

*На правах рукописи*



**Бызов Антон Прокопьевич**

**МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ  
ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННОГО РИСКА ПРИ ВЗРЫВАХ И ПОЖАРАХ  
НА ОБЪЕКТАХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных  
ситуациях (энергетика)

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Безопасность жизнедеятельности»

Научный руководитель

– канд. техн. наук, доцент

*Ефремов Сергей Владимирович*

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, профессор

*Яковлев Вячеслав Владимирович*

– канд. техн. наук, доцент

*Степанов Илья Владимирович*

Ведущая организация – *ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий».*

Защита диссертации состоится «07» февраля 2012 г. в 18-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «29» декабря 2011 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 545-42-84

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*К.А. Григорьев*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Последние десятилетия развитие вопросов обеспечения безопасного ведения производства получает существенную поддержку со стороны не только представителей власти, но и хозяйствующих субъектов. Для формирования целостной картины состояния безопасности на опасных объектах наиболее эффективными являются методы, основанные на анализе риска.

В России с 90-х годов XX века активизировалась деятельность по формированию нормативно-методической базы в этой области. На законодательном уровне в Федеральных законах «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте» установлена необходимость обоснования уровня безопасности опасных объектов с позиции риск-анализа.

Проведенный анализ показал, что одним из перспективных подходов к оценке техногенных рисков является подход, основанный на моделировании полей потенциального риска. Однако, существующий в настоящее время методический аппарат, основанный на этом подходе, не учитывает динамику развития чрезвычайной ситуации и реакцию рабочего персонала в условиях сложных объектов топливно-энергетического комплекса.

Оценка техногенного риска проводится на различных этапах жизненного цикла опасного объекта и фиксируется в таких документах как декларация промышленной безопасности, паспорт безопасности, декларация пожарной безопасности, независимая оценка рисков. Исполнение этих документов контролируется различными ведомствами: Главгосэкспертизой, МЧС России, Ростехнадзором. Отсутствие единого методического аппарата приводит к возникновению различия в оценке идентичных показателей в перечисленных документах.

Наиболее реальная и достоверная оценка риска на объектах топливно-энергетического комплекса может быть получена только путем совместного учета пространственных особенностей объекта, динамики развития чрезвычайной ситуации и поведенческой реакции обслуживающего персонала.

Приведенные выше аргументы свидетельствуют о том, что диссертационная работа, посвященная развитию методического аппарата оценки техногенного риска на объектах топливно-энергетического комплекса, является актуальной.

**Целью** диссертационной работы является развитие методического аппарата оценки техногенного риска в направлении учета особенностей объектов топливно-энергетического комплекса, динамики развития чрезвычайной ситуации и поведенческой реакции персонала.

**Основными задачами** исследования являются:

- анализ теории рисков как инструмента оценки техногенной опасности на объектах топливно-энергетического комплекса;
- развитие методического аппарата оценки техногенного риска на объектах топливно-энергетического комплекса;
- разработка комплекта алгоритмов для реализации предлагаемых методов в виде программных модулей;
- апробация предлагаемого методического аппарата на примере оценки техногенного риска на типовых площадочных объектах топливно-энергетического комплекса.

**Объект исследования:** Техногенный риск на объектах топливно-энергетического комплекса.

**Предмет:** Методический аппарат оценки техногенного риска на объектах топливно-энергетического комплекса.

**Методы исследования.** При решении поставленных в работе задач использовались: теория системного подхода, методы формальной логики, теория вероятностей, методы аппроксимации, графоаналитический метод математического моделирования показателей риска.

**Научная новизна работы.** В диссертационной работе на основе изучения закономерностей проявления и развития чрезвычайных ситуаций техногенного характера на объектах топливно-энергетического комплекса усовершенствован методический аппарат оценки техногенного риска, применение которого позволяет:

- учитывать влияние уменьшения интенсивности теплового излучения в зависимости от перемещения человека при пожарах проливов и горении высокоскоростных газовых струй;
- моделировать поля потенциального риска для аварий, связанных с взрывом дрейфующих парогазовых облаков;
- моделировать поля потенциального риска для линейных объектов;
- рассчитывать индивидуальный риск с учетом нестационарности рабочих мест.

### **Научные результаты, выносимые на защиту:**

- усовершенствованный метод оценки вероятности поражения людей тепловым излучением с учетом уменьшения интенсивности теплового излучения в процессе перемещения человека в безопасную зону;
- методика построения полей потенциального риска для линейных источников опасности;
- методика построения полей потенциального риска с учетом дрейфа облаков топливовоздушной смеси;
- подход к оценке интегральных показателей риска с учетом нестационарности рабочих мест.

**Личный вклад** автора заключается в постановке цели и задач исследований, разработке новых и усовершенствовании имеющихся математических моделей методического аппарата оценки техногенного риска, алгоритмизации разработанных математических моделей и апробации их работоспособности при оценке риска на типовых объектах топливно-энергетического комплекса.

**Практическая значимость** диссертационной работы состоит в том, что ее результаты позволяют:

- осуществлять оценку риска на объектах топливно-энергетического комплекса;
- учитывать совместное влияние потенциальной опасности линейных и точечных объектов при проведении анализа техногенного риска;
- обеспечить снижение риска гибели персонала объекта за счет учета в архитектурно-планировочных решениях полей потенциального риска.

Практическое применение предлагаемого методического аппарата показало, что он является корректным, удобным и эффективным инструментом оценки техногенных рисков на объектах топливно-энергетического комплекса.

**Реализация результатов работы.** На основе результатов диссертационного исследования разработан комплект программных модулей с использованием инструментария математических и прикладных программ Mathcad, Microsoft Excell (OpenOffice), применение которых позволяет проводить оценку риска.

Результаты работы были использованы при проведении расчетов риска в рамках декларирования и паспортизации опасных объектов, а также проведении расчета пожарного риска для деклараций пожарной безопасности в ряде проектных организаций (ООО «ТЭК», ООО «Промтехдиагностика»). Результаты исследований внедрены при разработке документации в области промыш-

ленной безопасности на объектах ООО «Киришиавтосервис», филиала «Сургутская ГРЭС-2» ОАО «Э.ОН Россия».

Результаты работы были использованы при разработке учебно-методических материалов для дисциплин: опасные технологии и производства и декларирование опасных производств.

Реализация результатов работы подтверждена актами внедрения.

**Достоверность и обоснованность** положений и выводов обеспечивается корректностью постановки задач, использованием апробированных методов исследований, адекватностью используемого математического аппарата и подтверждена многочисленными расчетами с применением современных методов программирования, результаты которых не противоречат данным литературных источников.

#### **Апробация работы.**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: семинар «Проблемы риска в техногенной и социальной сферах», Санкт-Петербург (2007), XXXVII Неделя науки СПбГПУ, Санкт-Петербург (2008), конференция, посвященная 70-летию кафедры БЖД СПбГПУ (2008), XXXVIII Неделя науки СПбГПУ, Санкт-Петербург (2009), научно-практический семинар «Актуальные проблемы в области охраны труда и промышленной безопасности в строительстве», Санкт-Петербург (2010), XV Всероссийская научно-методическая конференция «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», Санкт-Петербург (2011), XIV Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности», секция Ленинградского областного регионального отделения Общероссийской общественной организации «Российское научное общество анализа риска», Санкт-Петербург (2011).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ, три из них в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа включает 154 страницы текста, 64 рисунка, 26 таблиц, список литературы из 115 наименований и 2 приложения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, определены

объект и предмет исследования, а также обоснована практическая значимость результатов работы.

В **первой главе** проведен анализ основных положений теории рисков с использованием:

- ретроспективного обзора развития теории рисков;
- субъектно-объектного подхода к исследованию процессов взаимодействия структурных элементов в теории риска;
- классификации рисков по различным признакам.

Теория рисков рассмотрена с позиции инструмента анализа техногенной опасности, основанного на построении прогностических моделей будущих негативных явлений с учетом вероятности их реализации и оценке интегральных показателей с последующим сравнением с приемлемыми уровнями.

Проведенный анализ показал, что теория рисков является удобным и работоспособным инструментом, позволяющим проводить анализ техногенной опасности, строить прогностические модели возможных негативных явлений и разрабатывать мероприятия, направленные на повышение уровня безопасности.

В работах Акимова В.А., Белова П.Г., Быкова А. А., Елохина Н.А., Козлтина А.М., Котляревского В.А., Лисанова М.В., Маршалла В., Мاستрюкова Б.С., Махутова Н.А., Меньшикова В.В., Одишария Г.Э., Сафонова В.С., Хусниярова М.Х., Швыряева А.А., Шебеко Ю.Н., Яковлева В.В. и других исследователей обоснованы методы оценки техногенного риска на опасных объектах.

Последние десятилетия исследования по совершенствованию методологии анализа риска были направлены на конкретизацию математических моделей путем учета разнообразных факторов, влияющих на результаты расчета риска, которые ранее принимались в упрощенном виде в качестве допущений моделей, а также разработку новых математических моделей. В числе таких допущений выступают: поведение человека в условиях опасности, особенности режима работы персонала, распределение людей на площадке, эффект экранирования термического излучения объектами и т.д.

Проведен анализ структуры принятой методологии анализа риска и определено место проведенного исследования в общей системе. Показано, что для таких этапов оценки риска как оценка частот возникновения аварий, определение количества, продолжительности и особенностей выбросов в атмосферу опасных веществ, расчет полей поражающих параметров, определение количества пострадавших, оценка ущерба накоплена достаточная методическая база, позволяющая решать поставленные задачи.

Расчет таких показателей как потенциальный, индивидуальный, коллективный риски не имеет достаточной методической базы. Для расчета указанных показателей в практике применяются два подхода:

1. Методика определения расчетных величин пожарного риска.
2. Используемый в практике подход, основанный на расчете коллективного риска как математического ожидания количества погибших людей.

Схемы проводимых расчетов приведены на рисунках 1 и 2.

Результаты анализа двух изложенных подходов и пути улучшения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты анализа двух предложенных подходов и пути улучшения комплекса методик

Подход 1	Подход 2	Направления улучшения
При определении вероятности поражения человека тепловым излучением предполагается одинаковый уровень теплового излучения при перемещении человека из исходной позиции в безопасную зону.		Требуется совершенствование метода оценки вероятности поражения с учетом перемещения человека в безопасную зону.
При построении полей потенциального риска не учитывается вклад от линейных источников опасности.		Требуется разработка методики построения полей потенциального риска для линейных объектов.
Не учитывается перенос облака ТВС под воздействием ветра.	При оценке количества погибших проводится оценка количества погибших для случая взрыва в точке выброса и случая переноса облака на фиксированное расстояние.	Необходимо разработать методику построения полей потенциального риска для аварий и ЧС, связанных с дрейфом облака ТВС.
Показатели индивидуального риска связаны с результатами расчета потенциального риска, но для ограниченного числа областей, что ведет к чрезмерному завышению результатов расчетов	Показатели потенциального и индивидуального риска не связаны. Индивидуальный риск оценивается как осредненный показатель для всего персонала объекта, без разбиения на группы.	Необходимо разработать методику, позволяющую осуществлять оценку индивидуального риска на основе полей потенциального риска с учетом вероятности пребывания человека на территории объекта.

Проведенный анализ показал необходимость совершенствования существующих подходов к оценке техногенного риска в части расчета показателей потенциального, индивидуального и коллективного рисков. Структура предлагаемого методического подхода к оценке техногенного риска в части расчета показателей потенциального, индивидуального и коллективного рисков будет иметь вид, представленный на рисунке 3.



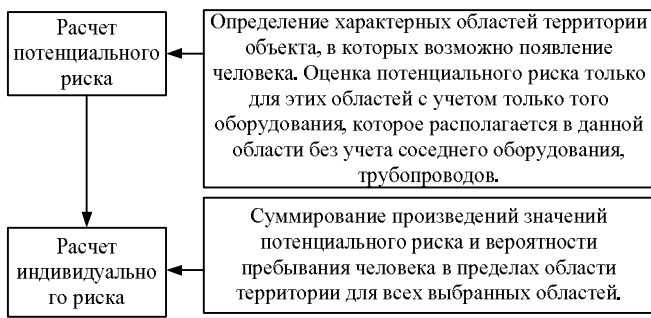


Рисунок 1 – Структура проводимых расчетов с использованием первого подхода



Рисунок 2 – Структура проводимых расчетов с использованием второго подхода

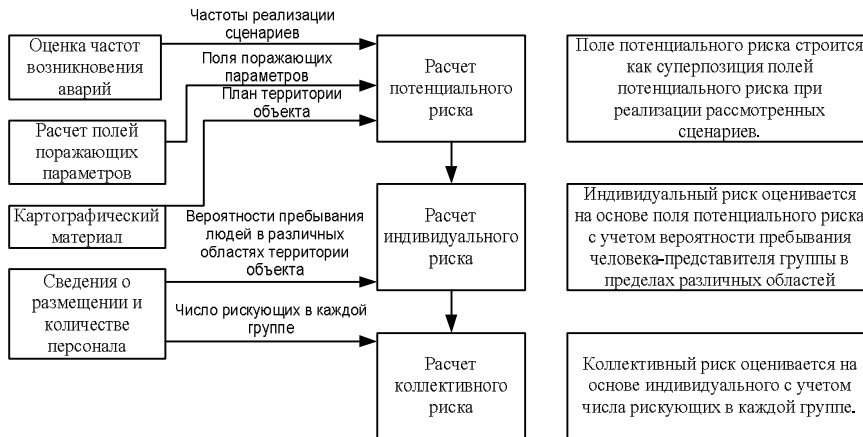


Рисунок 3 – Структура предлагаемого методического подхода

Изложенный порядок расчета показателей риска позволяет производить оценку интегральных показателей техногенного риска с учетом предложенных улучшений.

Проведенный

анализ показал, что существует множество моделей и методик оценки техногенного риска или их комбинаций. Формирование комплекса методик осуществляется исходя из видов опасностей, которые могут реализоваться на данном опасном объекте.

Во второй главе на основе выявленных недостатков существующих подходов к оценке техногенного риска разработаны методики, позволяющие учитывать соответствующие факторы.

На основе выбора методов моделирования поражающих параметров осуществлено уточнение существующего метода расчета вероятностей поражения людей тепловым излучением. Получены аналитические зависимости, позволяющие учесть уменьшение теплового излучения при перемещении человека в безопасную зону для различных точечных и линейных источников опасности.

Существующий подход полагал, что интенсивность теплового излучения принимается постоянной и равной уровню, который достигается в начальной точке.

Идея необходимости оценки уменьшения интенсивности теплового излучения по мере движения человека при оценке вероятности поражения принадлежит Яковлеву В.В. В соответствии с предложенной моделью оцениваются

вероятности поражения человека (ожоги 1-ой, 2-ой и 3-ей степени) с использованием показателя дозы накопленного тепла телом человека и инструментария вычисления параметров нормального закона распределения накопленной тепловой энергии человеком.

Предложенный метод разработан на основе подхода основанного на пробит-анализе. В качестве показателя характеризующего дозу полученного теплового излучения принято выражение, входящее в логарифм в пробит-функции в классической постановке задачи.

Выражения для определения вероятности поражения человека при горении круглой плоской лужи, полученные с использованием подхода, основанного на теории пробит-анализа имеют вид:

$$X(r) = t_{\text{реак}} \cdot q(r)^{\frac{4}{3}} + \int_r^{r_{\text{без}}} q(r')^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{1}{V} dr', \quad (1)$$

$$Pr(r) = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(X(r)), \quad (2)$$

где  $Pr(r)$  – составляющая верхнего предела интегрирования интеграла Гаусса, принятого в пробит-анализе;  $r_{\text{без}}$  – расстояние от центра пролива, соответствующее интенсивности теплового излучения меньше  $4 \text{ кВт/м}^2$ ;  $r$  – текущее месторасположение человека, м;  $q(r)$  – зависимость интенсивности теплового излучения от расстояния от геометрического центра пролива до точки наблюдения (определяется по существующим методикам)  $\text{кВт/м}^2$ ;  $t_{\text{реак}}$  – время, затрачиваемое человеком на принятие решения о перемещении в безопасную зону;  $V$  – скорость движения человека в безопасную зону, м/с.

Основываясь на полученных результатах для одномерного случая пожара пролива круглой плоской лужи, результаты были обобщены для более сложных случаев источников теплового излучения, имеющих нетривиальные геометрические характеристики, такие как факельное горение струи пламени на точечном источнике опасности с учетом вероятности реализации горизонтально и вертикально ориентированного факела, а также на линейные объекты с учетом возможности появления двух разнонаправленных факелов.

Предложен комплексный подход к построению полей потенциального риска, учитывающий различные подходы к определению вероятности поражения людей, располагающихся в зданиях и на открытой площадке.

Для оценки потенциального риска территория делится на конечное число зон, в пределах которых потенциальный риск принимается постоянным. Для зонирования территории применен метод наложения сетки (см. рисунок 4). Определяется область оценки риска  $(x_{\text{min}}, x_{\text{max}}, y_{\text{min}}, y_{\text{max}})$ , точность проведения

расчетов  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – шаг расчетов и рассчитывается некоторое множество значений потенциального риска  $R_{n.m.ij}$  для координатного поля  $(x_i, y_j)$ .

Некоторые виды поражения, такие как термическое поражение человека от пожара разлива, факельного горения струи, пожара вспышки с источниками опасности на открытой площадке не имеет прямого воздействия на людей, расположенных внутри зданий, т.о. в точках расположения зданий на территории потенциальный территориальный риск стремится к нулю.

Для воздушной ударной волны взрыва топливовоздушной смеси (ТВС) структура пораженных характеризуется степенью разрушения зданий, т.о. расчет условной вероятности поражения должен проводиться по зависимостям, отражающим вероятность поражения человека в зависимости от степени разрушения здания.

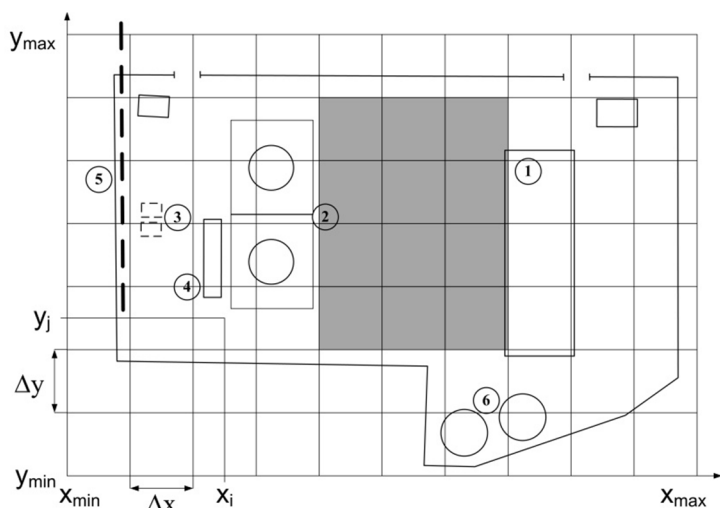


Рисунок 4 – Наложение расчетной сетки на объект и графическое отражение способа определения областей, в пределах которых возможно появление персонала (1 – административно-бытовой корпус, 2 – резервуарный парк, 3 – емкости аварийного слива, 4 – насосная, 5 – ж/д эстакада, 6 – емкости противопожарного запаса воды)

Предложена методика расчета индивидуального риска, учитывающая нестационарность рабочих мест персонала. Методика предусматривает моделирование поля распределения вероятности пребывания персонала в различных зонах территории объекта на основе сведений о режиме работы персонала с учетом:

1. Времени пребывания работника в различных точках территории в течение рабочего дня.
2. Характера рабочего места (стационарное рабочее место, нестационарное).
3. Особенности режима работы (пятидневная рабочая неделя, работа посменно, отпуск и т.д.).

Три варианта пребывания персонала на рабочих местах и способы моделирования плотности распределения вероятности пребывания персонала:

1. Стационарные рабочие места. Как правило, стационарные рабочие места располагаются в зданиях, т.о. моделирование плотности распределения вероятности пребывания персонала не требуется. Для осреднения достаточно

соотнести полученную вероятность пребывания персонала центру здания, в котором расположено рабочее место.

2. Нестационарные рабочие места. Определяется область, в которой возможно пребывания персонала. Полагается равномерность распределения времени пребывания персонала в различных точках пространства внутри этой области (см. рисунок 4 – квадраты, выделенные серым цветом). Если имеется достаточно исходных данных, территория может быть разбита на области, в которых определено среднее время пребывания персонала в течение дня, и данный расчет может быть осуществлен отдельно по каждой области.
3. Комбинированные рабочие места. Рабочие места только 1 или 2 типа встречаются достаточно редко, имеют место комбинированные варианты. В данном случае условная вероятность поражения делится пропорционально времени пребывания персонала на стационарных и нестационарных рабочих местах.

Вероятность пребывания человека – представителя группы  $m$  в пределах каждого квадрата (квадраты, выделенные серым цветом на рисунке 4) составляет:

$$F_{ijm} = \frac{q_m}{N_m}, \quad (3)$$

где  $q_m$  – вероятность пребывания персонала группы  $m$  в пределах выбранной области;  $N_m$  – количество площадок территории объекта, в пределах которых наиболее вероятно появление персонала группы  $m$ .

Вероятность пребывания работника на территории объекта в течение года при работе по фиксированному графику составляет:

$$q_m = \frac{n_{мд}}{24} \cdot \frac{n_{мг}}{365}, \quad (4)$$

где  $n_{мд}/24$  – поправка, характеризующая вероятность пребывания человека на территории в течение дня, при  $n_{мд}$  часовом рабочем дне;  $n_{мг}/365$  – поправка, характеризующая вероятность нахождения сотрудника на территории объекта в течении года с учетом ежегодного отпуска,  $n_{мг}$  – число рабочих дней в течение года.

Для реального объекта сетка разбиения может быть выбрана произвольно, при этом  $\Delta$  будет составлять около 1 метра. Для площадки размером 400x400 метров с учетом шага 1 метр и при рассмотрении 50 сценариев опасных событий суммарное количество расчетов потенциального территориально-

го риска составляет 8 000 000 итераций. Выполнение подобного количества расчетов без применения компьютерных технологий невозможно.

При применении разработанного подхода расчет индивидуального риска осуществляется по формуле (5), при этом в качестве зон используется всё множество площадок, полученных в результате разбиения территории путем наложения сетки:

$$R_{им} = \sum_i \sum_j R_{п.т.ij} \cdot F_{ijm}, \quad (5)$$

$R_{п.т.ij}$  – расчетная величина потенциального риска, соответствующая центру площадки  $ij$ ;  $F_{ijm}$  – вероятность пребывания персонала группы  $m$  в пределах площадки  $ij$ .

Еще одной интегральной мерой опасности объекта для людей является коллективный риск, определяющий ожидаемое количество пострадавших в результате аварий на объекте за определенный период времени.

Коллективный риск определяется на основе индивидуального риска с учетом числа рискующих:

$$R_{кол} = \sum_m R_{им} \cdot N_m, \quad (6)$$

где  $R_{им}$  – индивидуальный риск персонала группы  $m$ ;  $N_m$  - число рискующих  $m$ -ой группы людей.

Разработана методика построения полей потенциального риска для аварий с образованием топливовоздушных смесей в открытом пространстве, сопровождающихся взрывами и сгоранием облака по модели «пожар-вспышка» с учетом их дрейфа.

Величина потенциального риска в точке с полярными координатами  $(r, \varphi)$  при учете дрейфа облака будет иметь вид:

$$R_{п.т.}(r, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_0^{1405} P_{взр} \cdot P_{пор}(r, \varphi, L, \alpha) \cdot \rho_{вет}(\alpha) \cdot \rho_{во}(L) dL d\alpha, \quad (7)$$

где  $P_{взр}$  – вероятность реализации сценария, связанного с образованием облака и его последующим взрывом;  $P_{пор}(r, \varphi, L, \alpha)$  – вероятность поражения человека в точке с полярными координатами  $(r, \varphi)$  при воспламенении смеси на расстоянии  $L$  от источника выброса и реализации ветра направления  $\alpha$ ;  $\rho_{вет}(\alpha)$  – плотность распределения вероятности повторяемости направлений ветра в зависимости от направления, получается с использованием линейной аппроксимации обобщен-

ных данных по розе ветров, характерной для данной географической зоны (8);  $\rho_{во}(L)$  – плотность распределения вероятности воспламенения облака на пути миграции в зависимости от расстояния от источника выброса облака ТВС.

$$\rho_{вет}(\alpha) = \begin{cases} \rho_i + \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i} (\alpha - \alpha_i) \text{ при } \alpha_i \leq \alpha < \alpha_{i+1} \text{ для } i = 1..n - 1; \\ \rho_n + \frac{\rho_1 - \rho_n}{2\pi - \alpha_n} (\alpha - \alpha_n) \text{ при } \alpha_n \leq \alpha < 2\pi, \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_{во}(L) = \begin{cases} 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ при } 0 \leq L \leq 30; \\ \frac{0,2}{L} \text{ при } 30 < L < 1200; \\ 1,667 \cdot 10^{-4} \text{ при } 1200 \leq L \leq 1405; \\ 0 \text{ при } L > 1405. \end{cases} \quad (9)$$

Полученные аппроксимации плотности распределения вероятности повторяемости направления ветра и плотности распределения условной вероятности воспламенения облака на пути миграции корректно описывают процессы миграции облака и не противоречат теореме о полной группе событий.

Разработана методика построения полей потенциального риска для линейных объектов малой протяженности.

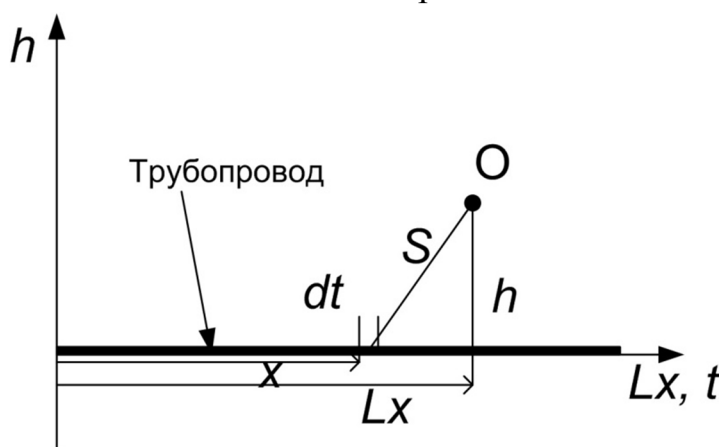


Рисунок 5 – Схема трубопровода

Риск в точке O (см. рисунок 5) определяется суммой мультипликаций вероятностей реализации опасных явлений на участке  $dt$  и условных вероятностей поражения человека при реализации опасностей на участке  $dt$ . Вероятность возникновения аварии на участке трубопровода в общем случае будет являться плотностью распределения вероятностей  $P_0(t)$ . Как правило, вероятность реализации опасных явлений на выбранном участке трубопровода является постоянной.

Риск в точке O определяется выражением:

$$R(L_x, h) = \int_0^{L_x} P_0(t) \cdot P\left(\sqrt{h^2 + (L_x - t)^2}\right) dt, \quad (10)$$

где  $L$  – длина участка трубопровода;  $P_0(t)$  – плотность распределения вероятности реализации опасных событий в точке  $t$ ;  $P(f(Lx, h, t)) = P(\sqrt{h^2 + (Lx - t)^2})$  – одномерная функция зависимости вероятности поражения человека от расстояния от источника опасности до места наблюдения, рассчитанная по существующим методам.

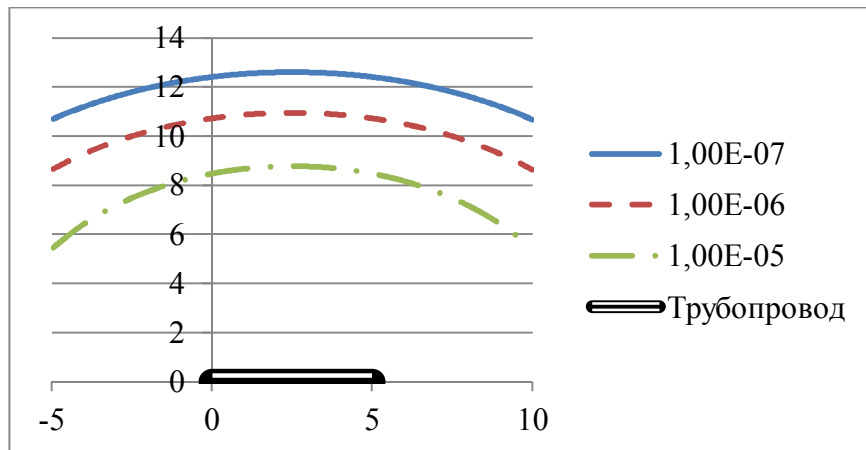


Рисунок 6 – Вид изолиний потенциального риска

На рисунке 6 приведены изолинии потенциального риска для участка трубопровода, имеющего небольшую длину. На рисунке отчетливо видна степень влияния краевых эффектов на картину потенциально-

го риска для непротяженного участка трубопровода.

Предложенная математическая модель позволяет учитывать краевые эффекты и строить поля потенциального риска для произвольно ориентированных трубопроводов, имеющих сложную разветвленную структуру и оценивать вклад в суммарный потенциальный территориальный риск для площадочных объектов, которые имеют в своем составе не только точечные, но и линейные объекты.

Для построения полей потенциального территориального риска для площадочных объектов, включающих как точечные, так и линейные объекты опасности необходимо перейти от фиксированной системы отсчета  $(Lx, h)$  к произвольной системе отсчета  $(x, y)$ . Трубопровод длиной  $L$  будет иметь координаты начала –  $(x_1, y_1)$  и конца –  $(x_2, y_2)$ . Выражения (11) действительны при расположении всего участка трубопровода внутри первого квадранта координатной сетки, а также выбора начальной и конечной точки трубопровода исходя из условия  $x_1 < x_2$ .

$$\alpha = \arctg \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1},$$

$$\beta = \arctg \frac{y_1}{x_1}, \tag{11}$$

$$\Delta Lx = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \cos(\beta - \alpha),$$

$$\Delta h = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot \sin(\beta - \alpha),$$

$$Lx(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos\left(\arctg \frac{y}{x} - \alpha\right) - \Delta Lx,$$

$$h(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sin\left(\arctg \frac{y}{x} - \alpha\right) - \Delta h,$$

при  $x_1, x_2, y_1, y_2 > 0, x_1 < x_2$ .

Потенциальный территориальный риск в точке O от аварий на линейном объекте:

$$R(x, y) = \int_0^L P_0(t) \cdot P\left(\sqrt{h^2(x, y) + (Lx(x, y) - t)^2}\right) dt. \quad (12)$$

Таким образом, поле потенциального риска на площадочном объекте будет формироваться как суперпозиция полей потенциального риска от точечных и линейных объектов:

$$R_{п.т.}(x, y) = R_{п.т.точ}(x, y) + R_{п.т.лин}(x, y). \quad (13)$$

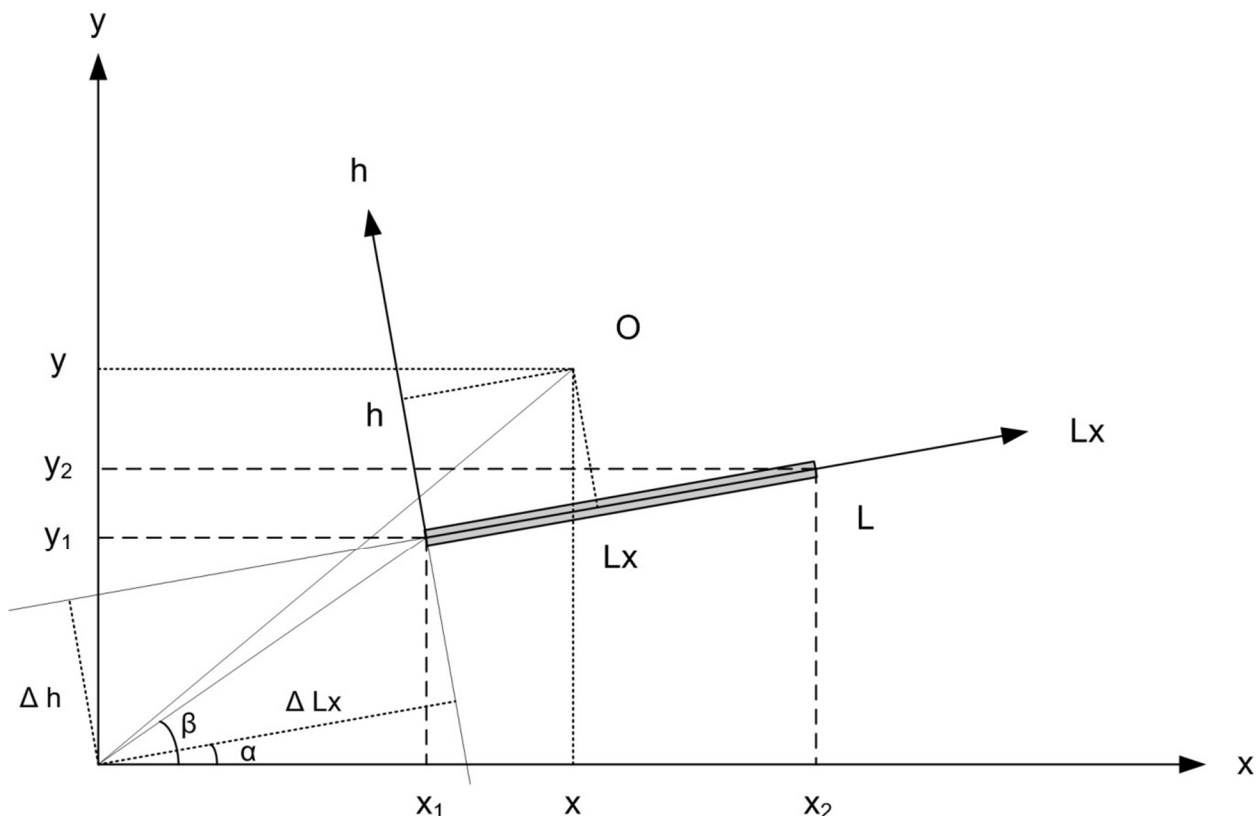


Рисунок 7 – Расположение трубопровода в произвольной системе координат

С точки зрения риск-менеджмента предложенные математические модели позволяют обосновывать безопасное расположение оборудования, зданий и со-



оружий, а также управлять режимом работы персонала опасных объектов на основе анализа полей потенциального риска и показателей индивидуального и коллективного рисков.

В **третьей главе** приведены результаты алгоритмизации процесса оценки техногенного риска на объектах топливно-энергетического комплекса.

Общий алгоритм оценки риска представлен на рисунке 8.

В рамках исследования алгоритмизированы два наиболее сложных элемента общего алгоритма:

1. Расчет последствий опасных явлений.
2. Оценка интегральных показателей риска.

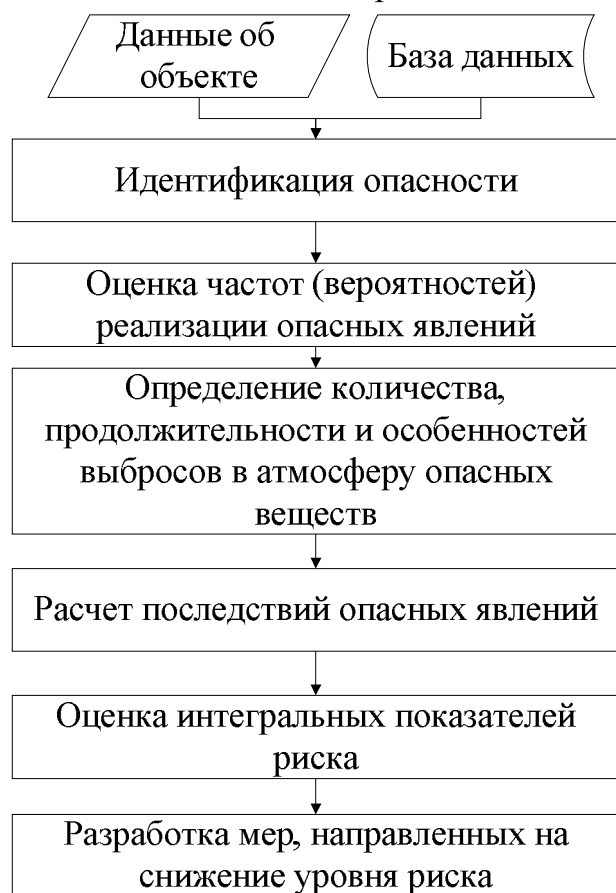


Рисунок 8 – Общий алгоритм анализа риска

ции опасных явлений.

Разработанный комплект алгоритмов может быть дополнен иными вспомогательными алгоритмами, описывающими другие опасные процессы, такие как выброс химически опасных веществ, радиоактивно опасных веществ. При этом общие алгоритмы не претерпят изменения.

Каждая стадия, входящая в общий алгоритм анализа риска, может быть также представлена в виде алгоритма. В свою очередь полученные алгоритмы могут быть детализированы несколькими уровнями алгоритмов.

Проведенный анализ показал, что алгоритм оценки рисков представляет собой сложную разветвленную структуру, включающую вспомогательные алгоритмы, позволяющие строить поля вероятностей смертельного поражения людей и вероятностей полной утраты стоимости основных фондов.

Выбор необходимого набора вспомогательных алгоритмов осуществляется исходя из результатов проведенной идентификации опасностей и построения сценариев реализации

Разработанные алгоритмы реализованы в виде комплекта программных модулей с использованием существующих математических программ и программ работы с таблицами.

Проведенный анализ показал, что предложенный подход более предпочтителен по сравнению с используемыми на практике. Разработка автоматизированной методики на основе предложенных алгоритмов в виде конечного программного продукта позволит проводить расчеты по оценке риска в автоматическом режиме, тем самым время разработки значительно сократится, а вероятность ошибки значительно снизится.

В четвертой главе приведены результаты оценки риска на типовых площадочных объектах топливно-энергетического комплекса – нефтеперекачивающей станции (НПС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).

Проведен анализ возможных опасностей, оценка частот реализации опасных явлений и определено количество, продолжительность и особенности выбросов в атмосферу опасных веществ.

Определена форма представления исходных данных, удобная для реализации подалгоритмов «Расчет последствий опасных явлений» и «Оценка интегральных показателей риска».

На рисунках 9 – 10 приведены поля потенциального риска для типовых объектов топливно-энергетического комплекса.

Приведены результаты расчета интегральных показателей риска (таблицы 2-3).

Таблица 2 – Сведения об индивидуальном риске для персонала объекта нефтеперекачивающей станции

№ п/п	Наименование должностей и профессий	Численность группы	Индивидуальный риск (по разраб. комплекс. методике)	Индивидуальный риск (по сущ. методике)
1	Административно-управленческий персонал и ИТР	7	3,53E-06	6,66E-09
2	Бухгалтерия, секретарь	4	3,97E-07	6,66E-09
3	Персонал, обслуживающий электрооборудование	2	7,04E-06	1,19E-05
4	Ремонтный персонал	5	1,34E-05	1,19E-05
5	Вспомогательный персонал	2	3,97E-06	1,19E-05
6	АРС	12	1,57E-06	1,53E-07
7	Операторы НПС	8	7,34E-07	1,45E-07
8	Дежурный ремонтный пер-	8	9,90E-06	1,53E-07

№ п/п	Наименование должностей и профессий	Численность группы	Индивидуальный риск (по разраб. комплекс. методике)	Индивидуальный риск (по сущ. методике)
	сонал			
9	Водители	4	9,94E-08	3,33E-09
10	Водитель автопогрузчика	1	2,23E-05	1,19E-05
11	Начальник охраны	1	3,53E-06	6,66E-09
12	Персонал охраны	12	9,19E-06	1,25E-05
13	Лаборант-химик	1	1,63E-06	2,16E-06

Расчетное значение коллективного риска составляет  $3,57 \cdot 10^{-4}$  и  $2,76 \cdot 10^{-4}$  соответственно.

Таблица 3 – Сведения об индивидуальном риске для персонала теплоэлектростанции

№ п/п	Наименование должностей и профессий	Численность группы	Индивидуальный риск (по разраб. комплекс. методике)	Индивидуальный риск (по сущ. методике)
1	Административно-управленческий персонал и ИТР	32	2,30E-07	2,16E-06
2	Бухгалтерия,	31	1,39E-07	2,16E-06
3	Персонал главного корпуса	108	1,46E-07	2,16E-06
4	Персонал химцеха	56	1,79E-08	1,07E-08
5	Персонал, обслуживающий электрооборудование	17	2,61E-07	2,16E-06
6	Ремонтный персонал	12	4,44E-07	2,27E-06
7	Вспомогательный персонал	9	1,68E-07	8,97E-08
8	АРС	32	2,36E-08	8,97E-08
9	Дежурный персонал топливного хозяйства	16	3,15E-07	3,74E-06
10	Водители	32	3,47E-08	2,16E-06
11	Начальник охраны	1	2,30E-07	2,16E-06
12	Персонал охраны	36	4,00E-07	2,27E-06

Расчетные значения коллективного риска составляет  $6,13 \cdot 10^{-5}$  и  $6,5 \cdot 10^{-4}$  соответственно.

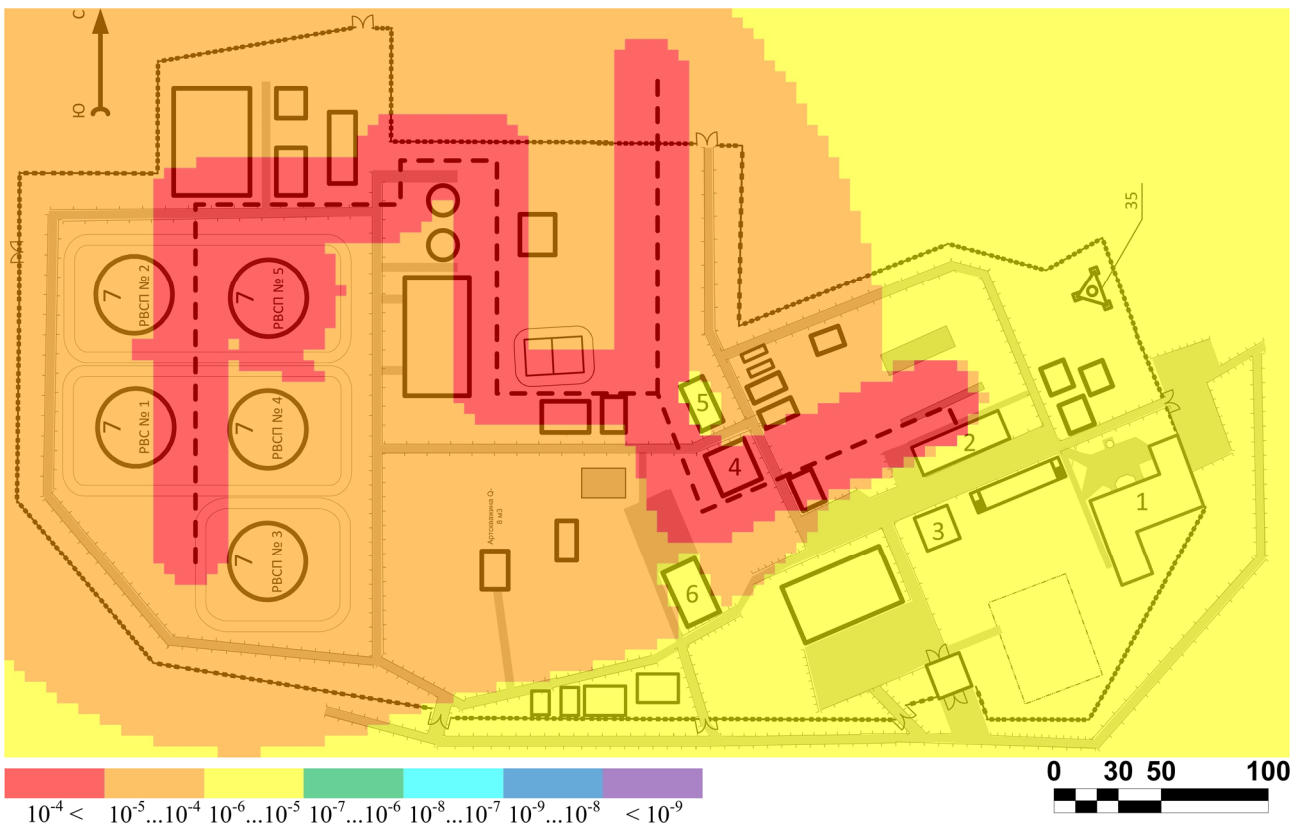


Рисунок 9 – Поле потенциального риска для нефтеперекачивающей станции  
 (1. Административно-бытовой корпус; 2. Нефтенасосная; 3. Операторная; 4. Котельная; 5. Лаборатория; 6. Ремонтно-механическая мастерская; 7. РВСП-10000 м<sup>3</sup> х5 шт.)

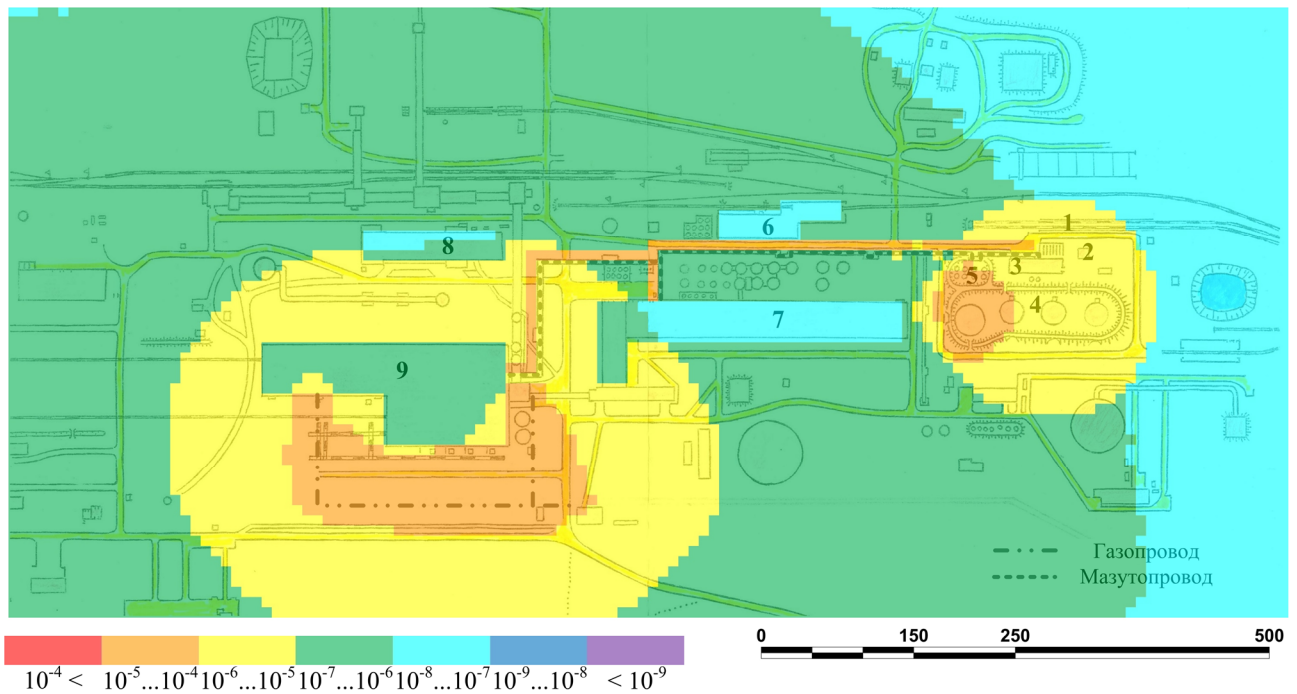


Рисунок 10 – Поле потенциального риска для теплоэлектроцентрали  
 (1. Железнодорожная эстакада; 2. Приемная емкость; 3. Насосная; 4. Резервуарный парк; 5. Склад масел; 6. Склад химреагентов; 7. Химкорпус; 8. Объединенный вспомогательный корпус; 9. Главный корпус.)

Разница в полученных результатах обусловлена учетом вклада в формирование полей потенциального риска линейных объектов и дрейфа облака топливовоздушной смеси. Линейные объекты нефтеперекачивающей станции обладают повышенным потенциалом опасности в силу значительных объемов нефти, содержащихся в нефтепроводах и высокой производительности перекачки нефти. Учет дрейфа облаков топливовоздушной смеси изменяет вид полей потенциального риска по сравнению со стационарной постановкой задачи: на небольшом удалении от источников опасности наблюдается снижение уровней потенциального риска, на значительном удалении – повышение.

Принятые на объектах архитектурно-строительные решения по планировке территории являются достаточно удачными с точки зрения риск-анализа. Это обусловлено удаленностью постоянных рабочих мест от источников опасности (резервуаров, трубопроводных систем).

Апробация предложенных методов и алгоритмов показала их работоспособность при проведении риск-анализа опасных производственных объектов.

Выявлены основные закономерности и наиболее значимые факторы, влияющие на показатели риска, а также направления выбора мероприятий по снижению уровня риска.

**В заключении** сформулированы основные результаты исследований:

1. Предложен усовершенствованный метод, позволяющий учесть уменьшение теплового излучения при перемещении человека в безопасную зону. Снято ранее наложенное допущение о расчете вероятности поражения для пикового значения интенсивности теплового излучения и его постоянстве при перемещении в безопасную зону.
2. Предложен подход к расчету индивидуального риска, учитывающий нестационарность рабочих мест персонала.
3. Разработана методика построения полей потенциального риска для аварий с образованием топливовоздушных смесей в открытом пространстве, сопровождающихся взрывами и сгоранием облака по модели «пожар-вспышка» с учетом их дрейфа.
4. Разработана методика построения полей потенциального риска для линейных объектов малой протяженности, позволяющая учитывать совместное влияние линейных и точечных объектов на формирование поля потенциального риска.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бызов А.П. Моделирование процесса формирования полей потенциального риска при авариях на опасных производственных объектах с учетом дрейфа облака топливозвоздушной смеси / А.П. Бызов, С.В. Ефремов // *Безопасность Жизнедеятельности*. 2011. № 8. – С. 43–46.
2. Бызов А.П. Оценка вероятности поражения человека тепловым излучением с учетом перемещения в безопасную зону / А.П. Бызов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2011. № 3 (130).– С. 247–252.
3. Бызов А.П. Моделирование полей потенциального риска для линейных объектов / А.П. Бызов, С.В. Ефремов // *Безопасность в техносфере*. 2011. № 6.– С. 7–10.
4. Бызов А.П. Определение вероятности поражения с использованием пробит-функции / А.П. Бызов // *Проблема риска в техногенной и социальных сферах. Тезисы семинара. Выпуск 6.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 17–19.
5. Бызов А.П. Исследование показателей и методик оценки риска / А.П. Бызов // XXXVII Неделя науки СПбГПУ: материалы Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов. Ч. XIII. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 80–81.
6. Бызов А.П. Оценка потенциального территориального риска для линейных объектов / А.П. Бызов // XXXVIII Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. XII. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 23–27.
7. Бызов А.П. Расчет показателей техногенного риска / А.П. Бызов // *Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы XV Всероссийской конференции. Том 4.*– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.– С. 90–91.