дороге по видам.

Год	Количество Аварии	**Количество сходы** / % - сходы	**Количество Столкновения** / % - столькновения	**Количество Пожары** / % - Пожары
1993	65	**44**	**11**	**11**
		68	17	17
1994	50	**26**	**11**	**13**
		52	22	26
1996	42	**29**	**6**	**7**
		69	14	17
Всего	157	**99**	**28**	**31**
		63	18	20

Таблица 1.11

Интенсивность аварий по видам.

Вид аварии	Процент	Интенсивность возникновения аварии λ, 1/км	Интенсивность возникновения аварии λ`, 1/час
Сходы	63	$2.5 * 10^{-8}$	$7.9 * 10^{-7}$
Столкновения	18	$7.0 * 10^{-9}$	$2.3 * 10^{-7}$
Пожары*)	20	$7.8 * 10^{-9}$	$2.5 * 10^{-7}$

*) Как правило, загорается один вагон в поезде.

Возникновения сценарии радиоционных и ядерных аварий при транспортировки свежего ядерного топлива и отработавшего ядерного топлива

Проанализируем типичные наборы сценариев развития возможных аварийные ситуации при перевозке ОЯТ отечественных и зарубежных АЭС с реакторами ВВЭР-1000 (их возникновение и протекание, формирование возможных при аварии радиационных последствий), которые всегда анализируются при обосновании безопасности перевозок.

Как правило, рассматривают следующие исходные события возможных аварий при транспортировании ОЯТ:

1) резкое изменение климатических (погодных) условий;

2) отказ элементов ТУК и транспортных средств при перевозке;

3) отказ железнодорожных объектов момент прохождения вагон-контейнерного поезда;

4) пожар на транспортном средстве или на объектах, расположенных вблизи вагон-контейнерного поезда или судна-контейнеровоза;

5) землетрясение;

6) ураган;

7) наводнение;

8) террористический атак;

9) падение самолёта на вагон-контейнер.

При анализе того, могут перечисленные выше исходные события привести к нарушениям нормальной эксплуатации транспортных средств и упаковок и к аварийным ситуациям, учитывают климатические условия окружающей среды по возможные перевозки упаковок по территории России и зарубежных стран, установленные проектные требования. Которым должны соответствовать упаковки для перевозки отработавшего ядерного топлива. (Согласно соответствующим проектным документам, отказы оборудования могут привести к нарушению условий нормальной эксплуатации упаковок, но не к возникновению аварийных ситуаций).

В качестве аварийных ситуаций, которые реально могут произойти при перевозках ОЯТ, (безотносительно к вероятности возникновения этих ситуаций) учитывают следующее:

При перевозке железнодорожным транспортом:

1) сход с рельсов одного или нескольких вагонов-контейнеров из-за неисправности пути, оборудования, подвижного состава, ошибок персонала;

2) пожар, вызванный возгоранием в вагоне или составе на соседних путях;

3) столкновение эшелона с ОЯТ с другим железнодорожным составом, локомотивом, автомобилем;

4) столкновение эшелона с ОЯТ с другим железнодорожным составом, перевозящим легковоспламеняющиеся грузы;

5) взрыв на путях, в туннеле, подрыв вагона-контейнера, эшелона (аналогичная ситуация может сложиться при падении самолёта на эшелон).

При оценке учитывают то, что каждая из перечисленных аварий характеризуется определёнными радиационными параметрами (уровнем излучения от упаковки или группы упаковок и величиной выхода радиоактивного содержимого из упаковки), но, что в зависимости от места аварии радиационные последствия аварий будут различными.

В результате анализа маршрута транспортирования к рассмотрению принимаются перечисленные ниже аварийные ситуации, которые могут реально произойти при перевозках ОЯТ:

1) падение вагона-контейнера с насыпи, путепровода или моста;

2) удар вагона-контейнера об опоры, устои, контрфорсы и т.п. на межстанционных перегонах или о стенки туннелей и выемок;

3) столкновение эшелона с ОЯТ с другим железнодорожным составом или тяжелым грузовичком;

4) попадание вагона-контейнера или упаковки в зону пожара, вызванного различными причинами;

5) падение самолёта на эшелон;

6) затопление упаковки;

7) террористический акт.

Приведем, в качестве примера, типичную схему оценки техногенного радиационного риска ядерных аварий для населения, персонала и окружающей среды, сопутствующего транспортированию ОЯТ в соответствии с конкретными принятыми в России маршрутами, порядком, техническими средствами и технологиями транспортирования. Такая оценка проводится, в обязательном порядке, перед транспортированием каждой партии ОЯТ.

Рассматривается схема (концептуальная модель) последовательности событий (воздействий на вагон-контейнер), которые могут, в конечном итоге, привести к выходу радиоактивности из упаковок с ОЯТ, к ухудшению условий ядерной безопасности ОЯТ, помещенного внутрь упаковок, или к ухудшению защитных свойств упаковок с ОЯТ (то есть к повышенному радиационному воздействию ОЯТ на персонал, население и на окружающую среду).

Эта схема приведена на рис. 1.3 и существенно используется для разработки сценариев возникновения ядерных аварий при транспортировании. Она отражает последовательность возможных событий упрощению, но достаточно полно и консервативно (с точки зрения оценки рисков, связанных с возможными аварийными ситуацияи).

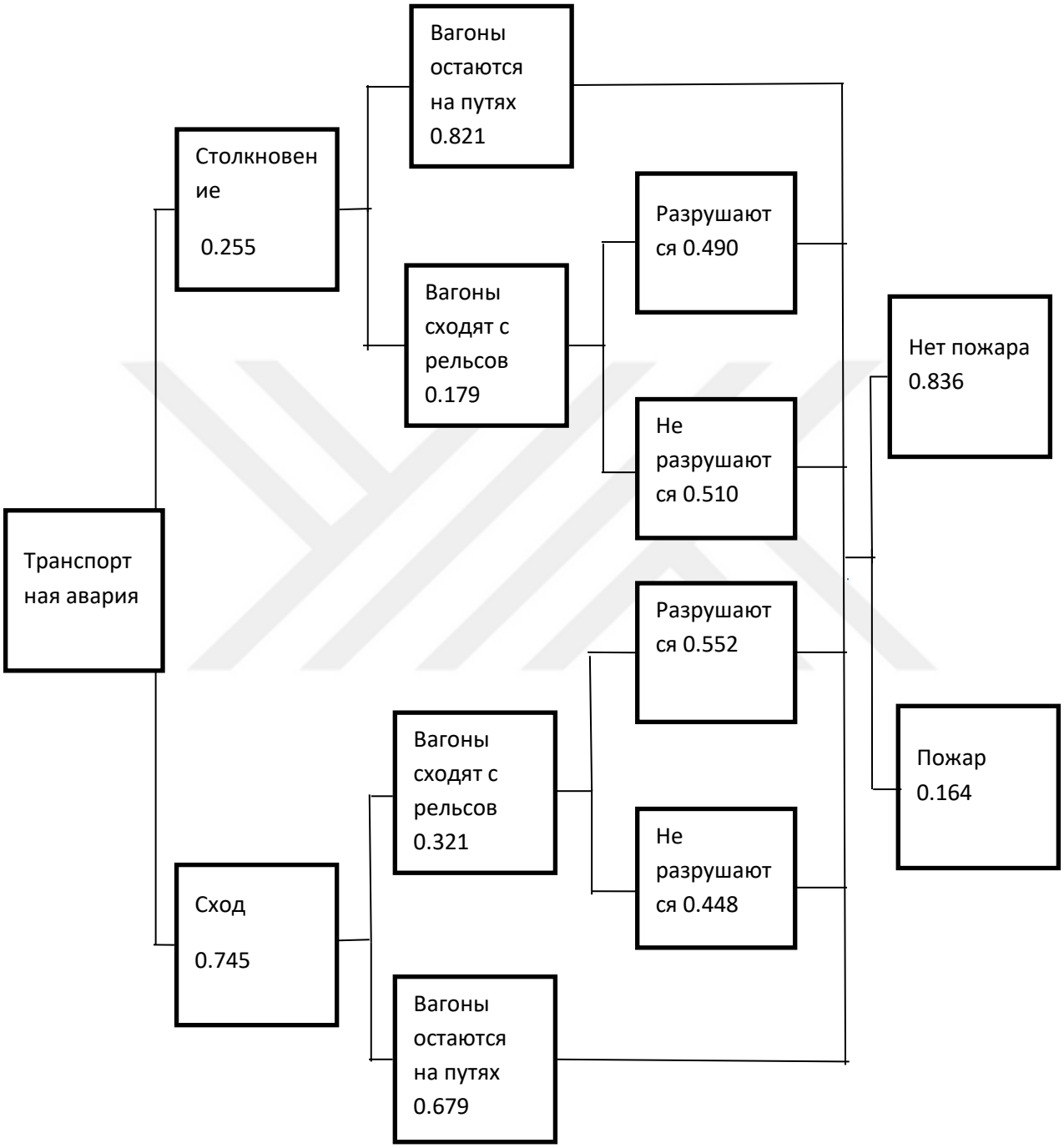

Рис. 1.3 Дерево событий при аварии на железной дороге, принимаемое при оценке вероятности возникновения ядерных аварий при транспортировании ОЯТ в соответствии с разработанным сценарием.

В то же время схема позволяет достигнуть высокой степени реалистичности оценки дополнительного техногенного риска, связанного с транспортированием ОЯТ, поскольку схема корректно связывает все без исключения структурные элементы принятой концептуальной модели с:

1) возможными на железнодорожном транспорте аварийными событиями, для которых имеются официальные статистические данные (общие характеристики аварийности перевозок МПС РФ);

2) особенностями конкретных ландшафтных, климатических и демографических обстановок, которыми характеризуются конкретные маршруты транспортирования ОЯТ с различных зарубежных АЭС в пункт конечного назначения (ГХК).

Это позволяет, с одной стороны, выполнить реалистические и хорошо обоснованные оценки значений вероятностей возможных аварийных событий при транспортировании ОЯТ по железным дорогам Российской Федерации. С другой стороны, это достаточно полно позволяет учесть и конкретные особенности альтернативных маршрутов транспортирования ОЯТ на ГХК или ПО «Маяк».

Отметим, что последнее из упомянутых обстоятельств позволяет при определении конкретного маршрута для каждой конкретной перевозки ОЯТ выполнить требования принципа ALARA (принципа оптимизации). Отметим также, что соблюдение этого принципа в данном конкретном случае не является обязательным, поскольку конечные результаты выполненных оценок дополнительного радиационного риска, связанного с возможными при транспортировании ОЯТ авариями, показывают, что значение этого риска (выраженного в терминах дозы) значительно ниже нижнего предела коллективной дозы облучения (1 человеко-зиверт в год), до которого проведение оптимизации является обязательным.

Опишем подход к анализу сценариев ядерных аварий, принимаемый при обосновании безопасности транспортировании ОЯТ в целом. Он основан на оценке значения вероятностей аварий, приводящих к выходу радиоактивности из упаковок с ОЯТ, к ухудшению условий ядерной безопасности ОЯТ, помещенного внутрь упаковок, или к ухудшению защитных свойств упаковок с ОЯТ (то есть к повышенному радиационному воздействию ОЯТ на персонал, население и на окружающую среду). Принято, что:

1) если вероятность возникновения аварии заметно ниже границы для “практически невероятных событий” ($P = 10^{-9}$), то она исключается из рассмотрения;

2) если вероятность возникновения аварии близка к 10^{-9} (даже будучи меньше этой величины), то должна быть выполнена количественная или качественная оценка последствий такой аварии.

Количественные значения вероятностей реализации ядерных аварий могут быть консервативно определены в соответствии с принятой схемой возникновения и протекания аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте РФ.

С этой целью может быть построено основанное на этой схеме дерево событий (Рис. 3.), включающее:

1) цепочки разветвляющихся событий (или состояний), вероятность реализации каждого из которых может быть достоверно определена по имеющимся официальным статическим данным и по известным ландшафтным обстановкам транспортирования ОЯТ по конкретным маршрутам;

2) значения этих вероятностей – полных или условных.

С учётом возможного международного характера транспортирования ОЯТ, обычно консервативно принимают классификацию групп значений вероятностей возникновения (P) транспортных аварий в России в соответствии с рекомендациями международных организаций (Risk Assessment of Spent Fuel Transport in Russia. Final Report, European Comission DG-17, November, 1999):

а) Повторяющиеся события $P \sim 10^{-3}$

б) Вероятные события $10^{-5}<P<10^{-3}$

в) Маловероятные события $10^{-7}<P<10^{-5}$

г) Исключительно маловероятные события $10^{-9}<P<10^{-7}$

д) Практически невероятные события $P<10^{-9}$

С учетом изложенного, в настоящем отчете принят следующий подход к анализу аварийных ситуаций. Рассматривается сценарий возникновения аварии, оценивается вероятность ее реализации. Если вероятность возникновения заметно ниже границы для «практически невероятных событий» ($P = 10^{-9}$), то данное происшествие исключается из рассмотрения. Если вероятность возникновения достаточно близка к 10^{-9} (даже если меньше этой величины), то проводиться оценка последствий возникновения аварийной ситуации.

Принятая здесь повышенная степень консерватизма (считается произошедшими события с вероятностью меньше 10^{-9}) оправдано тем, что используемая статистика аварий и ряд других характеристик относятся лишь приблизительно к половине полной протяженности маршрута и в принципе могут отличаться в «худшую» сторону от соответствующих характеристик всего маршрута. Следует отметить, однако, что в пользу надежности используемой статистики свидетельствует удовлетворительное ее соответствие имеющимся другим отечественным и зарубежным данным.

Расчеты вероятностей аварийных перевозки отработавшего ядерного топлива

В настоящее время транспортирование ОЯТ с АЭС Украины осуществляется с использованием транспортных упаковочных комплектов. Транспортные упаковочные комплекты состоят из радиационно - защитных контейнеров и размещенных в их внутренних полостях чехлов для отработавших ТВС. Внутренние полости контейнеров при перевозке ОЯТ заполнены инертным газом или воздухом.

Радиационно-защитные контейнеры представляют собой массивные стальные сосуды цилиндрической формы с крышками. На наружных поверхностях корпусов контейнеров размещены металлические тонкостенные оболочки («рубашки»), полости между которыми и корпусами контейнеров заполнены жидкостью - раствором этиленгликоля в воде, выполняющей функцию нейтронной защиты. Контейнеры в районе днищ имеют по две цапфы для крепления их на транспортных средствах. В районе крышек контейнеров имеются четыре грузовые цапфы для перемещения контейнеров в вертикальном положении, из которых две являются страховочными и используются для дополнительной строповки контейнеров при перемещении на АЭС, а также по два приварыша для крепления контейнеров на транспортных средствах клиновыми упорами.

Каждый контейнер оснащен двумя клапанами, используемыми при осушении, заполнении газовым теплоносителем, испытании на герметичность и расхолаживании упаковки перед выгрузкой ТВС в хранилище ГХК. В транспортном положении клапаны и отверстия в корпусах контейнеров защищены массивными крышками, установленными герметично на прокладках.

Герметичность разъемных соединений контейнеров обеспечивается с помощью прокладок из терма- и радиационной стойкой резины.

Чехлы представляют собой металлические конструкции, состоящие из основания, центральной трубы с устройством под захват, направляющих, дистанционирующих и силовых элементов, соединяющих составные части в единую конструкцию. В чехле контейнеров ТВС размещаются в шестигранных трубах из борсодержащей стали.

Выход активности из упаковки в пожаре с параметрами согласно правилам ОПБЗ-83 и правилам МАГАТЭ не более $8.438 * 10^8$ Бк/ч.

Принятый регламент транспортирования обеспечивает высокую степень безопасности, так что выход заметного количества отработавшего топлива в окружающую среду возможен только при исключительно неблагоприятных ситуациях. Для его возникновения необходимо сочетание двух обстоятельств:

1) возникновение тяжелой механической аварии с нарушением всех степеней герметичности контейнера,

2) последующий интенсивный пожар. Наиболее вероятным сценарием подобной аварии является крушение поезда с последующим падением с большой высоты на каменный грунт и возникновением вагонного пожара.

Для оценки вероятности аварийных ситуаций использовалась аварийная статистика маршрута Нововоронеж - Челябинск (ПО «Маяк») за период с 1994 до 1998 годов.

Анализ этой статистики показал, что частота возникновения аварийной ситуации составляет $2.46 * 10^{-8}$ авария/поезд * км в год.

Длина маршрута составляет около 5000 км, поэтому вероятность аварии с поездом на нем составляет

$$2.46 * 10^{-8} * 5000 = 1.23 * 10^{-4} \text{ аварий/год}$$

Расчет вероятностей реализации различных сценариев развития аварии проводился с использованием дерева событий (рис. 1.3), где указаны доли конкретных событий в общей массе происшествий.

Тогда вероятность схода вагона-контейнера с рельсов определяется как

$$1.23 * 10^{-4} * [(0.75 * 0.32) + (0.25 * 0.18)] = 3.51 * 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

Для падения вагона-контейнера с моста или насыпи необходимо, чтобы он не только сошел с рельсов, но и перевернулся. Отечественных данных о доле перевернувшихся при сходе вагонов обнаружить не удалось. Поэтому использовались аналогичные данные из статистики Великобритании, где установлено, что до 10 % вагонов перевертывается при сходе с рельсов. В настоящем отчете была консервативно установлена величина 20 %.

Длина насыпей составляет 8.4 % от длины маршрута, поэтому вероятность падения с насыпи равна

$$3.51 * 10^{-5} * 0.2 * 0.084 = 5.89 * 10^{-7}.$$

Длина мостов над водой составляет 0.333 % от длины маршрута, поэтому вероятность падения вагона с моста в воду равна

$$3.51 * 10^{-5} * 0.2 * 3.33 * 10^{-3} = 2.34 * 10^{-8}.$$

Согласно статистике аварий, в Великобритании в среднем 30 % схода вагонов с рельсов ведет к заблокированию соседних путей, а в не более чем 4 % это ведет к столкновению с поездом на этих путях. Тогда вероятность столкновения вагона-контейнера с поездом равна

$$3.51 * 10^{-5} * 0.2 * 0.3 * 0.04 = 8.42 * 10^{-8}.$$

Высота насыпи на маршруте не превышает 7 м, поэтому возможность возникновения аварий с динамическими нагрузками, превышающими проектные пределы в ходе падения ТУК с насыпи здесь не учитывалось.

Скорость движения поездов по мостам над водными преградами ограничена величиной 40 км/час даже для коротких мостов. Это ограничение исключает запроектную аварию с ударом о конструкционные элементы моста.

Анализ статистики показал, что до 50 % аварийных ситуаций возникает на скорости поезда в интервале 51 - 80 км/час, когда при ударе о достаточно жесткую преграду не исключены динамические нагрузки с запроектными параметрами. К таким авариям здесь можно отнести удар о стенки-выемки и столкновения с поездом. Вероятности возникновения этих ситуаций соответственно равны

$$5.89 * 10^{-7} * 0.5 = 2.95 * 10^{-7} \quad \text{и} \quad 2.34 * 10^{-8} * 0.5 = 1.17 * 10^{-8}.$$

Третья ситуация с возможными запроектными параметрами удара представлена падением с моста в воду при наличие жесткого дна водоема. Вероятность этого события составляет $9.32 * 10^{-8}$.

Вероятности возникновения всех трех аварий превышают значения 10^{-9}, т.е. не могут быть отнесены к категории практически невероятных. Поэтому необходим дальнейший анализ этих ситуаций.

Специальных расчетов прочности и герметичности ТУК-10В и ТУК-13 при запроектном динамическом воздействии на них в реальных условиях не проводилось. Поэтому консервативно предполагали, что в ходе запроектной аварии контейнеры теряют герметичность.

При анализе аварий с пожаром было выявлено, что 16,4 % происшествий сопровождается пожаром. При этом 76.4 % пожаров происходит в сельской и ненаселенной местности, 16.4 % в пригородной зоне, а 7.2 % в городской черте.

При расчете вероятности возникновения пожара следует учесть, что авария со сходом с рельсов собственно самого поезда с ОЯТ ведет к пожару только в случае

последующего столкновения с объектом, содержащим горючие материалы, поскольку сам поезд эти материалы в значительных количествах не содержит. К пожару ведет столкновение с другим поездом, тяжелым грузовиком с горючим материалом на переезде, а также сход с рельсов в зоне пожара на параллельном пути. Последний сценарий практически не реализуем, поскольку поезд с ОЯТ относиться к категории литерных поездов. За соблюдением графика его следования осуществляется жесткий централизованный контроль со стороны МПС России, т.е. при наличии какой-либо аварийной ситуации поезд просто не выпускается на соответствующий перегон до ликвидации аварии.

В используемой статистике столкновений на переездах с пожаром не отмечено, поэтому вероятность вовлечения вагона-контейнера в пожар в результате столкновения или схода с рельсов определяется как

$$2.34 * 10^{-8} * 0.164 = 3.84 * 10^{-9}.$$

При этом вероятности аварии с пожаром для городской, пригородной и сельской местности равны соответственно

$$3.84* 10^{-9} * 0.072 = 2.76 * 10^{-10};$$

$$3.84 * 10^{-9} * 0.164 = 6.29 * 10^{-10};$$

$$3.84 * 10^{-9} * 0.764 =2.93 * 10^{-9}.$$

Значения вероятностей малы, но превышают 10^{-9}, т.е. аварии с пожаром не могут быть отнесены к категории практически невероятных, т.е. необходим их дальнейший анализ.

Частота падения самолета оценивается соответствующими компетентными органами как величина, не превышающая 10^{-6} 1/год. Вероятность его падения именно на поезд с ОЯТ определяется многими параметрами, в большинстве своем конфиденциального характера. За очевидностью она не превышает вероятности железнодорожной аварии (~10^{-4} вагон/год). Поэтому вероятность падения самолета $10^{-6} * 10^{-4}$ на вагон-контейнер с ОЯТ можно отнести с категории практически невероятных. К тому же, параметры воздействия на ТУК при падении самолета не превосходят соответствующих параметров для проектной железнодорожной аварии.

Формулировка аварийной перевозки отработавшего ядерного топлива для маршрута с Балаковской АЭС в производственное объединение «Маяк»

При формулировке аварийной перевозки используется следующие формулы ;

$$\dot{D} = \frac{Q}{4\pi R^2} \sum_{i=1}^{m} E_i * n_{\gamma i} * \mu_{en,m}(E_i) * e^{-\mu_i R} * k \qquad (3.1)$$

Где ;

$\dot{D}$ –мощность дозы ($\frac{\text{Зв}}{\text{ч}}$)

Q –активность (Бк)

E_i –максимальная энергия гамма квантов радионуклидов (МэВ) , число которых равно m

μ –линейный коэффицент ослабления фотонного излучения (см^{-1})

R –расстояние между поездом и населенным пунктом (м)

$\mu_{en,m}$ –массовый коэффицент поглощения энергия фотонного излучения ($\text{см}^2/\text{г}$)

$n_{\gamma i}$ –число фотонов на одном распаде

k –коэффицент пересчета , который переводит $\frac{\text{Мэв*см}^2}{\text{г*м}^2}$ в $\frac{\text{дж}}{\text{кг}}$

$$H_p(d) = \dot{D} * t \qquad (3.2)$$

Где ;

$H_p(d)$ –эквивалент индивидуальной дозы (Зв)

t –время очистки пути от аварийных вагонов (ч)

$$E = F * H_p(10) \qquad (3.3)$$

Где ;

E – эффективная доза,

F – коэффициент перехода от операционных к нормируемым величинам при контроле индивидуальной эффективной дозы внешнего облучения.

При равномерном облучении человека любым ионизирующим излучением за исключением нейтронов с энергиями от 1 Эв до 30 кэВ и фотонов с энергиями менее 20 кэВ, значение коэффициента в соотношении (10) следует принимать равным 1.

$$r(E) = P * r_E * E \qquad (3.4)$$

Где ;

P −вероятность возникновения аварии

$r(E)$ −индивидуальный риск

r_E − коэффицент риска облучаемых групп

В расчетах использовались коэффицент пересчета k равен $1{,}6 * 10^{-14}$, вероятность возникновения аварии P равна $4{,}55 * 10^{-9}\ \frac{1}{\text{год}}$, расстояние между поэздом и населенным пунктом R равна 100 м , время очистки равна 48 ч в соответсвии с [4]. Коэффицент риска для населения использовалась таблица 3.1. Значение линейный коэффицент ослабления фотонного излучения μ , массовый коэффицент поглощения энергии фотонного излучения $\mu_{en,m}$, максимальная энергия гамма квантов радионуклидов E_i и число фотонов на одном распаде $n_{\gamma i}$ приведены в таблице 3.2.

Коэффицент риска облучаемых лиц

таблице 3.1

Облучаемая группа	**коэффицент риска злокачественных новообразований ,** 10^{-2} Зв$^{-1}$	**коэффицент риска наследственных эффектов ,** 10^{-2} Зв$^{-1}$	**Сумма ,** 10^{-2} Зв$^{-1}$
все население	5,5	0,2	5,7
взрослые	4,1	0,1	4,2

Максимальная энергия гамма квантов радионуклидов

таблице 3.2

изотоп	**энергия ,МэВ**	μ **,** 10^{-3} см$^{-1}$	$\mu_{en,m}$, см^2/г	**число гамма квантов на 100 распадов %**
Kr-85	0,687	0,0929	0,0293	99,6
Rh-106	3,541	0,0433	0,0196	78,6
Cs-134	0,658	0,0998	0,0295	70,2
Ba-137m	0,662	0,0995	0,0294	90,1
Ce-144	0,319	0,134	0,0287	76,5
Pr-144	2,998	0,0464	0,0206	97,9
Eu-154	1,845	0,0639	0,0247	10
Eu-155	0,252	0,152	0,0278	17,6

В таблице 3.3 приводится следующие значения активности для отдельных радионуклидов при разгермизации упаковок [2] .

таблице 3.3

изотоп	**Активности , Тбк**
Kr-85	10
Rh-106	2,00E-01
Cs-134	7,00E-01
Ba-137m	6,00E-01
Ce-144	2,00E-01
Pr-144	2,00E-01
Eu-154	6,00E-01
Eu-155	3,00E+00

В таблице 3.4 показаны результаты индивидуальных доз, рассчитанных для отдельных нуклидов. При этом при аварийных ситуациях сумма эквивалент дозы отдельных нуклидов составдяет 48 мЗв , что существенно ниже чем 1 Зв. Для расчета индивидуальных доз и индивидуальный риск использована программы “Excel” .

таблице 3.4

изотоп	**эквивалент индивидуальной дозы (Зв), R=100 м**
Kr-85	3,13E-01
Rh-106	6,26E-03
Cs-134	2,19E-02
Ba-137m	1,88E-02
Ce-144	6,26E-03
Pr-144	6,26E-03
Eu-154	1,88E-02
Eu-155	9,40E-02
∑	4,86E-02

В следующих таблицах(3.5,3.6,3.7,3.8,3.9,3.10) показаны результаты индивидуальных доз, рассчитанных для отдельных нуклидов на разных расстояниях.

таблице 3.5

изотоп	**эквиваленти индивидуальной дозы (Зв), R=200 м**
Kr-85	7,78E-02
Rh-106	1,56E-03

Cs-134	5,45E-03
Ba-137m	4,67E-03
Ce-144	1,56E-03
Pr-144	1,56E-03
Eu-154	4,67E-03
Eu-155	2,33E-02
∑	1,21E-01

таблице 3.6

изотоп	**эквиваленти индивидуальной дозы (Зв), R=300 м**
Kr-85	3,44E-02
Rh-106	6,87E-04
Cs-134	2,41E-03
Ba-137m	2,06E-03
Ce-144	6,87E-04
Pr-144	6,87E-04
Eu-154	2,06E-03
Eu-155	1,03E-02
∑	5,33E-02

таблице 3.7

изотоп	**эквиваленти индивидуальной дозы (Зв), R=400 м**
Kr-85	1,92E-02
Rh-106	3,84E-04
Cs-134	1,34E-03
Ba-137m	1,15E-03
Ce-144	3,84E-04
Pr-144	3,84E-04
Eu-154	1,15E-03
Eu-155	5,76E-03
∑	2,98E-02

таблице 3.8

изотоп	**эквиваленти индивидуальной дозы (Зв), R=500 м**
Kr-85	1,22E-02
Rh-106	2,44E-04
Cs-134	8,55E-04
Ba-137m	7,33E-04

Ce-144	2,44E-04
Pr-144	2,44E-04
Eu-154	7,33E-04
Eu-155	3,66E-03
∑	1,89E-02

таблице 3.9

изотоп	**эквиваленти индивидуальной дозы (Зв), R=600 м**
Kr-85	8,43E-03
Rh-106	1,69E-04
Cs-134	5,90E-04
Ba-137m	5,06E-04
Ce-144	1,69E-04
Pr-144	1,69E-04
Eu-154	5,06E-04
Eu-155	2,53E-03
∑	1,31E-02

таблице 3.10

изотоп	**эквиваленти индивидуальной дозы (Зв), R=700 м**
Kr-85	6,15E-03
Rh-106	1,23E-04
Cs-134	4,31E-04
Ba-137m	3,69E-04
Ce-144	1,23E-04
Pr-144	1,23E-04
Eu-154	3,69E-04
Eu-155	1,85E-03
∑	9,53E-03

оценка индивидуального риска злокачественных новообразований для населения

таблице 3.11

расстояние от линии транспортировки , м	**эквивалент индивидуальной дозы , зв**	**индивидуальный риск , 1/год**
100	4,86E-01	1,21E-10
200	1,21E-01	3,02E-11
300	5,33E-02	1,33E-11

400	2,98E-02	7,45E-12
500	1,89E-02	4,74E-12
600	1,31E-02	3,27E-12
700	9,53E-03	2,39E-12

оценка индивидуального риска наследственных эффектов для населения

таблице 3.12

расстояние от линии транспортировки , м	**эквивалент индивидуальной дозы , зв**	**индивидуальный риск , 1/год**
100	4,86E-01	4,42E-12
200	1,21E-01	1,10E-12
300	5,33E-02	4,85E-13
400	2,98E-02	2,71E-13
500	1,89E-02	1,72E-13
600	1,31E-02	1,19E-13
700	9,53E-03	8,68E-14

оценка суммарного индивидуального риска для населения

таблице 3.13

расстояние от линии транспортировки , м	**эквивалент индивидуальной дозы , зв**	**индивидуальный риск , 1/год**
100	4,86E-01	1,26E-10
200	1,21E-01	3,13E-11
300	5,33E-02	1,38E-11
400	2,98E-02	7,72E-12
500	1,89E-02	4,91E-12
600	1,31E-02	3,39E-12
700	9,53E-03	2,47E-12

Суммарный индивидуальный риск для населения при растоянии от аварийных вагонов 100 м равен $1{,}2 * 10^{-10}$ 1/год.

Согласно [4] :

Доза для населения при расстоянии 100 м от аварийных вагонов составдяет 48 мЗв , что существенно ниже чем 1 Зв.

Доза для населения при расстоянии 100 м оказывается меньше 50 мЗв. Уровень облучения ,предотвращаемого защитным мероприятием (**эвакуация**) , не превосходит уровень А,нет необходимости в выполнении мер защиты , связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Доза для населения при расстоянии 100 м оказывается в диапозоне 5-50 мЗв. Предотвращаемое защитным мероприятием(**укрытие**) облучение превосходит уровень А, но не достигает уровня Б, решение о выполнении мер защиты и местных условий.

Доза для населения после расстоянии 200 м оказывается меньше 5 мЗв. Уровень облучения , предотвращемого защитным мероприятием(эвакуация), не превосходит уровень А, нет необходимости в выполнении мер защиты , связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения , а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Индивидуальный риск для населения при расстоянии 100 м равен $1{,}26 * 10^{-10}$ 1/год , что существенно ниже , чем $1 * 10^{-5}$ 1/год.

Гауссовая модель рассеяния примеси в атмосфере

При кратковременном точечном выбросе фактор разбавления

$$G(x,y,z) = \frac{F(x)}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2{\sigma_y}^2}\right]\left\{exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2{\sigma_z}^2}\right] + exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2{\sigma_z}^2}\right]\right\}$$

где ;

x, y, z — эйлеровы координаты точки в пространстве

u — скорость ветра, м/с

t — время, прошедшее после выброса

h — высота облака выброса над землей на расстоянии x от выброса, м

$F(x)$ — функция истощения облака

σ_x , σ_y , σ_z — стандартное отклонение распределения примеси в облаке выброса в направлении соответствующих координатных осей, м . Эти коэффициенты характеризуются монотонно возрастающими функциями расстояния. Их вид и величина зависят от погодных условий.

Поперечная дисперсии σ_y и вертикальная дисперсия σ_z при кратковременных выбросах рассчитывают по следующим формулам ;

$$\sigma_y(x) = \frac{c_3 x}{\sqrt{1+0{,}0001x}}$$

$$\sigma_z(x) = \begin{cases} f(z_0,x).g(x) \text{ при } f(z_0,x).g(x) \le {\sigma_z}^{max}; \\ {\sigma_z}^{max} \quad \text{при } f(z_0,x).g(x) > {\sigma_z}^{max} \end{cases}$$

Где;

${\sigma_z}^{max}$ — предельное значение стандартного отклонения вертикального распределения примеси в облаке выброса, м

z_0 — высота шероховатости подстилающей поверхности, см

x — расстояние от источника выбросов, м

Функции $g(x)$ и $f(z_0,x)$ рассчитывают по формулам ;

$$g(x) = \frac{a_1 x^{b_1}}{1+a_2 x^{b_2}}$$

$$f(z_0, x) = \begin{Bmatrix} In[c_1 x^{d_1}(1 + c_2 x^{d_2}] \text{ при } z_0 > 10 \text{ см ;} \\ In[c_1 x^{d_1}/(1 + c_2 x^{d_2})] \text{ при } z_0 \leq 10 \text{ см} \end{Bmatrix}$$

$$A_{\sum} = \sum_{i=1}^{m} B_{\alpha\gamma i} A_{\gamma i}$$

Где ;

$B_{\alpha\gamma i}$ – дозовой коэффицент внешнего облучения $\gamma -$ квантами i – го радионуклида ОЯТ

$A_{\gamma i} -$ гамма компонента активности $i -$ го радионуклида ОЯТ

В таблице 4.1 приведены значения $\boldsymbol{z_0}$ для поверхности различных типов , в таблице 4.2 значения $\boldsymbol{\sigma_z}^{max}$ верхней границы для различных категорий устойчивости , в таблице 4.3, 4.4, 4.5 остальные параметры для различных устойчивости по Пасквиллу.

Высота шероховатости z_0 для различных типов микрорельефа поверхности

Таблица 4.1

Микрорельеф	$\boldsymbol{z_0}$ **, см**
Снег, газон высотой 1 см	0,1
Скошенная и низкая трава до 15 см	0,6E-2
Высокая трава до 60 см	4-9
Неоднородная поверхность с чередующимися участками травы, кустарниками и т. п.	10-20
Парк, лес высотой до 100 м	20-100
Городские постройки	100

Значения верхней границы $\boldsymbol{\sigma_z}^{max}$ для различных категорий устойчивости

Таблица 4.2

Категория устойчивости по Пасквиллу	$\boldsymbol{\sigma_z}^{max}$ **, м**
A	1600
B	920
C	640
D	400
E	220
F	100

Коэффициенты, используемые для расчета поперечной дисперсии σ_y

Таблица 4.3

Категория устойчивости по Пасквиллу	$\boldsymbol{c_3}$
A	0,22
B	0,16
C	0,11

D	0,08
E	0,06
F	0,04

Коэффициенты в функции $g(x)$, используемой для расчета вертикальной дисперсии струи σ_z

Таблица 4.4

Категория устойчивости по Пасквиллу	a_1	b_1	a_2	b_2
A	0,112	1,06	5,38E-4	0,815
B	0,130	0,950	6,52E-4	0,750
C	0,112	0,920	9,05E-4	0,718
D	0,098	0,889	1,35E-3	0,688
E	0,0609	0,895	1,96E-3	0,684
F	0,0638	0,783	1,36E-3	0,672

Коэффициенты функции $f(z_0, x)$, модифицирующие σ_z для различной высоты шероховатости z_0

Таблица 4.5

высоты шероховатости z_0 , см	c_1	d_1	c_2	d_2
1	1,56	0,0480	6,25E-4	0,45
4	2,02	0,0269	7,76E-4	0,37
10	2,73	0	0	0
40	5,16	-0,098	5,38E-2	0,225
100	7,37	-0,00957	2,33E-4	0,60
400	11,7	-0,128	2,18E-5	0,78

В таблице 4.6 и 4.7 показаны основные радионуклиды гамма квантов,исползуемых при расчете аварийной перевозке [13]

таблица 4.6

Удельная активность основных источников гамма квантов , после кампании А+3 года выдержки(t=3 года)

Изотоп	**Активность , [Бк]**
Kr-85	$4.77 * 10^{14}$
Rh-106	$3.02 * 10^{15}$
Cs-134	$2.73 * 10^{15}$
Ba-137m	$4.15 * 10^{15}$
Ce-144	$3.77 * 10^{15}$
Pr-144	$3.77 * 10^{15}$
Eu-154	$3.86 * 10^{14}$
Eu-155	$2.08 * 10^{14}$

А- Стандартный режим работы реактора с коэффицентом нагрузки 1 на номинальном уровне мощности ; представляет собой облучение 305.9 сут + остановка 48 сут + облучение 305.9 сут + остановка 48 сут + облучение 305.9 сут + выдержка

Дозовые коэффиценты внешнего облучения γ- квантами радионуклидов $B_{a\gamma}$

Изотоп	$B_{a\gamma}$
Kr-85	$1.06 * 10^{-14}$
Rh-106	$1.37 * 10^{-14}$
Cs-134	$1.05 * 10^{-13}$
Ba-137m	$3.82 * 10^{-14}$
Ce-144	$1.3 * 10^{-15}$
Pr-144	$1.96 * 10^{-15}$
Eu-154	$8.26 * 10^{-14}$
Eu-155	$4.82 * 10^{-15}$

$H_p(d) = G(x, y, z)\mathrm{A}_{\Sigma}$

Где ;

$H_p(d)$ – эквивалент индивидуальнвый дозы

$F(x) = F_1(x)F_2(x)F_3(x)$ – Функция истощения облака характеризует уменьшение интегрального содержания примеси за время $\mathrm{t} = \frac{x}{u}$ ее движения до заданного района на расстояние x от места выброса. u – среднегодовая скорость ветра. Составляющие характеризуют истощение облака примеси за счет следующих процессов ;

$F_1(x)$ – функция истощения облака выброса в результате **радиоактивного распада**

$F_2(x)$ – функция истощения облака выброса в результате процессов **сухого оседания**

$F_3(x)$ – функция истощения облака выброса в результате процессов **мокрого оседания** , обусловленного захватом аэрозолей каплями осадков или снежинками

$F(x) = \frac{Q(x)}{Q_0}$;

Где ;

Q_0 – Интегральное содержание примеси в облаке в момент выброса

$Q(x)$ – Интегральное содержание примеси в том же облаке на расстоянии x от точника

$F_1(x) = \exp\left(\frac{-\lambda x}{u}\right) = \exp(-\lambda t)$

Где ;

$\lambda -$ постоянная радиоактивного распада , $с^{-1}$

$t -$ ее движения до заданного района на расстояние x от места выброса

$F_2(x) = exp\left[-\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{v_g}{u}\int_0^x \frac{1}{\sigma_z}\left(\frac{-h^2}{2{\sigma_z}^2}\right)dx\right]$

Где ;

$v_g -$ скорость сухого оседания радионуклидов из атмосферы , м/с (при расчетах принято , что

$v_g = 2\ \frac{см}{с}$ для газообразного йода

$v_g = 0.8\frac{см}{с}$ для остальных нуклидов

$v_g = 0\ \frac{см}{с}$ для инертных радиоактивных газов

$F_3(x) = \exp\left(\frac{-\Lambda x}{u}\right)$

Где ;

$\Lambda -$ постоянная вымывания осадками , $с^{-1}$ выражается формулой ;

$\Lambda = k_r k_0 I$

Где ;

$I -$ интенсивность осадков , мм/ч

$k_r -$ стандартная величина абсолютной вымывающей способности дождя (для всех нуклидов , кроме инертных газов) принимается $k_r = 10^{-5}\frac{ч}{мм.с}$, характерна для дождь интенсивностью $I = 1\frac{мм}{ч}$

$k_0 -$ относительная вымывающая способность осадков других типов $k_0 = 1$ для дождя

Тогда ;

$\Lambda = 10^{-5}\ с^{-1}$ для дождя

Расчеты проводились для кратеовременного выброса , время которого выбирается 2 суток [4] . В расчетах выбрана высота шероховатости подстилающей поверхности 0.1 м . Высота облака выбрана как высота ТУК-137 , которая равна 6.156 м. Для расчета индивидуальных доз для всех категории устойчивости атмосферы была написана программа в “Excel” .

В следующих таблицах показаны результаты функции истощения облака, соотвественно скоростям ветра $u = 1, 5, 10, 15\ \frac{м}{с}$ и при расстоянии 100, 1000, 10000 м между аварийным контейнером и населенным пунктом ;

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы А при z_0 = 10 см

x=100 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	9,85E-01	9,97E-01	9,99E-01	9,99E-01
Rh-106	8,32E-01	9,64E-01	9,82E-01	9,88E-01
Cs-134	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ba-137m	9,97E-01	9,99E-01	1,00E+00	1,00E+00
Ce-144	7,86E-01	9,53E-01	9,76E-01	9,84E-01
Pr-144	7,87E-01	9,53E-01	9,76E-01	9,84E-01
Eu-154	9,82E-01	9,96E-01	9,98E-01	9,99E-01
Eu-155	9,65E-01	9,93E-01	9,96E-01	9,98E-01
∑	7,34E+00	7,86E+00	7,93E+00	7,95E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы А при z_0 = 10 см

x=1000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	8,30E-01	9,63E-01	9,82E-01	9,88E-01
Rh-106	1,53E-01	6,87E-01	8,29E-01	8,83E-01
Cs-134	9,89E-01	9,98E-01	9,99E-01	1,00E+00
Ba-137m	9,30E-01	9,86E-01	9,93E-01	9,96E-01
Ce-144	8,65E-02	6,13E-01	7,83E-01	8,50E-01
Pr-144	8,76E-02	6,14E-01	7,84E-01	8,51E-01
Eu-154	7,98E-01	9,56E-01	9,78E-01	9,86E-01
Eu-155	6,75E-01	9,25E-01	9,62E-01	9,75E-01
∑	4,55E+00	6,74E+00	7,31E+00	7,53E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы А при z_0 = 10 см

x=10000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,55E-01	6,88E-01	8,30E-01	8,83E-01
Rh-106	7,20E-09	2,35E-02	1,53E-01	2,87E-01
Cs-134	8,97E-01	9,78E-01	9,89E-01	9,93E-01
Ba-137m	4,82E-01	8,64E-01	9,30E-01	9,53E-01
Ce-144	2,35E-11	7,48E-03	8,65E-02	1,96E-01
Pr-144	2,67E-11	7,68E-03	8,76E-02	1,97E-01
Eu-154	1,05E-01	6,37E-01	7,98E-01	8,60E-01
Eu-155	1,97E-02	4,56E-01	6,75E-01	7,70E-01
∑	1,66E+00	3,66E+00	4,55E+00	5,14E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы В при z_0 = 10 см

x=100 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	9,93E-01	9,99E-01	9,99E-01	1,00E+00
Rh-106	8,39E-01	9,65E-01	9,83E-01	9,88E-01
Cs-134	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ba-137m	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ce-144	7,92E-01	9,54E-01	9,77E-01	9,85E-01
Pr-144	7,93E-01	9,55E-01	9,77E-01	9,85E-01
Eu-154	9,89E-01	9,98E-01	9,99E-01	9,99E-01
Eu-155	9,73E-01	9,94E-01	9,97E-01	9,98E-01
$\sum$	7,39E+00	7,87E+00	7,93E+00	7,96E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы B при z_0 = 10 см

x=1000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	8,30E-01	9,63E-01	9,82E-01	9,88E-01
Rh-106	1,53E-01	6,87E-01	8,29E-01	8,83E-01
Cs-134	9,89E-01	9,98E-01	9,99E-01	1,00E+00
Ba-137m	9,30E-01	9,86E-01	9,93E-01	9,96E-01
Ce-144	8,65E-02	6,13E-01	7,83E-01	8,50E-01
Pr-144	8,76E-02	6,15E-01	7,84E-01	8,51E-01
Eu-154	7,98E-01	9,56E-01	9,78E-01	9,86E-01
Eu-155	6,75E-01	9,25E-01	9,62E-01	9,75E-01
$\sum$	4,55E+00	6,74E+00	7,31E+00	7,53E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы B при z_0 = 10 см

x=10000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,55E-01	6,88E-01	8,30E-01	8,83E-01
Rh-106	7,20E-09	2,35E-02	1,53E-01	2,87E-01
Cs-134	8,97E-01	9,78E-01	9,89E-01	9,93E-01
Ba-137m	4,82E-01	8,64E-01	9,30E-01	9,53E-01
Ce-144	2,35E-11	7,48E-03	8,65E-02	1,96E-01
Pr-144	2,67E-11	7,68E-03	8,76E-02	1,97E-01
Eu-154	1,05E-01	6,37E-01	7,98E-01	8,60E-01
Eu-155	1,97E-02	4,56E-01	6,75E-01	7,70E-01
$\sum$	1,66E+00	3,66E+00	4,55E+00	5,14E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы C при z_0 = 10 см

x=100 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Rh-106	8,52E-01	9,69E-01	9,84E-01	9,89E-01
Cs-134	1,03E+00	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ba-137m	1,02E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ce-144	8,05E-01	9,58E-01	9,79E-01	9,86E-01
Pr-144	8,06E-01	9,58E-01	9,79E-01	9,86E-01
Eu-154	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Eu-155	9,89E-01	9,98E-01	9,99E-01	9,99E-01
$\sum$	7,51E+00	7,89E+00	7,95E+00	7,96E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы C при z_0 = 10 см

x=1000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	8,30E-01	9,63E-01	9,82E-01	9,88E-01
Rh-106	1,53E-01	6,87E-01	8,29E-01	8,83E-01
Cs-134	9,90E-01	9,98E-01	9,99E-01	1,00E+00
Ba-137m	9,30E-01	9,86E-01	9,93E-01	9,96E-01
Ce-144	8,66E-02	6,13E-01	7,83E-01	8,50E-01
Pr-144	8,77E-02	6,15E-01	7,84E-01	8,51E-01
Eu-154	7,99E-01	9,56E-01	9,78E-01	9,86E-01
Eu-155	6,76E-01	9,25E-01	9,62E-01	9,75E-01
$\sum$	4,55E+00	6,74E+00	7,31E+00	7,53E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы C при z_0 = 10 см

x=10000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,55E-01	6,88E-01	8,30E-01	8,83E-01
Rh-106	7,20E-09	2,35E-02	1,53E-01	2,87E-01
Cs-134	8,97E-01	9,78E-01	9,89E-01	9,93E-01
Ba-137m	4,82E-01	8,64E-01	9,30E-01	9,53E-01
Ce-144	2,35E-11	7,48E-03	8,65E-02	1,96E-01
Pr-144	2,67E-11	7,68E-03	8,76E-02	1,97E-01
Eu-154	1,05E-01	6,37E-01	7,98E-01	8,60E-01
Eu-155	1,97E-02	4,56E-01	6,75E-01	7,70E-01
$\sum$	1,66E+00	3,66E+00	4,55E+00	5,14E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы D при z_0 = 10 см

x=100 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,05E+00	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00
Rh-106	8,85E-01	9,76E-01	9,88E-01	9,92E-01
Cs-134	1,07E+00	1,01E+00	1,01E+00	1,00E+00
Ba-137m	1,06E+00	1,01E+00	1,01E+00	1,00E+00
Ce-144	8,35E-01	9,65E-01	9,82E-01	9,88E-01
Pr-144	8,36E-01	9,65E-01	9,82E-01	9,88E-01
Eu-154	1,04E+00	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00
Eu-155	1,03E+00	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00
$\sum$	7,80E+00	7,95E+00	7,98E+00	7,98E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы D при z_0 = 10 см

x=1000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	8,31E-01	9,64E-01	9,82E-01	9,88E-01
Rh-106	1,54E-01	6,88E-01	8,29E-01	8,83E-01
Cs-134	9,91E-01	9,98E-01	9,99E-01	1,00E+00
Ba-137m	9,31E-01	9,86E-01	9,93E-01	9,96E-01
Ce-144	8,67E-02	6,13E-01	7,83E-01	8,50E-01
Pr-144	8,78E-02	6,15E-01	7,84E-01	8,51E-01
Eu-154	8,00E-01	9,56E-01	9,78E-01	9,86E-01
Eu-155	6,77E-01	9,25E-01	9,62E-01	9,75E-01
$\sum$	4,56E+00	6,74E+00	7,31E+00	7,53E+00

$F(x)$ – Категория устойчивости атмосферы D при z_0 = 10 см

x=10000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,55E-01	6,88E-01	8,30E-01	8,83E-01
Rh-106	7,20E-09	2,35E-02	1,53E-01	2,87E-01
Cs-134	8,97E-01	9,78E-01	9,89E-01	9,93E-01
Ba-137m	4,82E-01	8,64E-01	9,30E-01	9,53E-01
Ce-144	2,35E-11	7,48E-03	8,65E-02	1,96E-01
Pr-144	2,67E-11	7,68E-03	8,76E-02	1,97E-01
Eu-154	1,05E-01	6,37E-01	7,98E-01	8,60E-01
Eu-155	1,97E-02	4,56E-01	6,75E-01	7,70E-01
$\sum$	1,66E+00	3,66E+00	4,55E+00	5,14E+00

$F(x)$ – **Категория устойчивости атмосферы Е при** z_0 **= 10 см**

x=100 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,27E+00	1,05E+00	1,02E+00	1,02E+00
Rh-106	1,07E+00	1,01E+00	1,01E+00	1,00E+00
Cs-134	1,29E+00	1,05E+00	1,03E+00	1,02E+00
Ba-137m	1,29E+00	1,05E+00	1,03E+00	1,02E+00
Ce-144	1,01E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Pr-144	1,02E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Eu-154	1,27E+00	1,05E+00	1,02E+00	1,02E+00
Eu-155	1,25E+00	1,04E+00	1,02E+00	1,01E+00
∑	9,47E+00	8,27E+00	8,13E+00	8,09E+00

$F(x)$ – **Категория устойчивости атмосферы Е при** z_0 **= 10 см**

x=1000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	8,37E-01	9,65E-01	9,82E-01	9,89E-01
Rh-106	1,55E-01	6,88E-01	8,30E-01	8,84E-01
Cs-134	9,98E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ba-137m	9,38E-01	9,87E-01	9,94E-01	9,96E-01
Ce-144	8,73E-02	6,14E-01	7,84E-01	8,50E-01
Pr-144	8,84E-02	6,16E-01	7,85E-01	8,51E-01
Eu-154	8,05E-01	9,58E-01	9,79E-01	9,86E-01
Eu-155	6,81E-01	9,26E-01	9,62E-01	9,75E-01
∑	4,59E+00	6,75E+00	7,31E+00	7,53E+00

$F(x)$ – **Категория устойчивости атмосферы Е при** z_0 **= 10 см**

x=10000 М				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,55E-01	6,89E-01	8,30E-01	8,83E-01
Rh-106	7,21E-09	2,35E-02	1,53E-01	2,87E-01
Cs-134	8,97E-01	9,79E-01	9,89E-01	9,93E-01
Ba-137m	4,83E-01	8,64E-01	9,30E-01	9,53E-01
Ce-144	2,35E-11	7,48E-03	8,65E-02	1,96E-01
Pr-144	2,67E-11	7,68E-03	8,76E-02	1,97E-01
Eu-154	1,05E-01	6,37E-01	7,98E-01	8,60E-01
Eu-155	1,98E-02	4,56E-01	6,75E-01	7,70E-01
∑	1,66E+00	3,66E+00	4,55E+00	5,14E+00

$F(x)$ – **Категория устойчивости атмосферы F при** z_0 **= 10 см**

x=100 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	2,70E+00	1,22E+00	1,10E+00	1,07E+00
Rh-106	2,28E+00	1,18E+00	1,09E+00	1,06E+00
Cs-134	2,74E+00	1,22E+00	1,11E+00	1,07E+00
Ba-137m	2,73E+00	1,22E+00	1,11E+00	1,07E+00
Ce-144	2,15E+00	1,17E+00	1,08E+00	1,05E+00
Pr-144	2,15E+00	1,17E+00	1,08E+00	1,05E+00
Eu-154	2,69E+00	1,22E+00	1,10E+00	1,07E+00
Eu-155	2,64E+00	1,21E+00	1,10E+00	1,07E+00
$\sum$	2,01E+01	9,61E+00	8,77E+00	8,50E+00

$F(x)$ – **Категория устойчивости атмосферы F при** z_0 **= 10 см**

x=1000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	8,83E-01	9,75E-01	9,88E-01	9,92E-01
Rh-106	1,63E-01	6,96E-01	8,34E-01	8,87E-01
Cs-134	1,05E+00	1,01E+00	1,01E+00	1,00E+00
Ba-137m	9,89E-01	9,98E-01	9,99E-01	1,00E+00
Ce-144	9,21E-02	6,21E-01	7,88E-01	8,53E-01
Pr-144	9,32E-02	6,22E-01	7,89E-01	8,54E-01
Eu-154	8,49E-01	9,68E-01	9,84E-01	9,90E-01
Eu-155	7,19E-01	9,36E-01	9,68E-01	9,79E-01
$\sum$	4,84E+00	6,83E+00	7,35E+00	7,56E+00

$F(x)$ – **Категория устойчивости атмосферы F при** z_0 **= 10 см**

x=10000 м				
Изотоп	**u=1 м/с**	**u=5 м/с**	**u=10 м/с**	**u=15 м/с**
Kr-85	1,56E-01	6,90E-01	8,30E-01	8,83E-01
Rh-106	7,26E-09	2,36E-02	1,54E-01	2,87E-01
Cs-134	9,04E-01	9,80E-01	9,90E-01	9,93E-01
Ba-137m	4,86E-01	8,66E-01	9,30E-01	9,53E-01
Ce-144	2,37E-11	7,50E-03	8,66E-02	1,96E-01
Pr-144	2,69E-11	7,69E-03	8,77E-02	1,97E-01
Eu-154	1,06E-01	6,38E-01	7,99E-01	8,61E-01
Eu-155	1,99E-02	4,57E-01	6,76E-01	7,70E-01
$\sum$	1,67E+00	3,67E+00	4,55E+00	5,14E+00

В следующих таблицах показаны результаты расчета эквивалента индивидуальной дозы для разных категорий устойчивости атмосферы с учетом разных скоростей ветра.

Эквивалент индивидуальной дозы Hp(d) всех категорий устойчивости атмосферы с различных скорости ветрах при 100 м от источника , Зв

x=100 м				
Hp(d) ,Зв	**u =1 м/с**	**u =5 м/с**	**u = 10 м/с**	**u = 15 м/с**
A	3,61E+00	7,73E-01	3,90E-01	2,61E-01
B	6,50E+00	1,38E+00	6,97E-01	4,66E-01
C	1,11E+01	2,34E+00	1,18E+00	7,85E-01
D	1,64E+01	3,34E+00	1,68E+00	1,12E+00
E	1,74E+01	3,05E+00	1,50E+00	9,94E-01
F	1,01E+01	9,67E-01	4,41E-01	2,85E-01

Эквивалент индивидуальной дозы Hp(d) всех категорий устойчивости атмосферы с различных скорости ветрах при 1000 м от источника , Зв

x=1000 м				
Hp(d), ,Зв	**u =1 м/с**	**u =5 м/с**	**u = 10 м/с**	**u = 15 м/с**
A	2,51E-02	7,45E-03	4,04E-03	2,77E-03
B	6,17E-02	1,83E-02	9,90E-03	6,80E-03
C	1,29E-01	3,83E-02	2,07E-02	1,42E-02
D	2,56E-01	7,59E-02	4,11E-02	2,82E-02
E	5,50E-01	1,62E-01	8,76E-02	6,01E-02
F	1,54E+00	4,34E-01	2,34E-01	1,60E-01

Эквивалент индивидуальной дозы Hp(d) всех категорий устойчивости атмосферы с различных скорости ветрах при 10000 м от источника , Зв

x=10000 м				
Hp(d), ,Зв	**u =1 м/с**	**u =5 м/с**	**u = 10 м/с**	**u = 15 м/с**
A	1,85E-04	8,18E-05	5,08E-05	3,83E-05
B	5,04E-04	2,23E-04	1,38E-04	1,04E-04
C	1,14E-03	5,03E-04	3,12E-04	2,35E-04
D	2,50E-03	1,11E-03	6,87E-04	5,17E-04
E	5,96E-03	2,63E-03	1,63E-03	1,23E-03
F	1,93E-02	8,47E-03	5,26E-03	3,96E-03

В следующих таблицах проводили оценка суммарного индивидуального риска для населения.При расчете использовалась формула (3.4).

оценка суммарного индивидуального риска для населения при x=100 м

x=100 м				
r(E) , 1/год	**u =1 м/с**	**u =5 м/с**	**u = 10 м/с**	**u = 15 м/с**
A	9,37E-10	2,01E-10	1,01E-10	6,77E-11
B	1,69E-09	3,59E-10	1,81E-10	1,21E-10
C	2,88E-09	6,06E-10	3,05E-10	2,04E-10
D	4,25E-09	8,66E-10	4,34E-10	2,90E-10
E	4,53E-09	7,90E-10	3,89E-10	2,58E-10
F	2,62E-09	2,51E-10	1,14E-10	7,40E-11

оценка суммарного индивидуального риска для населения при x=1000 м

x=1000 m				
r(E) , 1/год	**u =1 м/с**	**u =5 м/с**	**u = 10 м/с**	**u = 15 м/с**
A	6,52E-12	1,93E-12	1,05E-12	7,19E-13
B	1,60E-11	4,74E-12	2,57E-12	1,76E-12
C	3,35E-11	9,93E-12	5,38E-12	3,69E-12
D	6,65E-11	1,97E-11	1,07E-11	7,32E-12
E	1,43E-10	4,20E-11	2,27E-11	1,56E-11
F	3,99E-10	1,13E-10	6,06E-11	4,15E-11

оценка суммарного индивидуального риска для населения при x=10000 м

x=10000 m				
r(E) , 1/год	**u =1 м/с**	**u =5 м/с**	**u = 10 м/с**	**u = 15 м/с**
A	4,80E-14	2,12E-14	1,32E-14	9,93E-15
B	1,31E-13	5,78E-14	3,59E-14	2,70E-14
C	2,95E-13	1,30E-13	8,10E-14	6,10E-14
D	6,49E-13	2,87E-13	1,78E-13	1,34E-13
E	1,55E-12	6,83E-13	4,24E-13	3,19E-13
F	5,01E-12	2,20E-12	1,36E-12	1,03E-12

Анализ результатов показывает , что при полном выброс после аварии u =1 м/с для категорий устойчивости A,B,C,D,E и F , при u =15 м/с для категорий устойчивости D для расстояния x=100 м , а также при u =1 м/с для категорий устойчивости F для расстояния x=1000 м превышают 1 Зв для тела , необходимо срочное вмещательство.

При кратковременном выбросе эквивалент индивидуальной дозы при расстоянии **100 м**;

Самая большая доза для случая категории устойчивости атмосферы **E**.

Самая низкая доза наблюдается для случая категории устойчивости атмосферы **A**.

При расстоянии **1000** и **10000 м** ;

Самая большая доза для случая категории устойчивости атмосферы **F**

Самая низкая доза наблюдается для случая категории устойчивости атмосферы **A**.

Самая низкая доза наблюдается при скорости ветра **15 м/с** при расстоянии **100 м** для случая категории устойчивости атмосферы **A**,которая равна $\mathbf{2,61 * 10^{-1}}$ Зв .
Самая низкая доза наблюдается при скорости ветра **15 м/с** при расстоянии **1000 м** для случая категории устойчивости атмосферы **A**, которая равна $\mathbf{2,77 * 10^{-3}}$ Зв .
Самая низкая доза наблюдается при скорости ветра **15 м/с** при расстоянии **10000 м** для случая категории устойчивости атмосферы **A**, которая равна $\mathbf{3,83 * 10^{-5}}$ Зв .

Самая болшая доза наблюдается при скорости ветра **1 м/с** при расстоянии **100 м** для случая категории устойчивости атмосферы **E** , которая равна $\mathbf{1,74 * 10^{1}}$ Зв .
Самая болшая доза наблюдается при скорости ветра **1 м/с** при расстоянии **1000 м** для случая категории устойчивости атмосферы **F** , которая равна $\mathbf{1,54}$ Зв .
Самая болшая доза наблюдается при скорости ветра **1 м/с** при расстоянии **10000 м** для случая категории устойчивости атмосферы **F** , которая равна $\mathbf{1,93 * 10^{-2}}$ Зв .

Максималбное значение индивидуального риска для населения при расстоянии **100 м** при скорости **1 м/с** наблюдается для случая категории устойчивости атмосферы **E** , которая равно $\mathbf{4,53 * 10^{-9}}$ $\mathbf{1}$/год , что существенно ниже , чем $\mathbf{10^{-5}}$ $\mathbf{1}$/год.

Заключение

Представлены результаты оценки риска безаварийной и аварийной перевозки ОЯТ железнодорожным транспортом.

Рассчитанные величины индивидуальной дозы при безаварийной перевозке существенно ниже пределов дозы (НРБ-99/2009) для населения.

Риск аварии при перевозках ОЯТ крайне мал.

В случае реализации аварии при перевозке ОЯТ могут потребоваться меры защиты населения.

Список использованной литературы

1. Нормы Радиационной Безопасности (НРБ-99/2009) / И. К. Романович [и др.]. – М. : СанПиН , 2009. – №47. – 225 с.
2. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НП-053-04 / А. М. Агапова [и др.]. // Федеральная Служба по Экологическому, Технологическому и Атомному Надзору. – 2004. – №5. – 53 с.
3. МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ ПЕРЕВОЗКИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ / МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ. – Вена, 2009. – 176 с.
4. 4. Нормы Радиационной Безопасности(НРБ-99/2009) / И. К. Романович [и др.]. – М. : СанПиН , 2009. – №47. – 225 с.
5. Транспортный упаковочный комплект ТУК-137 для безопасного транспортирования ОТВС реакторов ВВЭР-1000/1200 с увеличенной массой и глубиной выгорания ядерного топлива / Блохина Е. В. [и др.]. – М. : ФГУП. – 7 с.
6. Публикация 103 МКРЗ// /К. В. Котенко // Рекомендации Международной Комиссии по Радиационной Защите. – 2009. – 343 с.
7. МУ 2.6.5.028-2016 Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования/ В. Н. Клочков [и др.]. – М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России , 2016.
8. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений СНиП 2.07.01-89*2002 / П. Н. Давиденко [и др.]. // СТРОИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА. – 1990. – 120 с.
9. МУ 2.6.5.028-2016 Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования/ В. Н. Клочков [и др.]. – М. : ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России , 2016.