

Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований
проблем промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ)

На правах рукописи

Савина Анна Вячеславовна

**АНАЛИЗ РИСКА АВАРИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНЫХ
РАССТОЯНИЙ ОТ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА
ДО ОБЪЕКТОВ С ПРИСУТСТВИЕМ ЛЮДЕЙ**

Специальность 05.26.03 – «Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовый комплекс)»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – д.т.н. Лисанов Михаил Вячеславович

Москва – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| ГЛАВА 1. АВАРИЙНОСТЬ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ..... | 9 |
| 1.1 Анализ российских и зарубежных статистических данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта..... | 9 |
| 1.1.1 Краткое описание объектов исследования..... | 9 |
| 1.1.2 Интенсивность аварий на магистральных трубопроводах..... | 16 |
| 1.1.3 Анализ причин произошедших аварий..... | 20 |
| 1.1.4 Оценка частоты образования дефектных отверстий разных размеров..... | 21 |
| 1.1.5 Аварии с воспламенением..... | 24 |
| 1.1.6 Оценка влияния конструктивных особенностей и условий окружения на аварийность..... | 25 |
| 1.2 Крупные аварии и катастрофы на магистральных трубопроводах..... | 27 |
| Выводы к главе 1..... | 38 |
| ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ОТ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДО ОБЪЕКТОВ С ПРИСУТСТВИЕМ ЛЮДЕЙ..... | 40 |
| 2.1 Обзор существующих подходов размещения нефтегазовых трубопроводов в непосредственной близости от городских (густонаселенных) территорий..... | 40 |
| 2.1.1. Размещение российских нефтегазовых магистральных трубопроводов вблизи объектов с присутствием людей..... | 41 |
| 2.1.2. Зарубежный опыт по размещению трасс трубопроводов на густонаселенных территориях..... | 46 |
| 2.2 Способы установления безопасных расстояний от магистральных трубопроводов до объектов с присутствием людей..... | 51 |
| 2.3 Общий алгоритм количественной оценки риска для обоснования безопасных расстояний от магистральных трубопроводов сжиженного углеводородного газа до объектов с присутствием людей..... | 53 |
| 2.3.1 Идентификация опасностей аварий..... | 56 |
| 2.3.2 Расчеты зон поражения и выделение высокоопасных участков..... | 64 |
| 2.3.3 Оценка вероятности аварий..... | 68 |
| 2.3.4 Оценка риска гибели людей..... | 80 |
| Выводы к главе 2..... | 86 |

| | |
|---|-----|
| ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ШФЛУ | 88 |
| 3.1 Неопределенности и ограничения применения расчетной модели..... | 88 |
| 3.2 Анализ результатов оценки риска и практики определения безопасных расстояний для магистральных трубопроводов ШФЛУ | 90 |
| 3.3 Влияние основных технологических и природных факторов на размеры максимальных зон поражения при авариях на магистральных трубопроводах СУГ | 95 |
| 3.4 Характерные зависимости между природно-технологическими факторами и размерами возможных зон поражения при авариях на магистральных трубопроводах ШФЛУ | 98 |
| 3.5 Расстояния зон поражения максимальных гипотетических аварий для типовых магистральных трубопроводов ШФЛУ | 103 |
| 3.6 Основные результаты определения безопасных расстояний..... | 104 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 108 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ | 110 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 111 |

ВВЕДЕНИЕ

В России создана, функционирует и развивается уникальная по протяженности, производительности и безопасности система магистральных трубопроводов (МТ) нефти, газа и нефтепродуктов. Данные по аварийности и травматизму свидетельствуют о том, что аварии с гибелью людей на российских МТ – достаточно редкие события. Однако в современных урбанистических условиях сближения МТ с населенными пунктами, объектами производственной и транспортной инфраструктуры увеличивается опасность возникновения крупных промышленных аварий с гибелью людей. Наибольшая опасность связана с эксплуатацией МТ, перекачивающих нестабильные углеводородные жидкости (сжиженные углеводородные газы, нестабильный конденсат, широкую фракцию легких углеводородов – далее СУГ), при аварийном выбросе которых могут образовываться облака топливно-воздушных смесей (ТВС), способные дрейфовать при неблагоприятных условиях на расстояния в несколько сотен метров с сохранением способности к воспламенению.

К настоящему времени накоплен значительный опыт по моделированию аварийных выбросов, расчету последствий аварий на промышленных объектах и применению методологии анализа риска для оценки опасностей возможных аварий, в т.ч. в работах В.А. Акимова, М.В. Бесчастнова, О.М. Иванцова, А.М. Козлитина, М.В. Лисанова, С.В. Овчарова, Г.Э. Одишарии, А.С. Печеркина, В.С. Сафонова, В.И. Сидорова, С.И. Сумского, С.А. Тимашева, А.А. Швыряева, Ю.Н. Шебеко, Т. Kletz, F. Lees, K. Muhlbaueг и других российских и зарубежных исследователей [1–20].

Среди способов обеспечения безопасности людей от аварий наиболее известным и надежным является удаление объектов защиты от источника опасности на достаточное расстояние («защита расстоянием»). Особенно остро вопрос установления безопасных расстояний встает в условиях угроз крупных промышленных аварий с групповой гибелью людей. Хорошо известен пример уфимской катастрофы 1989 года, после которой в СНиП 2.05.06–85* «Магистральные трубопроводы» были внесены изменения, устанавливающие крайне пессимистичные минимальные расстояния от продуктопроводов СУГ, на несколько десятилетий фактически затормозившие проектирование и строительство новых подобных объектов.

В связи с государственным Планом развития газо- и нефтехимии России до 2030 года [21] одной из важных проблем обоснования промышленной и пожарной безопасности при проектировании и эксплуатации МТ СУГ является установление минимальных безопасных расстояний до соседних сооружений и объектов инфраструктуры. Решение данной проблемы должно быть основано на результатах анализа современного состояния аварийности,

моделирования выбросов опасных веществ, количественной оценки риска и обоснования критериев безопасности.

Объектом исследования являются опасные производственные объекты линейной части МТ СУГ.

Предмет исследования – обеспечение промышленной безопасности на МТ СУГ, защищенности людей от опасных факторов аварий, оценка безопасных расстояний, в т.ч. с учетом применения компенсирующих мероприятий.

Цель диссертационной работы – научно-техническое обоснование безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей с использованием методологии анализа опасностей и количественной оценки риска аварий (КОР).

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **основные задачи:**

- анализ данных по аварийности на отечественных и зарубежных МТ для выявления актуальных тенденций и общих закономерностей возникновения и развития аварий на МТ СУГ;
- анализ существующих методик по оценке риска аварий на МТ для разработки рекомендаций по расчету ожидаемой частоты аварий на участках проектируемых МТ с учетом современных проектных решений и компенсирующих мер безопасности;
- исследование традиционных и новых способов обеспечения безопасности при прокладке МТ вблизи населенных территорий, включая проблему установления и обоснования критериев приемлемого риска гибели людей в промышленных авариях;
- анализ особенностей аварийных выбросов СУГ, учитываемых при моделировании и оценке последствий аварий для ранжирования факторов, влияющих на размеры зон поражения и безопасные расстояния от МТ СУГ;
- разработка способа обоснования безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей;
- апробация разработанного способа обоснования безопасных расстояний размещения МТ СУГ и обобщение результатов его практического применения.

Методы решения поставленных задач

Для решения поставленных задач были использованы методы исследования: сбора и обработки данных – описание, обобщение, анализ и синтез, выявление закономерностей, факторный анализ; математической статистики, теории вероятностей; моделирования возникновения и развития аварий и их последствий; методология анализа риска аварий.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен риск-ориентированный подход для научно-технического обоснования безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей, основанный на расчетах

зон действия поражающих факторов максимальной гипотетической аварии (МГА) и на количественной оценке риска поражения людей при авариях.

2. Предложен принцип оценки ожидаемой частоты аварий на участках проектируемых и реконструируемых МТ с учетом возможности внедрения компенсирующих и организационно-технических мер обеспечения безопасности.

3. На основе результатов апробации риск-ориентированного подхода обоснования безопасных расстояний проранжированы по степени опасности технологические и внешние факторы, влияющие на размеры зон поражения и безопасные расстояния от МТ СУГ, а также выявлены функциональные зависимости между технологическими параметрами МТ СУГ (диаметр, давление в трубопроводе) и интенсивностью аварийного истечения, условиями рассеяния в момент аварии и расстояниями дрейфа образовавшегося облака ТВС. Оценена степень влияния частоты разгерметизации МТ, в т.ч. при исключении протяженных трещин, а также типичных метеоусловий на территориальное распределение потенциального риска гибели людей.

4. По результатам проведенного анализа риска аварий на шести МТ для транспортирования широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ) общей протяженностью более 2 тыс. км разработаны рекомендации по определению безусловно безопасных расстояний (по максимальному размеру зон поражения при МГА) для типовых линейных участков МТ ШФЛУ.

Личный вклад автора состоит в:

- непосредственном участии в проведении расчетов по анализу риска аварий в рамках разработки специальных технических условий для разработки проектной документации (СТУ) и деклараций промышленной безопасности на продуктопроводы для транспортирования ШФЛУ;

- анализе результатов и обобщении опыта научного коллектива ЗАО НТЦ ПБ по оценке риска аварий на МТ СУГ в единый научно-методический подход к обоснованию безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей;

- проведении анализа статистических данных по аварийности на российских и зарубежных МТ;

- разработке рекомендаций по оценке ожидаемой частоты аварий на участках проектируемых МТ, позволяющих учесть современные компенсирующие меры обеспечения безопасности;

- получении инженерных зависимостей и рекомендаций для предварительной оценки безусловно безопасных расстояний при выборе коридора прокладки трасс проектируемых МТ ШФЛУ на основании анализа результатов практических работ по оценке риска аварий;

– апробации результатов работы при написании статей, тезисов, докладов, участия в конференциях и научных семинарах.

Практические результаты работы

Результаты работы использованы при разработке Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов» в части подходов к определению минимальных безопасных расстояний от МТ СУГ, а также в декларациях промышленной безопасности и СТУ для разработки проектной документации на ряд объектов ОАО «Сибур Холдинг», в т.ч. на продуктопроводы для транспортирования ШФЛУ: «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция», «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим», «Губкинский ГПЗ – Нижневартовский ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ – Тобольский НХК», «Сургут – Южный Балык», о чем имеются соответствующие акты внедрения (использования) результатов настоящего исследования.

Результаты работы могут применяться при проектировании, разработке СТУ, декларировании и обосновании промышленной и пожарной безопасности продуктопроводов, транспортирующих СУГ.

Необходимая и достаточная **степень достоверности**, обоснованность результатов работы подтверждаются их непротиворечивостью и соответствием общепринятым научным и практическим данным в области предупреждения аварийности и травматизма на опасных производственных объектах; обусловлены комплексным использованием известных, проверенных практикой теоретических и практических методов исследования в сфере обеспечения безопасности сложных социо-технических систем; удостоверяются практикой продуктивного использования проектными организациями разработанного способа риск-ориентированного обоснования минимально безопасных расстояний при размещении новых и реконструкции действующих российских магистральных продуктопроводов СУГ.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на:

- XXII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы пожарной безопасности» (Москва, 19–20.05.2010);
- 18-м научном семинаре «Промышленная безопасность. Крупные промышленные аварии: опасности, угрозы, вызовы» (Москва, 24.05.2010);
- Международной научно-практической конференции «Анализ промышленных рисков как основа принятия решений по повышению безопасности промышленных объектов» (Киев, Украина, 22–24.09.2010);

- тематическом семинаре «Об опыте декларирования промышленной и пожарной безопасности и страхования ответственности. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (Москва, 28–29.10.2010);
- IV Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность критических инфраструктур и территорий» (Екатеринбург, 24–27.05.2011);
- IV Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее», GTS-2011 (Москва, 26–27.10.2011);
- VII Международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (Новополоцк, Республика Беларусь, 22–25.11.2011);
- III Национальном конгрессе «Комплексная безопасность в строительстве». Круглый стол «Повышение безопасности зданий и сооружений в процессе строительства и эксплуатации» (Москва, 22–25.05.2012);
- тематическом семинаре «Об опыте декларирования промышленной безопасности и страхования ответственности. Обоснование безопасности опасных производственных объектов. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах» (Москва, 14.10.2013).

Публикации

Основные результаты исследований изложены в 11 печатных работах, в том числе в 7 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение риск-ориентированного подхода, основанного на расчетах максимальных зон поражения и использовании вероятностных критериев безопасности, для обоснования безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей.
2. Принцип оценки частоты аварии на проектируемых и реконструируемых участках линейной части МТ с учетом современных мер по обеспечению безопасности.
3. Результаты анализа факторов, влияющих на размеры зон поражения людей, определяемых дрейфом и сгоранием облака смеси паров СУГ с воздухом, и безопасные расстояния, а именно – рабочее давление, диаметр МТ, метеоусловия.
4. Рекомендации по предварительному определению безусловно безопасных расстояний на ранних сроках проектирования и размещения коридоров трасс МТ СУГ.

ГЛАВА 1. АВАРИЙНОСТЬ НА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Аварийность – проявление техногенных опасностей при эксплуатации технических систем. Как правило, аварийность исследуют, рассматривая совокупность различных по масштабу последствий аварий и катастроф, происшедших при эксплуатации однородной техники (а данном случае – МТ) за определенный период времени.

При количественной оценке риска анализ аварийности является эмпирической основой для принятия решений по обеспечению безопасности в промышленности.

В главе представлен аналитический обзор статистических данных по аварийности и обзор крупных аварий на МТ. Проанализированы возможности и ограничения для применения этих данных при оценке риска аварий на новых и проектируемых МТ, в том числе МТ СУГ.

1.1 Анализ российских и зарубежных статистических данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта

Вследствие сложившейся ограниченности открытой отечественной статистики, особое значение имеют данные по аварийности на зарубежных объектах, аналогичных по своим режимам эксплуатации, технологическим параметрам и территориальному расположению. К таким объектам, прежде всего, относятся МТ (МГ, МН, МНПП, МТ СУГ) США и стран Западной Европы, которые также являются протяженными объектами с сопоставимыми регламентными параметрами. По открытым источникам проанализированы и обобщены данные по авариям на линейной части сухопутных магистральных трубопроводов (в основном подземных, стальных), расположенных за пределами промышленных площадок.

1.1.1 Краткое описание объектов исследования

1.1.1.1 Информация об источниках данных по аварийности на МТ

Выбор источников информации по аварийности на МТ определялся их открытостью и доступностью, а также содержанием в них представительных статистических данных.

Оценка современного состояния аварийности на МТ России проводилась на основании сведений годовых отчетов и информационных бюллетеней Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) [22, 23].

Кроме этого настоящий анализ включал материалы баз данных и отчетов по аварийности ведущих организаций, систематизирующих сведения об отказах на МТ:

– отчет европейской группы по данным об инцидентах на газопроводах (European Gas pipeline Incident data Group – EGIG (<http://www.egig.eu>) [24];

– отчет ассоциации операторов магистральных сухопутных газопроводов Великобритании (United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association – UKOPA (<http://www.ukopa.co.uk>) [25];

– отчет ассоциации операторов западно-европейских магистральных нефтепроводов (CONservation of Clean Air and Water in Europe – CONCAWE (<http://www.concawe.be>) [26];

– база данных по инцидентам на магистральных трубопроводах под контролем Управления по безопасности трубопроводов и опасным материалам Министерства транспорта США (PHMSA, <http://www.phmsa.dot.gov/>) [27, 28].

Основной характеристикой баз данных по авариям является так называемая «экспозиция аварийности», измеряемая в километро-годах. Она указывает на статистическую устойчивость величин, характеризующих аварийность на МТ (вследствие большой протяженности линейной части трубопроводов и продолжительного периода наблюдения).

Основные сведения об источниках данных по аварийности на МТ приведены ниже (Таблица 1).

Таблица 1 – Основные характеристики баз данных по аварийности

| Характеристика | EGIG (страны Западной Европы) | CONCAWE (страны Европы) | УКОРА (Великобритания) | PHMSA (США) | Ростехнадзор (Россия) |
|---|--|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Протяженность, тыс. км | 135,2 | 36,0 | 22,4 | 768,8 | 254,5 |
| МГ | 135,2 | - | 20,6 | 480,8 | 180 |
| МН | - | 11,5 | 0,2 | 88,8 | 52,9 |
| МНПП | - | 24,5 | - | 104,4 | 21,6 |
| МТ СУГ | - | - | 1,6 | 94,8 | 1,7 |
| Период сбора данных ¹ , гг. | 1971-2010 | 1971-2011 | 1962-2011 | 1984-2001, 2002- 2009, 2010-2012 | 1999-2012 |
| Экспозиция наблюдения аварийности, млн.км·год | | | | | |
| МГ | 3,55 | | | 13,0 | 2,3 |
| МН | - | | | 2,0 | 0,86 |
| МНПП | - | | | 2,8 | 0,31 |
| МТ СУГ | - | | | 2,2 | 0,02 |
| Всего | 3,55 | ~ 1,0 ² | 0,81 | 20,0 ² | 3,5 ² |
| Общее количество инцидентов в базе данных по аварийности, шт ³ . | 1249 (106) | 485 (37) | 187 (12) | 4 019 (880) | 502 (103) |

¹ Указаны периоды наблюдения аварийных утечек, на протяжении которых не менялись критерии сбора данных. Дата окончания последнего периода сбора соответствует последнему актуальному опубликованному официальному отчету.

² Оценка авт.

³ В скобках – значение за последние 5 лет наблюдения.

В рассмотренных источниках об аварийности на МТ использованы различные критерии, по которым инциденты включаются в статистическую базу, т.е. имеются различия в определении аварийного события, вследствие чего полным сравнительным соответствием рассмотренные источники по аварийности на МТ не обладают. Например, имеются различия в составе учитываемого оборудования (задвижки, фланцы, камеры СОД, площадки насосных станций) и минимальном пороговом размере аварийной утечки [29, 30]. Краткие результаты анализа различий источников информации по аварийности на МТ представлены ниже (Таблица 2).

Таблица 2 – Определение аварийного события в базах данных по аварийности на МТ

| База данных | Критерии определения аварийи ⁴ | | | | |
|--------------------------------------|---|--|--------------|---------------------------------|--|
| | Объем аварийной утечки, м ³ | Серьезный несчастный случай, в т.ч. со смертельным исходом | Пожар, взрыв | Ущерб, в т.ч. от загрязнения ОС | Другие |
| Газопроводы | | | | | |
| Ростехнадзор | >10 000 | + | + | - | повреждение/ разрушение соседних объектов |
| PHMSA | - | + | - | > 50 тыс. долл. | - |
| UKOPA | > 0 | + | + | + | случаи дефектов и повреждений стенки трубопровода |
| EGIG | > 0 | + | + | + | - |
| Нефте- и нефтепродуктопроводы | | | | | |
| Ростехнадзор | >10 | + | + | + | Превышение объема утечки легкоиспаряющейся жидкости более 1 м ³ в сутки |
| PHMSA | > 8 (50 баррелей) | + | + | > 50 тыс. долл. | - |
| CONCAWE | > 1 | + | + | + | - |

Помимо этого имеются отличия в детальности собираемых данных и способе представления итоговой информации. Так, Ростехнадзор ежегодно представляет отчеты о

⁴ Рассматриваются аварийные события, которые удовлетворяют хотя бы одному из указанных критериев: «плюс» - рассматриваемый критерий; «минус» – критерий не рассматривается

деятельности, включающие, в том числе раздел о безопасности объектов магистрального трубопроводного транспорта, где приводятся сведения о текущей протяженности МТ, числе произошедших аварий и несчастных случаев и их причины. Более подробная информация о произошедших авариях на МТ представляется в Информационном бюллетене Ростехнадзора [23].

EGIG, UKOPA, CONCAWE раз в несколько лет готовят отчеты, иллюстрирующие текущее состояние аварийности на МТ и содержащие результаты анализа современных и ретроспективных данных по произошедшим авариям. В отчеты включены результаты анализа причин произошедших аварий и основные выявленные корреляции между аварийностью, технологическими параметрами МТ и условиями их окружения (подробнее п.1.1.6).

PHMSA предлагает на своем сайте [27] постоянно обновляемую и пополняемую информационную базу о состоянии аварийности на объектах МТ в виде таблиц и диаграмм, а также представляет доступ ко всем данным об авариях и инцидентах, в том числе не удовлетворяющих критериям, приведенным в таблице 2. По требованию законодательства США [42] данные по аварийности представляются всеми операторами МТ по специальным разработанным формам, включающим по несколько сотен полей для заполнения. Материалы [27] являются ценным источником информации по аварийности для самостоятельного анализа.

1.1.1.2 Информация о трубопроводных системах

МТ промышленно развитых стран и РФ в целом технологически подобны. Для оценки возможности применения статистических данных зарубежных МТ к современным отечественным МТ, в т.ч. МТ СУГ кратко рассмотрим основные технологические параметры МТ России, США и стран Западной Европы, а также типичные окружающие МТ условия.

Наибольшие конструктивные отличия МТ связаны с диаметром и толщиной стенки трубопроводов (Рисунок 1).

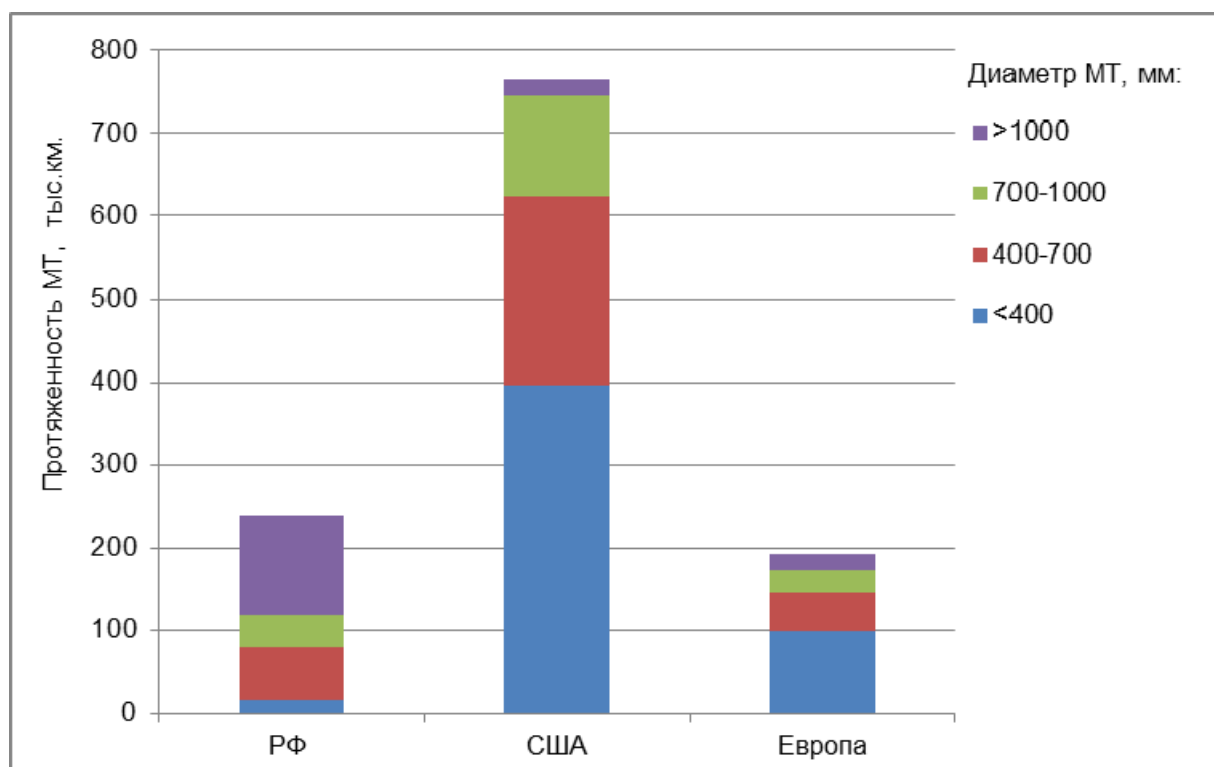


Рисунок 1 – Распределение МТ в России, США и странах Европы по диаметру

На рисунке 1 отражены характерные распределения МТ по диаметрам. Так, в России преобладают трубопроводы больших диаметров (>1000 мм), а МТ США и Западной Европы представляют собой разветвленную сеть трубопроводов малых диаметров. Поскольку толщина стенки труб в значительной степени определяется диаметром МТ, по этому технологическому показателю также наблюдаются существенные отличия.

Конструктивные особенности российских и рассматриваемых зарубежных МТ (в первую очередь диаметр и толщина стенки труб) – один из основных факторов при анализе влияния технических параметров на аварийность на МТ.

Сравнение МТ по срокам эксплуатации показало, что российские трубопроводные системы несколько «моложе» МТ США и стран Западной Европы, т.е. «опыта аварий» в Старом и Новом Свете накоплено больше, чем отдельно в России (Рисунок 2).

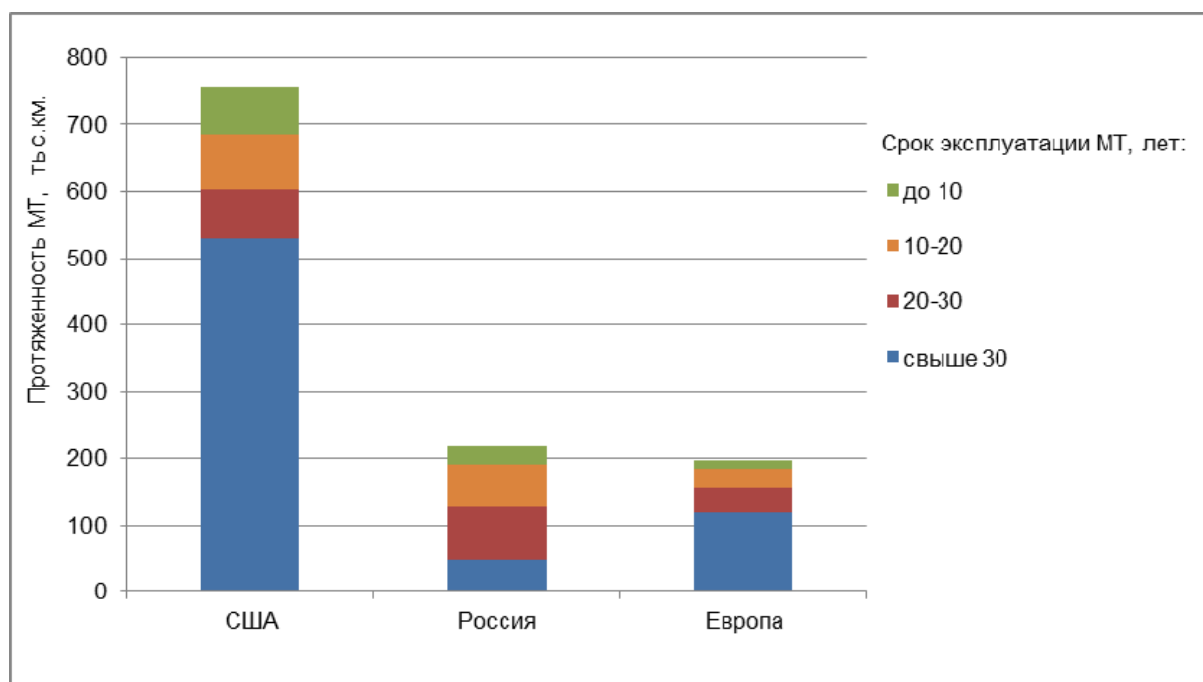


Рисунок 2 – Распределение МТ по возрасту

Анализ условий прокладки МТ выявил отличия в природно-климатических и антропогенных условиях прокладки: МТ в Европе проложены в местности с более высокой плотностью населения, но в условиях более мягкого климата, отсутствии тектонических разломов, зон вечной мерзлоты. Данные отличия должны учитываться при анализе распределения антропогенных и природных причин произошедших аварий.

Существуют также и прочие отличия российских и зарубежных МТ, влияющие на аварийность, в том числе принятые стандарты технического обслуживания и в целом систем организационно-технических мер предупреждения аварий и травм. В рассматриваемых базах данных эти отличия присутствуют латентно и не могут быть представлены только в технических показателях.

Выявленные отличия МТ России, США и стран Западной Европы, указывают, что «лобовое» сравнение статистических данных по аварийности, а тем более заимствование зарубежной статистики для российских МТ некорректно. Дальнейшие выкладки приводятся с целью определения существенных сходств и принципиальных различий показателей аварийности в разных странах, а также для выявления общих тенденций и закономерностей в динамике аварийности за последние десятилетия.

1.1.2 Интенсивность аварий на магистральных трубопроводах

Основной статистической характеристикой аварийности на МТ, как линейных протяженных источниках опасности, является интенсивность аварий (λ), оцениваемой числом аварий за единицу времени на единицу длины трассы (например, за год на 1000 км длины) или на грузооборот.

Так статистические данные по европейским трубопроводам [24, 25, 26] позволяют отчетливо проследить динамику аварийности с 1960-1970х годов, а по американским [27] с 1980-1990х годов (Рисунок 3, Рисунок 4).

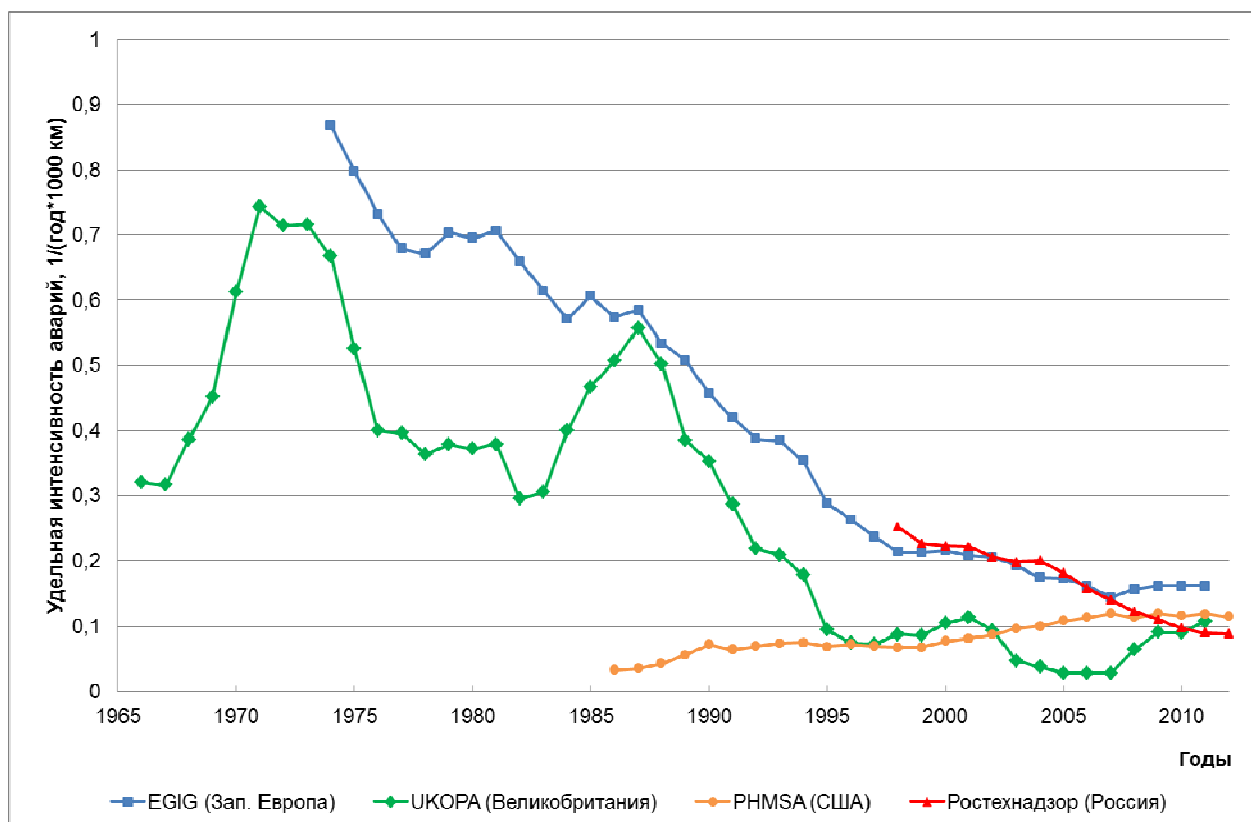


Рисунок 3 – Удельная интенсивность аварий на магистральных газопроводах осредненная по пятилетним периодам

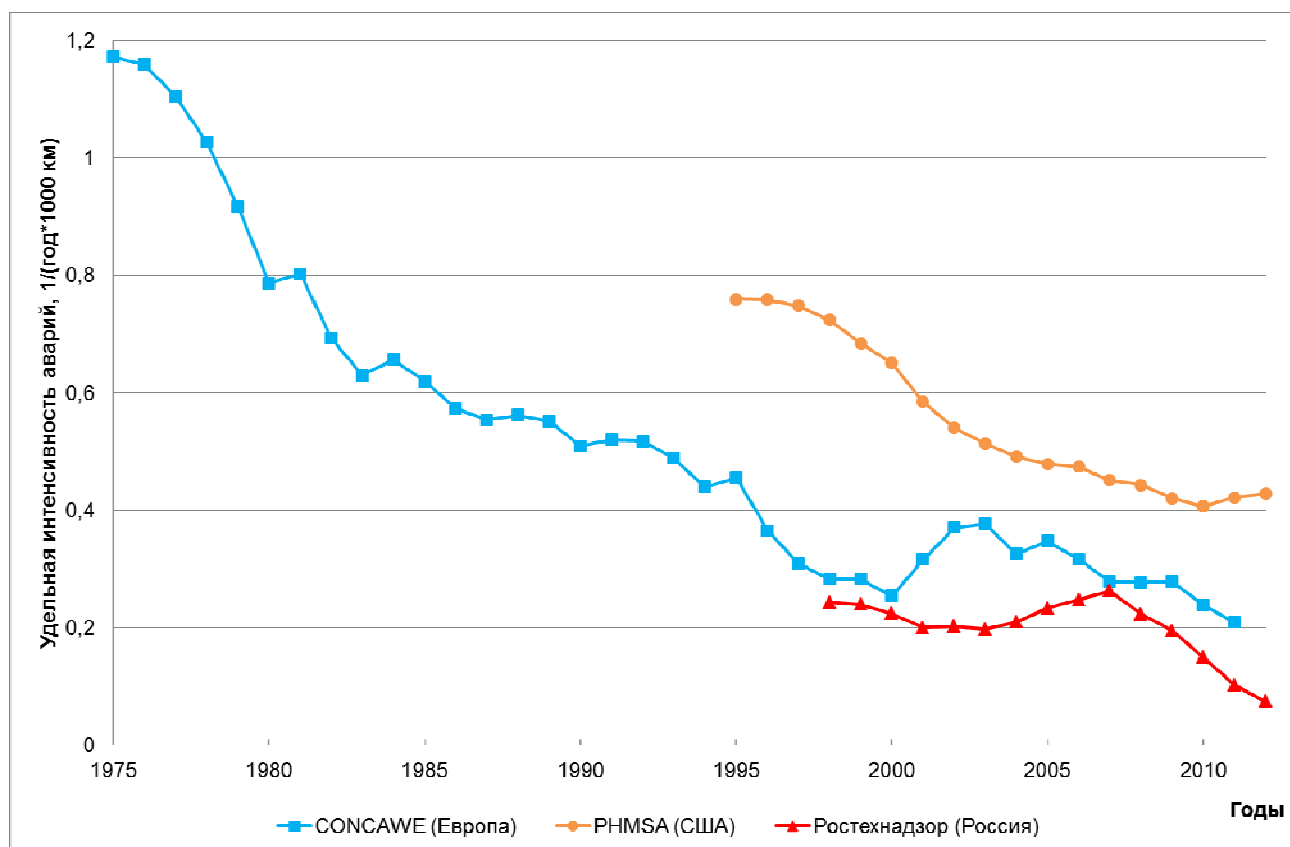


Рисунок 4 – Удельная интенсивность аварий на магистральных нефте- и продуктопроводах осредненная по пятилетним периодам

На рисунке 3 отражена динамика снижения аварийности на газопроводах Европы в 5-8 раз по сравнению с семидесятыми годами и двукратное снижение аварийности на российских МГ за последние 10 лет. Показатели аварийности европейских магистральных нефте- и продуктопроводов (рисунок 4) также улучшились по сравнению с 70-ми годами в 4-5 раз.

Эффект снижения аварийности обусловлен завершением периода вработываемости оборудования и использованием уже накопленных знаний о происшедших ранее авариях на эксплуатируемых МТ. Процессы износа материала трубопроводов (в т.ч. коррозия) достаточно долгосрочны и на современных МТ контролируются развитыми диагностическими процедурами. Более существенный вклад в причины аварийности на данном этапе эксплуатации МТ вносят не внутренние технологические причины (изменений в технологии и обслуживании не наблюдается), а нерасчетные внешние природные и антропогенные воздействия.

Обобщенные данные по аварийности на объектах МТ в России и за рубежом представлены ниже (Таблица 3). Видно, что по удельным показателям аварийности российские и зарубежные МТ вполне сопоставимы по порядку величин. Каких-то принципиально резких различий здесь не наблюдается, хотя российские МТ более энергонагружены и, следовательно, обладают повышенным потенциалом аварийности и травматизма.

Таблица 3 – Показатели аварийности российских, европейских и американских трубопроводных систем

| Страна (период наблюдения, гг.) | Количество аварий, шт. | Экспозиция наблюдения аварийности, тыс. км·лет | Интенсивность аварий, ав./год/1000 км | Интенсивность аварий за последние 5 лет, ав./год/1000 км |
|--|------------------------|--|---------------------------------------|--|
| Магистральные газопроводы | | | | |
| Зап. Европа EGIG (1970-2010) | 1249 | 3550 | 0,35 | 0,16 |
| Великобритания УКОРА (1962-2011) | 187 | 812 | 0,30 | 0,11 |
| США (1993-2012) | 1211 | 9400 | 0,13 | 0,11 |
| Россия (1999-2012) | 313 | 2298 | 0,14 | 0,09 |
| Магистральные нефте- и нефтепродуктопроводы, МТ СУГ | | | | |
| Зап. Европа CONCAWE (1971-2011) | 485 | 1000 | 0,52 | 0,24 |
| США (1993-2012) | 2711 | 5100 | 0,53 | 0,43 |
| Россия (1999-2012) | 189 | 1165 | 0,18 | 0,07 |

В последние годы показатель аварийности на МТ России, США и стран Европы стабилизировался на уровне 0,1 аварий/год/1000 км для МГ и 0,1-0,4 аварий/год/1000 км для нефте- и продуктопроводов.

Другим важным явлением, характеризующим тяжесть аварий на МТ, является травматизм при авариях. Обобщенные данные по смертельному травматизму при авариях на МТ в России и на рассматриваемых зарубежных МТ представлены ниже (Таблица 4).

Таблица 4 – Сведения о гибели людей при авариях на российских, европейских и американских МТ

| Страна (период наблюдения, гг.) | Количество аварий, шт. | Количество аварий с гибелью людей | Количество погибших при авариях, чел. | Условная вероятность аварий с гибелью людей | Интенсивность аварий с гибелью людей, ав./год/1000 км | Частота гибели людей при авариях, чел./год/1000 км |
|--|---------------------------|---|---|--|--|---|
| Магистральные газопроводы | | | | | | |
| Зап. Европа EGIG (1970-2010) | 1249 | 7 | 32 ⁵ | <0,01 | 0,002 | 0,009 |
| Великобритания УКОРА (1962-2011) | 187 | 0 | 0 | - | - | - |
| США (1993-2012) | 1211 | 23 | 42 | 0,02 | 0,003 | 0,005 |
| Россия (2000-2012) | 313 | 11 | 15 | 0,04 | 0,005 | 0,007 |
| Магистральные нефте- и нефтепродуктопроводы, МТ СУГ | | | | | | |
| Зап. Европа CONCAWE (1971-2010) | 485 | 5 | 14 | 0,01 | 0,005 | 0,014 |
| США (1993-2012) | 2711 | 26 | 39 | 0,01 | 0,005 | 0,008 |
| Россия (2000-2012) | 189 | 11 | 14 | 0,06 | 0,010 | 0,012 |

⁵ Оценка авт., с учетом аварии в Бельгии 30.07.2004 г., где погибли 24 чел.

Следует отметить, что приведенные в таблице 4 средние показатели гибели людей при авариях на МТ характеризуют типичные аварии с гибелью нескольких человек (в основном из числа производственного персонала). Случаи гибели и травмирования третьих лиц при авариях на МТ еще более редки. Такие аварии с катастрофическими последствиями рассмотрены отдельно в разделе 1.2.

1.1.3 Анализ причин произошедших аварий

При расследовании аварий и статистической обработке результатов на российских и западных МТ специалистами EGIG, CONCAWE, UKOPA, PHMSA, Ростехнадзора выделяются в основном сходные причины возникновения аварий. Для дальнейшего анализа причины объединены в шесть обобщенных групп факторов: коррозия, дефекты оборудования/ материала, внешние воздействия, природные воздействия, ошибочные действия персонала и «другие».

Распределение аварий на магистральных газо- и нефтепроводах по причинам их возникновения представлены ниже (Рисунок 5а, 5б).

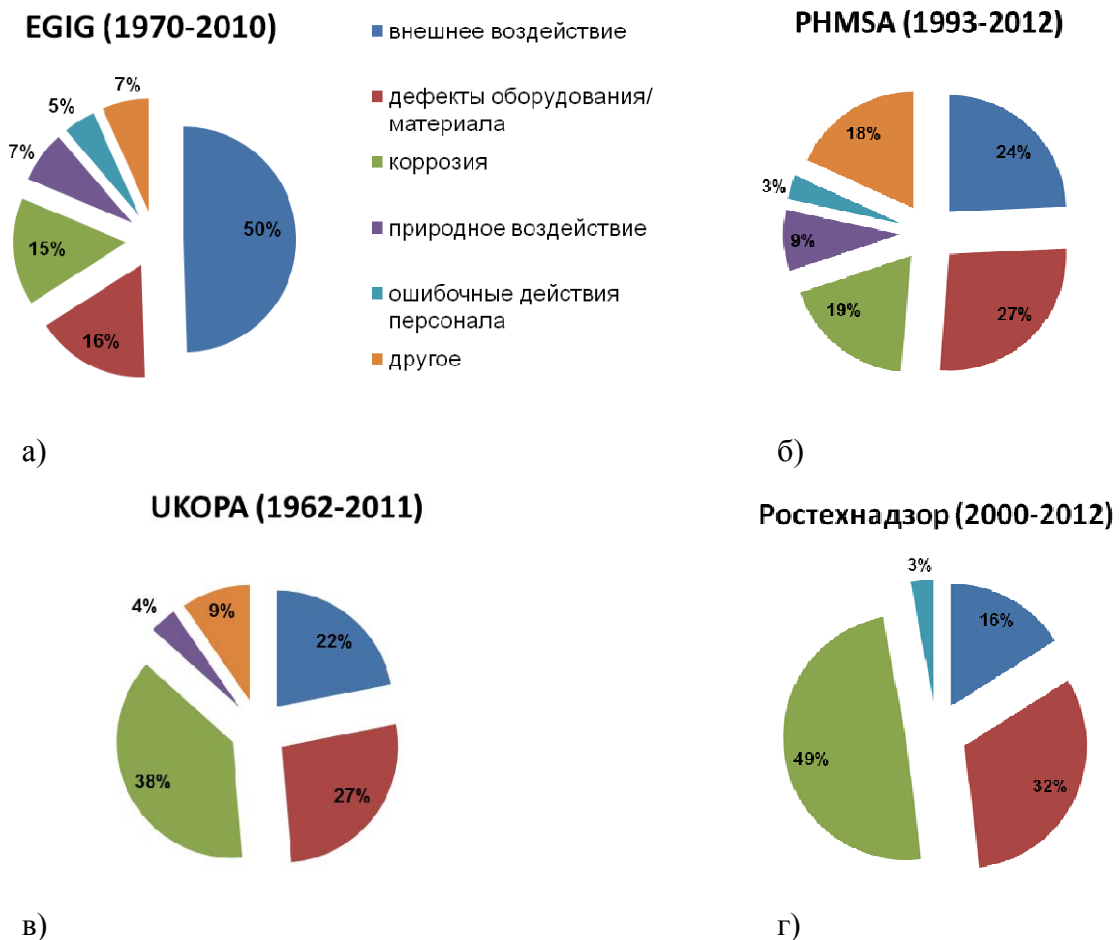
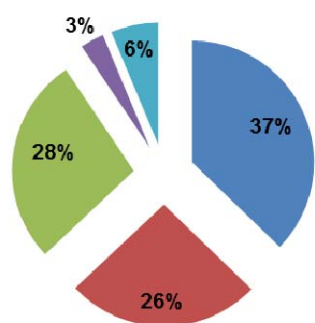
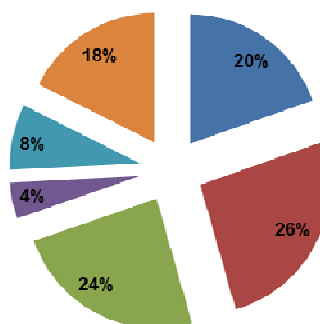


Рисунок 5а – Распределение числа аварий на магистральных газопроводах в зависимости от причин их возникновения
по данным: а) EGIG б) PHMSA в) UKOPA г) Ростехнадзора

CONCAWE (1971-2011)

а)

PHMSA (1993-2012)

б)

Ростехнадзор (1998-2012)

в)

Рисунок 5б – Распределение числа аварий на магистральных нефте- и нефтепродуктопроводах в зависимости от причин их возникновения, по данным:

а) CONCAWE б) PHMSA в) Ростехнадзора

В большинстве случаев наблюдаются сходные причины возникновения аварий, но есть и некоторые различия: несанкционированные врезки для хищения нефти и нефтепродуктов на российских МН/ МНПП, а также разрушения по причине коррозионного растрескивания под напряжением на российских МГ большого диаметра.

1.1.4 Оценка частоты образования дефектных отверстий разных размеров

Анализ степени тяжести последствий отказов действующих МГ позволяет классифицировать их по размерам и характеру проявления на три основных характерных типа разгерметизаций: свищ, трещина, разрыв [31].

Изучение опыта эксплуатации МГ показывает, что линейный размер продольных разрушений является в значительной мере случайной величиной, поэтому для ее

прогнозирования используются методы математической статистики. Исследования [32] показали, что характерный размер дефектного отверстия на МТ подчиняется двухпараметрическому распределению Вейбулла.

Поскольку официальные отчеты по авариям на российских МТ [22, 23] не содержат классификации по размерам отверстий разгерметизации, объемам и интенсивностям утечек, уточнение вероятностного распределения размеров дефектных отверстий было проведено на основе анализа отраслевой статистики по инцидентам и авариям на российских МН в рамках работы по актуализации Методического руководства по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах [33, 34]. Ниже (Рисунок 6) приведено полученное распределение частот ($f_m^{L_p}$) возникновения дефектных отверстий определенных размеров (L_p).

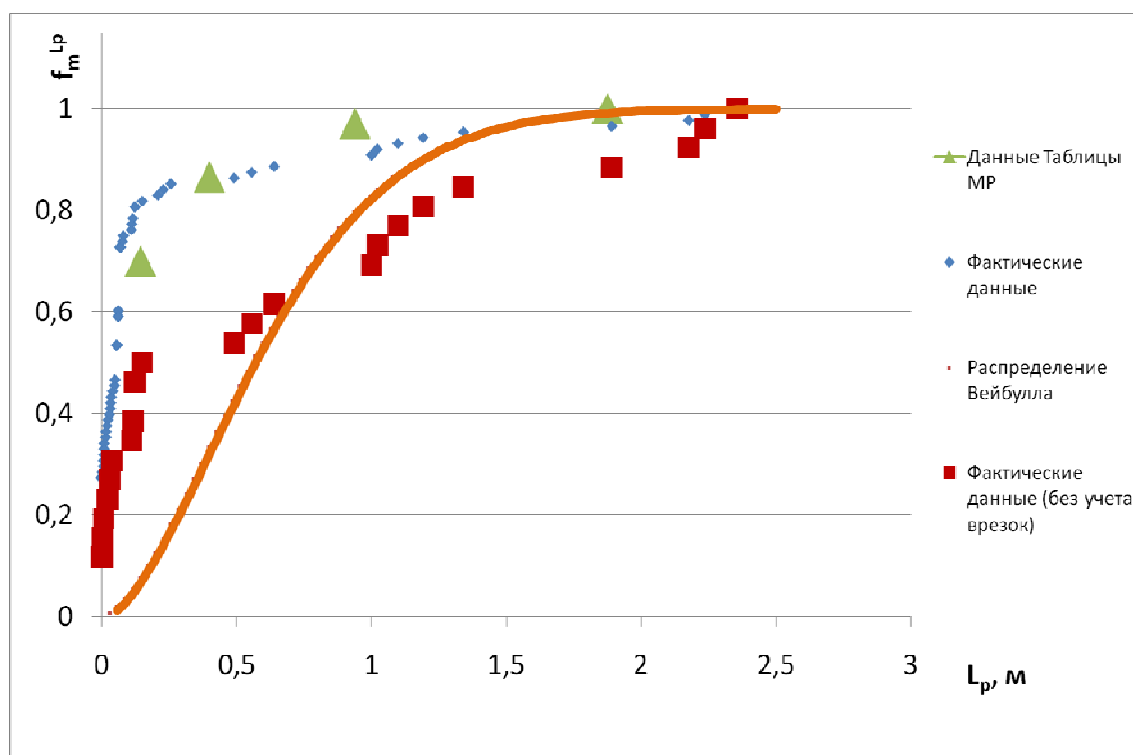


Рисунок 6 – Частота возникновения дефектного отверстия с характерным размером L_p

Из рисунка 6 видно, что распределение размеров аварийных отверстий по причинам, не связанным с несанкционированными врезками (красные квадраты на графике) хорошо аппроксимируется распределением Вейбулла (оранжевая линия на графике).

Среди эмпирических значений частот образования дефектных отверстий по всем возможным причинам (голубые ромбы на графике) были выделены 4 характерных размера дефектных отверстий [34] (зеленые треугольники на графике):

- свищ с характерным размером до 10-15 мм;
- малая трещина (до 0,3 DN);

- средняя трещина (до 0,75 DN);
- «гильотинный разрыв», крупная трещина (до 1,5 DN).

Полученные параметры дефектных отверстий и частоты их возникновения приведены ниже (Таблица 5).

Таблица 5 – Параметры дефектного отверстия в МТ и частота возникновения отверстия с данными параметрами

| Параметры дефектного отверстия | Частота возникновения отверстия с данными параметрами |
|--|--|
| свищ с характерным размером до 10-15 мм | 0,7 |
| малая трещина (до 0,3 DN) | 0,165 |
| средняя трещина (до 0,75 DN) | 0,105 |
| «гильотинный разрыв», крупная трещина (1,5 DN) | 0,030 |

Имеющиеся статистические данные по аварийности на европейских и американских МТ не позволяют сравнить распределение диапазона размеров дефектных отверстий по частоте их возникновения. Ограничения и трудности проведения такого анализа связаны с отличиями в классификации повреждений. Основные параметры аварийных отверстий из статистических баз [24-27] приведены ниже (Таблица 6).

Таблица 6 – Классификация основных повреждений на МТ по диапазону размеров аварийных отверстий

| База данных | Характеристика аварийного повреждения | | |
|--------------------|---|---|--|
| | Разрыв | Трещина | Свищ |
| UKOPA | > 110 мм | от 6 до 110 мм | < 6 мм |
| EGIG | > D | от 20 мм до D | < 20 мм |
| CONCAWE | > 75 мм | от 2 до 75 мм | < 2 мм |
| PHMSA | «полная разгерметизация участка трубопровода» | «утечка с отверстием, характерные размеры которого (длину, ширину или диаметр) можно уверенно определить» | «разгерметизация с отверстием, которое сложно увидеть невооруженным взглядом, и размеры которого можно охарактеризовать как крошечные» |

Различия в классификации повреждений по размерам, в т.ч. для «свищей» до 10 раз и «разрывов» до двух раз, а также различия в технологических параметрах и видах транспортируемых веществ не позволяют сравнивать данные по размерам отверстий разгерметизации между собой и с российскими данными.

1.1.5 Аварии с воспламенением

В отчетах EGIG [24] и UKOPA [25] представлены данные о доле инцидентов, которые приводят к воспламенению газа – 0,04 и 0,05 соответственно. Кроме того, в [24] отмечена зависимость частоты воспламенения утечки от ее объема: при разрывах газопроводов на полное сечение вероятность воспламенения возрастает до 0,13 (0,33 – при разрывах газопроводов DN > 400 мм).

В отчете CONCAWE [26] упоминаются 5 случаев пожара за весь период наблюдения, что соответствует условной вероятности воспламенения нефти/нефтепродуктов – 0,01.

Данные PHMSA [27] позволяют оценить условную вероятность воспламенения для различных видов транспортируемых веществ и для разных размеров аварийных отверстий. Результаты представлены ниже (Таблица 7 – Таблица 8).

Таблица 7 – Воспламенение аварийных утечек в зависимости от транспортируемого вещества

| Транспортируемое вещество | Общее число утечек⁶ | Число утечек с воспламенением | Условная вероятность |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Сырая нефть | 827 | 20 | 0,02 |
| Дизельное топливо | 125 | 2 | 0,02 |
| Мазут | 133 | 3 | 0,02 |
| Бензин | 358 | 18 | 0,05 |
| Широкая фракция легких углеводородов – ШФЛУ (NGL) | 141 | 19 | 0,14 |
| Сжиженный нефтяной газ – СНГ (LPG) | 121 | 26 | 0,22 |
| Газ | 738 | 83 | 0,11 |

⁶ Рассматриваются утечки на линейной части (включая трубопроводную арматуру) сухопутных жидкостных трубопроводов США за период с 1986 по 2001 гг. и сухопутных газопроводов за период 2002-2009 гг.

Таблица 8 – Воспламенение аварийных утечек в зависимости от размера отверстия разгерметизации

| Тип дефектного отверстия | Общее число утечек ⁷ | Число утечек с воспламенением | Условная вероятность |
|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| МН | | | |
| Свищи | 148 | 0 | < 0,01 |
| Трещины | 33 | 1 | 0,03 |
| Разрывы | 22 | 1 | 0,05 |
| МНПП | | | |
| Свищи | 79 | 0 | < 0,01 |
| Трещины | 49 | 0 | < 0,01 |
| Разрывы | 38 | 0 | < 0,01 |
| МТ СУГ | | | |
| Свищи | 40 | 1 | 0,03 |
| Трещины | 24 | 3 | 0,13 |
| Разрывы | 12 | 4 | 0,33 |
| Газопроводы | | | |
| Свищи | 105 | 5 | 0,05 |
| Трещины | 73 | 4 | 0,06 |
| Разрывы | 132 | 19 | 0,14 |

Таким образом, вероятность воспламенения можно оценить для нефти на уровне 0,01–0,03, газа – 0,05–0,14, СУГ – от 0,03–0,33 в зависимости от размера отверстия разгерметизации. Средняя вероятность воспламенения всех нефтепродуктов составляет 0,02, бензина – 0,05.

1.1.6 Оценка влияния конструктивных особенностей и условий окружения на аварийность

При наличии подробной статистической информации за достаточно большой промежуток времени можно отследить влияние технологических параметров МТ на аварийность.

⁷ Рассматриваются утечки на линейной части (включая трубопроводную арматуру) сухопутных МТ за период 2002-2009 гг.

В соответствии с информацией EGIG, CONCAWE, PHMSA (п.1.1.3) внешнее воздействие (деятельность третьих лиц) является основной причиной аварий на трубопроводах. В отчетах [24, 25, 26] исследуется влияние диаметра, толщины стенки трубы, глубины залегания и расположения трубопроводов (пригородная или сельская местность) на частоту разгерметизации по причине внешних воздействий. Ниже (Таблица 9) обобщены результаты оценки влияния конструктивных особенностей и условий окружения на аварийность.

Таблица 9 – Оценка влияния конструктивных особенностей и условий прокладки на аварийность по причине внешнего воздействия

| Технологический параметр | Влияние на частоту разгерметизации по причине внешнего воздействия (доля аварий) | | |
|--------------------------|--|------------|--------------|
| | EGIG [24] | UKOPA [25] | CONCAWE [26] |
| Диаметр: | | | |
| < 400 мм | 0,9 | 0,80 | 0,78 |
| > 1000 мм | 0,01 | <0,01 | 0,05 |
| Толщина стенки: | | | |
| < 5 мм | 0,77 | 0,76 | - |
| > 10 мм | 0,03 | 0,04 | - |
| Расположение: | | | |
| -городская черта | - | <0,01 | - |
| -пригородная зона | - | 0,8 | - |
| -пустынная местность | - | 0,2 | - |
| Глубина залегания: | | | |
| < 0,8 м | 0,7 | - | - |
| > 1,0 м | 0,12 | - | - |

Согласно зарубежным данным по аварийности на МТ толщина стенки и глубина залегания — доминирующие факторы устойчивости при воздействии, вызванном внешними причинами. В частности, повышенная толщина позволяет выдерживать механическое воздействие многих видов землеройной техники, а большая глубина затрудняет доступ к трубопроводу.

Анализ влияния толщины стенки трубы на аварийность по данным [24, 25] (Таблица 9) показал, что при увеличении толщины стенки до 10 мм и более интенсивность утечек по причине внешнего воздействия снижается в 20–25 раз.

Увеличение глубины залегания по данным [25] уменьшает вероятность аварии по причине внешнего воздействия до 5-6 раз. По данным [35] увеличение глубины залегания с 1 до 2 м снижает вероятность повреждений от внешнего воздействия в 10 раз в сельской местности и в 3,5 раза в пригородной зоне.

Интенсивность утечек в результате коррозии тоже зависит от толщины стенки (а также коррозионной активности грунта, типа покрытия). Так на трубопроводах с толщиной стенки трубы более 5 мм аварийность по причине коррозии в 3–6 раз ниже, чем на трубопроводах с меньшей толщиной стенки [24, 25].

В отчетах [24, 26] исследуется влияние возраста МТ на частоту разгерметизации по причине коррозии. Результаты анализа показали, что при регулярной внутритрубной диагностики и проведении плановых ремонтов старение трубопроводной системы не приводит к увеличению частоты утечек.

Следует отметить, что у изученных зависимостей и закономерностей есть существенные ограничения для применения при прогнозировании аварий на МТ, проектируемых и строящихся в России, ввиду их существенных технологических различий (диаметр, толщина стенки, антропогенные и природные условия), описанных в п.1.1.1.2. Кроме того, в материалах [24, 25, 26] отсутствуют статистические данные по трубопроводам большого диаметра и новым трубопроводам.

1.2 Крупные аварии и катастрофы на магистральных трубопроводах

Анализ статистических данных по аварийности (п.1.1) показывает, что аварии с гибелью людей на МТ – достаточно редкие события, однако в условиях прокладки МТ вблизи населенных пунктов, объектов производственной и транспортной инфраструктуры не исключена возможность поражения людей при аварии.

Особый общественный резонанс вызывают крупные аварии⁸ с групповой гибелью людей (Таблица 10). Они ведут к пересмотру представлений об опасностях промышленной деятельности, служат сигналом к ужесточению требований безопасности, внесению изменений в законодательную базу. Так, аварии 1960-80 гг. в США послужили причиной изменения законодательства о безопасности МТ. Аналогичные решения происходили и в России, особенно после наиболее крупной аварии на МТ под Уфой СССР в 1989 году. Из таблицы 10 видна

⁸ Здесь под термином «крупная авария» (в соответствии с критериями Всемирного Банка и других международных организаций) понимается выброс опасных веществ при разгерметизации МТ с последующим пожаром или взрывом, приводящий к гибели более 10 или травмированию более 100 человек.

тенденция последних 20 лет: перемещение крупных аварий и катастроф в нефтедобывающие страны Африки.

Таблица 10 – Некоторые известные крупные аварии на трубопроводах СССР, США, стран Европы, Африки, Латинской Америки

| Дата аварии | Место аварии | Описание аварии |
|---------------|---|--|
| 01.07.1959 г. | Мексика, штат Веракрус, Коацакоалькос | Взрыв и пожар на нефтепроводе. 12 человек погибли, более 100 ранены. |
| 19.07.1960 г. | США, штат Висконсин, Меррил | При проведении земляных работ произошла разгерметизация газопровода. Утечка газа с последующим взрывом стали причиной гибели 10 человек. |
| 04.03.1965 г. | США, штат Луизиана, Натчиточес ⁹ | Взрыв на 32-дюймовом газопроводе компании «Теннесси газ». Погибли 17 человек, 9 получили ранения. Причина — разгерметизация газопровода из-за коррозионного растрескивания под напряжением. |
| 29.05.1968 г. | США, штат Джорджия, Хэпвиль ¹⁰ | Бульдозер задел 1-дюймовый газопровод у детского сада, в результате чего произошел взрыв и пожар. Семь детей и двое взрослых погибли, трое детей получили серьезные ранения. |
| 04.06.1989 г. | СССР, Уфа ¹¹ | Авария на магистральном продуктопроводе (DN 700, P=3,5-3,8 МПа) под Уфой на перегоне между станциями Казаяк и Улу-Теляк на 1710-м км Куйбышевской железной дороги с выбросом и воспламенением паров ШФЛУ [36]. Расстояние дрейфа облака составило 900–1350 м. В зоне взрыва оказались два пассажирских поезда. В катастрофе погибли 575 человек, более 600 получили |

⁹ Эта авария вызвала большой общественный резонанс, так как на тот момент стала наиболее масштабной по количеству жертв. С целью защитить американцев от опасностей подобных аварий указом президента Линдона Джонсона в 1967 году было сформировано Национальное агентство по безопасности трубопроводов (DOT PHMSA).

¹⁰ Авария послужила толчком к принятию законопроекта (Н.В. 128), а, в последствии, закона (Georgia Law 1969, р. 50), обязывающего лиц, планирующих земляные работы вблизи трассы газопровода, уведомить об этом оператора газопровода.

¹¹ Следствие аварии – пересмотр представлений об опасностях аварий на МТ СУГ: десятикратное увеличение нормативных значений безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей (Изм.№ 3 в СНиП 2.05.06—85 «Магистральные трубопроводы», утв. постановлением Минстроя РФ от 10 ноября 1996 г. № 18-78).

| | | |
|---------------|---------------------------------|--|
| | | травмы различной степени тяжести. В районе взрыва образовалась зона сплошного завала леса площадью 2,5 км ² . В радиусе до 15 км от места взрыва в домах населенных пунктов были выбиты стекла, частично разрушены рамы и шиферные фронтоны. |
| 17.10.1998 г. | Нигерия, штат Дельта, Джесси | <p>Произошел взрыв трубопровода Нигерийской национальной нефтяной корпорации, перекачивающего бензин.</p> <p>Причина аварии – умышленное повреждение трубопровода. Жители ближайших деревень пришли к разрушенному трубопроводу для сбора разлившегося топлива. Произошли взрыв и пожар, в результате которых погибли около 1200 человек. Пожар удалось потушить только через неделю.</p> |
| 10.07.2000 г. | Нигерия, штат Дельта, Джесси | Разгерметизация трубопровода с последующим взрывом. Погибли около 250 человек. |
| 16.07.2000 г. | Нигерия, штат Дельта, Варри | При разрушении трубопровода и последующем взрыве погибли 100 жителей деревни. |
| 19.08.2000 г. | США, штат Нью-Мексико, Карлсбад | Воспламенение газа при разрыве 30-дюймового газопровода привело к гибели 12 человек, находившихся в кемпинге в 180 м от места аварии. На месте разрыва газопровода образовался котлован 16 м в ширину и 34 м в длину. 15-метровый участок трубы был вырван и выброшен из котлована в виде трех осколков (наибольший – на расстояние 87 м). Причина аварии – внутренняя коррозия. |
| 30.11.2000 г. | Нигерия, штат Лагос | Утечка нефтепродукта из трубопровода с последующим воспламенением. Погибли около 60 жителей рыбацкой деревни. |
| 19.06.2003 г. | Нигерия, штат Абия | При попытке хищения нефтепродукта из трубопровода произошел взрыв. Погибли 125 жителей близлежащей деревни. |
| 30.07.2004 г. | Бельгия, Брюссель | Утечка и взрыв газа на магистральном газопроводе DN 900 газоперерабатывающего завода в 40 км от Брюсселя. Цепь взрывов уничтожила две фабрики, оставив между заводами большой кратер. Тела погибших и обломки оборудования были разбросаны в радиусе 500 м от места катастрофы. На расстоянии до 150 м выгорели все припаркованные автомобили, растительность выгорела на расстоянии до 250 м. Действие взрывной волны ощущалось на расстоянии до 10 км от места аварии. Погибли 24 человека (на |

| | | |
|---------------|--|---|
| | | расстоянии до 200 м), более 120 получили серьезные ожоги и ранения. Большинство погибших — полицейские и пожарные, прибывшие на место утечки по тревоге. |
| 17.09.2004 г. | Нигерия, штат Лагос | При попытке хищения нефтепродукта из трубопровода произошел взрыв. Погибли десятки людей. |
| 12.05.2006 г. | Нигерия, штат Лагос | Произошел взрыв на нефтепроводе при попытке хищения нефти. Погибли около 150 человек. |
| 26.12.2006 г. | Нигерия, штат Лагос | Вандальные действия привели к взрыву нефтепровода. Погибли более 500 человек. |
| 16.05.2008 г. | Нигерия, штат Лагос | Бульдозером поврежден подземный нефтепровод. В результате взрыва и последующего пожара погибли около 100 человек. |
| 19.12.2010 г. | Мексика, Сан Мартин Тексмелукан де Лабастида | Взрыв на насосной станции Petroleos Mexicanos привел к разгерметизации нефтепровода с последующим истечением горячей нефти. Погибли 30 человек, 12 были ранены. Взрыв вызван неудачной попыткой врезки в нефтепровод в целях хищения нефти. |
| 12.09.2011 г. | Кения, Найроби | В промышленном районе Лунга Лунга разгерметизировался трубопровод Кенийской трубопроводной компании, перекачивающий бензин, дизельное и реактивное топливо. Часть топлива попала в реку. Люди в соседних густонаселенных трущобах Синая начали собирать вытекающее топливо. Топливо взорвалось, образовав гигантский огненный шар. Пожар распространился на близлежащие трущобы. Источник воспламенения — искры с горячей свалки. Около 100 человек погибли, 116 были госпитализированы с различной степенью ожогов. Тела погибших и фрагменты построек были найдены в 300 м от места взрыва. |

Из таблицы 10 видно, что при разгерметизации МТ, транспортирующих пожароопасные вещества, возможно возникновение аварий с поражающими факторами, гибелью и травмированием людей. Протяженность зон поражения зависит от свойств транспортируемого вещества, параметров его перекачки и условий окружающей среды в момент аварии, число пострадавших – от количества людей, находящихся в зоне действия поражающих факторов и адекватности их поведения в момент аварии.

Среди основных поражающих факторов, характерных для аварий на газопроводах (воздушная волна сжатия, разлет осколков, термическая радиация) наиболее значимым по размерам зон поражения является термическая радиация от горящих струй газа. Аварии на газопроводах характеризуются типичными зонами поражения, зависящими прежде всего от диаметра МГ и давления в трубопроводе [37] и редко приводят к гибели большого количества людей. Исключения составляют взрывы газа в сильно загроможденном пространстве или взрывы, повлекшие за собой дальнейшую эскалацию аварии.

Опасность при выбросах нефти и нефтепродуктов определяется возможностью их мгновенного или отложенного воспламенения с образованием горящего факела, пожара пролива, либо испарению с образованием облаков ТВС и их последующего воспламенения. Среди перечисленных аварий (Таблица 10) обращают на себя внимание многочисленные случаи взрывов при аварийной разгерметизации на МН и МНПП в Мексике, Нигерии и Кении, что, очевидно, связано с жарким климатом, способствующим при утечках образованию облаков ТВС из-за повышенной температуры окружающей среды. Большое количество пострадавших обусловлено напряженными социальными условиями близпроживающего населения. Данные опасности нельзя считать характерными для природно-климатических и социально-демографических условий современной России, однако при оценке безопасности МН /МНПП нельзя исключать возможность образования облаков ТВС и их воспламенения.

В отдельную категорию следует выделить аварии на продуктопроводах, транспортирующих легкоиспаряющиеся жидкости¹² (в том числе ШФЛУ, сжиженный нефтяной газ (СНГ), сжиженный пропан-бутан (СПБ) и другие СУГ). Повышенная опасность выбросов СУГ связана с их практически мгновенным вскипанием при аварийной разгерметизации МГ и образованием протяженных облаков тяжелых газов, способных распространяться у поверхности земли с сохранением способности к воспламенению на расстоянии в несколько километров.

Для оценки возможных зон поражения и исследования последовательности развития аварий и их исходов были изучены и проанализированы аварии с поражающими факторами на МГ опасных жидкостей и СУГ. Ниже приведены описания некоторых известных аварий с дрейфом и воспламенением паров СУГ и нефтепродуктов (бензин) и зоны действия поражающих факторов при произошедших авариях (Таблица 11).

¹² «Легкоиспаряющаяся жидкость» — опасная жидкость, образующая при попадании в атмосферу облако паров и имеющая при температуре 40 °С давление паров, превышающее 276 кПа [38].

Таблица 11 – Перечень аварий на МТ СУГ и МНПП с дрейфом и воспламенением

| Дата | Место аварии | Описание аварии и основные причины | Последствия аварии, максимальные зоны действия поражающих факторов | Число пострадавших, ущерб |
|---------------|--|---|---|--|
| 11.09.1962 г. | Итонтон, штат Джорджия, США | При строительстве дороги произошел разрыв 8-дюймового (200 мм) трубопровода с пропаном/ СНГ (LPG). Причина аварии – внешнее антропогенное воздействие (повреждение строительной техникой). | Пары пропана дрейфовали вдоль реки Окони на 10 миль (16 км) в озеро Синклер. Воспламенения паров не произошло. | 1 человек (дорожный рабочий) погиб, задохнувшись парами пропана. |
| 03.09.1968 г. | Графство Фултон, штат Иллинойс, США | Экскаватор угольной компании повредил 8 дюймовый (200 мм) трубопровод СНГ (LPG). | Воспламенение паров. | 1 человек погиб, 4 ранено. |
| 05.12.1968 г. | Юта, штат Небраска, США | Произошел разрыв трубопровода СНГ (LPG). Образовавшееся облако паров воспламенилось от движения транспортного средства. | Воспламенение паров. | Погибли 5 человек из числа ремонтного персонала. |
| 09.12.1970 г. | Порт-Хадсон, округ Франклин, штат Миссури, США | Произошел разрыв подземного трубопровода жидкого пропана DN 200 компании Phillips Pipeline с рабочим давлением P=6,5 МПа. Воспламенение и взрыв облака произошло, когда оно достигло расположенной в 300 м от места утечки насосной станции. Задержка воспламенения составила 24 мин. | В течение 24 мин. было выброшено 119 м ³ пропана. Взрывом в радиусе до 8 км были повреждены строения. Мощность взрыва составила около 50 т в тротиловом эквиваленте. | Пострадавших нет. |
| 20.06.1972 г. | Батлер, штат Алабама, США | Грейдер при проведении дорожных работ повредил трубопровод с пропаном под высоким давлением. Спустя некоторое время после разрыва трубопровода автомобиль въехал в образовавшееся облако. Произошло зажигание. | Воспламенение паров. | Погибли 4 человека. |
| 22.02.1973 г. | Остин, штат Техас, | Разрыв трубопровода ШФЛУ (NGL) | Воспламенение паров. | Погибли 6 |

| Дата | Место аварии | Описание аварии и основные причины | Последствия аварии, максимальные зоны действия поражающих факторов | Число пострадавших, ущерб |
|---------------|----------------------------------|---|--|---|
| | США | произошел вследствие неправильной сварки. | | человек. |
| 12.05.1975 г. | Деверс, штат Техас, США | Разрыв трубопровода ШФЛУ (NGL) вследствие предыдущих механических повреждений. Произошло воспламенение облака паров ШФЛУ. | Воспламенение паров. | Погибли 4 человека |
| 02.08.1975 г. | Ромул, штат Мичиган, США | Разрыв трубопровода СНГ (LPG) из-за предыдущих механических повреждений и повышения давления вследствие ошибки оператора. Произошло воспламенение облака паров СНГ. | Воспламенение паров. | 9 человек были ранены |
| 25.02.1976 г. | Уитарел, штат Техас, США | Разрыв трубопровода СНГ (LPG) привел к образованию парогазового облака и его последующему воспламенению. Причиной аварии предположительно стало некачественное сварное соединение. | Воспламенение паров. | Погибли 5 человек, уничтожено 2 дома. |
| 20.07.1977 г. | Руф-Крик, штат Пенсильвания, США | Произошел разрыв трубопровода СНГ (LPG) диаметром 12 дюймов (300 мм) 3,1 МПа от коррозионной трещины (стресс-коррозия). В результате аварии образовалось облако паров пропана. Проезжавший мимо грузовик при попадании в облако заглох. Искры, возникшие при запуске двигателя, привели к воспламенению облака. | Радиус пожара-вспышки составил около 100 м. Огонь распространился вдоль русла реки в нижнюю часть долины и сжег всю растительность на расстоянии более 1,5 км. В месте разрыва высота пламени достигала 30 м. Пожар продолжался в течение 14 часов, пока не выгорели углеводороды в отсеченной части трубопровода. | 2 человека погибли (водитель и пассажир грузовика). |
| 04.08.1978 г. | Донельсон, штат | Произошел разрыв трубопровода СНГ (LPG) с | Воспламенение паров. | Погибли 3 |

| Дата | Место аварии | Описание аварии и основные причины | Последствия аварии, максимальные зоны действия поражающих факторов | Число пострадавших, ущерб |
|---------------|--|---|--|---|
| | Айова, США | последующим воспламенением. Облако паров воспламенилось через несколько минут после разрыва. | | человека, 2 человека получили тяжелые ожоги. |
| 15.03.1983 г. | Западная Одесса, штат Техас, США | 8-дюймовый трубопровод СНГ (LPG) был поврежден при проведении земельных работ. Через 3 минуты после разгерметизации СНГ, истекающий из трубопровода под давлением 1060 Psi (7,3 МПа) воспламенился. | Выгорело около 1000 м ³ СНГ. Высота пламени достигла 600 футов (180 м) | 5 человек погибли и 5 ранены. Сгорело 2 мобильных дома, каркасный дом, грузовик и 2 автомобиля. |
| 13.03.1990 г. | Северный Бленхейм, Нью-Йорк, США | Произошел разрыв трубопровода жидкого пропана диаметром 8 дюймов (200 мм). Образовавшееся при аварии облако газа дрейфовало вдоль дороги по направлению к городу и воспламенилось. | Воспламенение паров. | 2 человека погибли, 7 были ранены. Оцененный ущерб превысил 4 млн. долл. |
| 24.08.1996 г. | Ливели, штат Техас, США | Произошел разрыв трубопровода СНГ (бутан) диаметром 8 дюймов (200 мм), эксплуатируемого компанией Koch Pipeline. Пары бутана воспламенились, когда двое подростков на автомобиле въехали в облако. Утечка была вызвана внешней коррозией. | Воспламенение паров. | 2 человека погибли на месте, 25 семей были эвакуированы. |
| 10.07.1999 г. | Беллингем (Bellingham), шт. Вашингтон, США | В результате разрушения трубопровода, перекачивающего бензин (диаметр 400 мм, дата постройки 1966 год), в районе русла одного из притоков ручья Ватком (Whatcom) произошел выброс около 1000 м ³ бензина. Бензин и его пары распространились вниз по | По свидетельству некоторых очевидцев наблюдалось высокое пламя наподобие «огненного шара», и множественные взрывы. По одному из свидетельств | Погибло три человека (два ребенка 10 лет и подросток 18 лет), находившиеся в |

| Дата | Место аварии | Описание аварии и основные причины | Последствия аварии, максимальные зоны действия поражающих факторов | Число пострадавших, ущерб |
|---------------|--------------------|--|--|--|
| | | <p>течению ручья на расстояние нескольких километров. Благодаря тому, что ручей и его приток протекали в низине, создались благоприятные условия для формирования облака ТВС. При появлении источника зажигания (существует две версии зажигания: дети, игравшие с огнем, и станция водоснабжения, расположенная недалеко от места выброса) произошел взрыв, за которым последовал пожар, продолжавшийся несколько часов и сопровождавшийся повторными возгораниями.</p> | <p>«пламя совершало прыжки по ручью как лягушка». По данным аэрофотосъемки размеры зоны поражения, расположенной вдоль ручья в низине, составили до 2,5 км протяженностью и до 70-150 м шириной.</p> | <p>зоне поражения в момент аварии. Погибшие дети находились ниже по течению на 1,1 км от места разрушения трубопровода и сами смогли выйти из зоны пожара, после чего были доставлены в больницу с ожогами площадью около 90 % кожи, где скончались.</p> |
| 07.09.2000 г. | Абилен, штат Техас | <p>Бульдозер разрушил продуктопровод ШФЛУ (NGL) диаметром 12 дюймов (300 мм), принадлежащий компании Exxon Mobil. Трубопровод не был отмечен на картах землепользования. Произошел пожар и взрыв.</p> | Воспламенение паров. | <p>1 человек (пожарный) погиб от полученных ожогов, 1 человек ранен (женщина спаслась, прыгнув в бассейн).</p> |

| Дата | Место аварии | Описание аварии и основные причины | Последствия аварии, максимальные зоны действия поражающих факторов | Число пострадавших, ущерб |
|---------------|------------------------------|---|--|--|
| 01.11.2007 г. | Кармайл, штат Миссисипи, США | <p>Произошел разрыв трубопровода сжиженного пропана диаметром 12 дюймов (300 мм) компании Dixie Pipeline с давлением 10 МПа. Облако ТВС достигло близлежащих домов и воспламенилось.</p> <p>Причиной аварии стала некачественная сварка, которая вызвала разрушение трубы вдоль продольного сварного шва, частично кольцевого шва и части соседних стыков труб.</p> | Воспламенение паров. | <p>2 человека погибли, 7 человек получили ранения. 4 дома были разрушены. Материальный ущерб в результате аварии составил 3,4 млн. долл.</p> |

Анализ данных по произошедшим авариям показал, что наибольшую опасность для людей представляют аварии с отложенным воспламенением, позволяющим сформироваться протяженным облакам ТВС. В этом случае возможна гибель людей вследствие поражения открытым пламенем и тепловым излучением пожара-вспышки. Случаев гибели людей от воздействия ударной волны при авариях на МНПП и МТ СУГ не зафиксировано.

Следует отметить, что при наличии особенностей рельефа местности, препятствующих рассеянию (овраги, русла рек, уклоны), сформировавшееся при аварийной разгерметизации облако ТВС способно дрейфовать на значительные расстояния (до нескольких километров).

Выводы к главе 1

В главе представлен аналитический обзор статистических данных по аварийности и обзор уникальных крупных аварий на МТ.

1. На основании анализа статистических данных по аварийности на МТ России (Ростехнадзор), США (PHMSA) и стран Европы (EGIG, CONCAWE, UKOPA):

а) определена фоновая интенсивность аварий, характеризующая современное состояние аварийности на российских МТ – около 0,1 ав./год/1000 км;

б) выявлено сходство (с точностью до порядка величины) по удельным показателям аварийности на российских и зарубежных МТ;

в) оценены показатели риска гибели людей при авариях на российских МТ:

условная вероятность аварий с гибелью людей (0,01÷0,06);

интенсивность аварий с гибелью людей (0,002÷0,010 ав./год/1000 км);

интенсивность аварий с гибелью людей (0,005÷0,014 чел./год/1000 км).

г) установлены характерные отличия в причинах возникновения аварий на российских МТ по сравнению с зарубежными аналогами – врезки для хищения на МН/ МНПП, коррозионное растрескивание под напряжением – на МГ большого диаметра.

д) выявлены и проанализированы отличия в технологических параметрах российских и зарубежных МТ (основные из них – диаметр и толщина стенки трубопроводов), и ограничения, которые накладывают эти отличия для использования (экстраполяции) западной статистики для МТ РФ (в первую очередь – при оценке влияния конструктивных особенностей на аварийность);

е) на основе анализа отраслевой статистики по инцидентам и авариям на российских МТ оценены доли аварийных разгерметизаций с характерными размерами дефектных отверстий: «свищ» – 0,7, малая трещина – 0,165, средняя трещина – 0,105, крупная трещина характерным размером до 1,5 DN – 0,030;

ж) оценены вероятности воспламенения при аварийной разгерметизации для различных транспортируемых веществ: для нефти – 0,01-0,03, нефтепродуктов – 0,02, СУГ – 0,03-0,33 (в зависимости от размера отверстия разгерметизации).

Полученные при анализе статистические данные по интенсивности аварий, размерам аварийных отверстий и вероятностям воспламенения утечек в дальнейшем использованы в работе при оценке частоты возникновения аварий и уточнения типового дерева событий развития аварий на МТ.

2. Качественное описание некоторых известных крупных аварий на МТ с гибелью

людей показало, что при оценке безопасности объектов МТ (в т.ч. при определении безопасных расстояний) следует принимать во внимание социальные и экономические последствия катастрофических (максимальных гипотетических) аварий. Несмотря на относительную редкость подобных аварий, их следует включать в моделирование возможных аварийных ситуаций при обосновании безопасности.

В работе были изучены и проанализированы аварии с поражающими факторами на МТ опасных жидкостей и СУГ. Анализ показал, что при разгерметизации МТ СУГ возможно образование пожаровзрывоопасных облаков ТВС, причем зоны действия поражающих факторов при известных авариях достигали нескольких километров.

Таким образом, знания о крупных авариях дают представление, прежде всего о возможных зонах поражения, о последовательности развития аварий и их исходах, а также позволяют оценить защищенность людей от максимальных последствий аварий.

ГЛАВА 2. ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ОТ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДО ОБЪЕКТОВ С ПРИСУТСТВИЕМ ЛЮДЕЙ

Несмотря на имеющийся практический опыт обеспечения промышленной безопасности и многолетнюю тенденцию к снижению интенсивности аварий на магистральных нефтегазовых трубопроводах в России и за рубежом (раздел 1.1), проявления факторов опасности при эксплуатации МТ, связанных с пожаровзрывоопасными свойствами транспортируемых углеводородов в условиях прокладки МТ вблизи населенных пунктов, объектов производственной и транспортной инфраструктуры, не исключают возможность возникновения аварий с катастрофическими последствиями (раздел 1.2).

С целью предотвращения таких последствий в практике проектирования и эксплуатации МТ внедряются защитные меры, направленные, прежде всего, на повышение надежности системы МТ. Однако практически исключить разгерметизацию участка трубы невозможно даже посредством внедрения дорогостоящих мероприятий (использование защитных кожухов, технологий «труба в трубе»), применяемых для наиболее ответственных и опасных участков, например, мест переходов МТ через авто- и железные дороги.

Радикальным способом защиты людей от воздействия опасных факторов аварий является защита расстоянием – проектирование и строительство опасных производственных объектов (ОПО) на безопасном расстоянии¹³ от объектов с присутствием людей¹⁴.

В целях обеспечения безопасности людей в условиях ландшафтных и/или инфраструктурных ограничений в качестве компромисса могут устанавливаться минимально безопасные расстояния (МБР) от оси линейной части магистрального трубопровода до объектов с присутствием людей, например, с ограничением по потенциальному или индивидуальному риску гибели людей. В отличие от безусловно безопасных расстояний, оцениваемых по зонам МГА, минимально безопасные расстояния являются безопасными условно. В данном случае условием является приемлемость риска гибели людей. Также условием может являться применение компенсирующих мероприятий на высокоопасных участках сближений МТ с объектами с присутствием людей.

¹³ Под безопасным расстоянием понимается расстояние, на котором исключено смертельное поражение человека от опасных факторов аварий.

¹⁴ Объекты с присутствием людей (ОПЛ) – населенные пункты, здания, сооружения, транспортные пути и другие объекты с постоянным или временным присутствием людей

После установления МБР должны соблюдаться как при размещении МТ по отношению к зданиям, строениям и сооружениям других производственных объектов и объектов транспортной и социальной инфраструктуры, так и при застройке прилегающих к эксплуатируемым МТ территорий [39, 40].

2.1 Обзор существующих подходов размещения нефтегазовых трубопроводов в непосредственной близости от городских (густонаселенных) территорий

2.1.1. Размещение российских нефтегазовых магистральных трубопроводов вблизи объектов с присутствием людей

В России минимальные расстояния от оси трубопровода до населенных пунктов, зданий и сооружений задаются в зависимости от технологических параметров МТ (транспортируемое вещество, класс, диаметр), степени уязвимости и значимости объектов воздействия, необходимости и достаточности обеспечения их безопасности. В соответствии со СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы» минимальные расстояния от МГ составляют (в зависимости от диаметра) от 100 до 350 м от МН – от 75 до 200 м (Таблица 12, Таблица 13).

Для МТ СУГ важную роль в установлении минимальных расстояний сыграла уфимская транспортная (ж/д и трубопровод) катастрофа 1989 г., следствием которой стало более чем десятикратное увеличение нормативных значений безопасных расстояний: для МТ СУГ DN 150 – DN 400: со 150 – 500 до 2000 – 5000 м до городов и поселений городского типа), а также введено ограничение на предельный диаметр МТ СУГ – 400 мм (Таблица 14). Установление безопасных расстояний после опыта крупных аварий – традиционный подход обеспечения безопасности. К его основному достоинству можно отнести наличие эмпирического базиса (требования «записаны кровью» аварии), а среди минусов отметить значительную пессимистичность («у страха глаза велики»).

Со временем трагические знания о подобных уникальных авариях постепенно «выталкиваются на обочину» прогресса. Так, например, в ходе реформы технического регулирования¹⁵ табл. 4* и 20* СНиП 2.05.06–85*, регламентирующие минимальные расстояния от оси МТ до населенных пунктов, отдельных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, зданий и сооружений, не включены в Перечень национальных стандартов и сводов правил и стали носить рекомендательный характер. При этом опасность крупных промышленных аварий никуда не исчезает, наоборот, для ее

¹⁵ Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 21 июня 2010 г. № 1047-р

адекватного восприятия в «межаварийный период» требуются другие обоснованные подходы установления безопасных расстояний.

В современной российской практике существуют и другие способы обоснования минимальных безопасных расстояний (см. далее раздел 2.2), но они пока имеют ограниченное применение в рамках разработки Специальных технических условий на проектирование (СТУ), в том числе отдельных объектов МТ СУГ.

Таблица 12 – Расстояния от оси МГ до объектов, зданий и сооружений в соответствии с табл. 4* СНиП 2.05.06-85*

| Объекты, здания и сооружения | Минимальные расстояния, м, от оси МГ ¹⁶ условным диаметром, мм | | | | | |
|---|---|---------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | 300 и менее | от 300 до 600 | от 600 до 800 | от 800 до 1000 | от 1000 до 1200 | от 1200 до 1400 |
| 1. Города и другие населенные пункты; дачные поселки; отдельные промышленные и сельскохозяйственные предприятия; гаражи и стоянки на 20 и более автомобилей; отдельно стоящие здания с массовым скоплением людей; жилые здания 3-этажные и выше; железнодорожные станции, аэропорты; морские и речные порты и пристани. | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
| 2. Железные дороги общей сети и автодороги I-III категорий; отдельно стоящие жилые здания 1-2-этажные; садовые домики, дачи; дома линейных обходчиков; с/х фермы и проч. | 75 | 125 | 150 | 200 | 225 | 250 |
| 3. Отдельно стоящие нежилые и подсобные строения; гаражи и открытые стоянки на 20 автомобилей и менее; железные дороги промышленных предприятий; автомобильные дороги III-V категорий. | 30 | 50 | 100 | 150 | 175 | 200 |

¹⁶ МГ I класса (с рабочим давлением свыше 2,5 до 10,0 МПа включ.)

Таблица 13 – Расстояния от оси МН до объектов, зданий и сооружений в соответствии с табл. 4* СНиП 2.05.06-85*

| Объекты, здания и сооружения | Минимальные расстояния, м, от оси МН условным диаметром, мм | | | |
|---|---|----------------|-----------------|------------------|
| | 300 и менее | св. 300 до 500 | св. 500 до 1000 | св. 1000 до 1400 |
| 1. Города и другие населенные пункты; дачные поселки; отдельные промышленные и сельскохозяйственные предприятия; гаражи и стоянки на 20 и более автомобилей; отдельно стоящие здания с массовым скоплением людей; жилые здания 3-этажные и выше; железнодорожные станции, аэропорты; морские и речные порты и пристани. | 75 | 100 | 150 | 200 |
| 2. Железные дороги общей сети и автодороги I-III категорий; отдельно стоящие жилые здания 1-2-этажные; садовые домики, дачи; дома линейных обходчиков; с/х фермы и проч. | 50 | 50 | 75 | 100 |
| 3. Отдельно стоящие нежилые и подсобные строения; гаражи и открытые стоянки на 20 автомобилей и менее; железные дороги промышленных предприятий; автомобильные дороги III-V категорий. | 30 | 30 | 30 | 50 |

Таблица 14 – Расстояния от оси МТ СУГ до объектов, зданий и сооружений в соответствии с табл. 20* СНиП 2.05.06-85*

| Объекты, здания и сооружения | Минимальное расстояние, м, до оси МТ СУГ условным диаметром, мм | | | |
|--|---|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | до 150 включ. | от 150 до 300 включ. | от 300 до 500 включ. | от 500 до 1000 включ. |
| 1. Города и поселения городского типа. | 2000 (150) ¹⁷ | 3000 (250) | 5000 (500) | н/о (1000) |
| 2. Сельские поселения, дачные поселки, отдельные промышленные и сельскохозяйственные предприятия, гаражи и открытые стоянки на 20 и более автомобилей, отдельно стоящие здания с массовым скоплением людей, жилые 2-этажные здания и выше; железнодорожные станции, аэропорты, морские и речные порты; железные дороги общей сети и автомобильные дороги общего пользования I категории мосты железных дорог общей сети, автомобильных дорог общего пользования I и II категорий. | 1000 (150) | 2000 (250) | 3000 (500) | н/о (1000) |
| 3. Отдельно стоящие жилые дома до двух этажей, сельскохозяйственные фермы, полевые станы реки с шириной более 25 м, судоходные реки, автомобильные дороги общего пользования II, III категорий, мосты железных дорог промышленных предприятий и проч. | 300 (100) | 500 (175) | 800 (350) | н/о (800) |

¹⁷ До (в скобках) и после внесения Изменения № 3, утв. постановлением Минстроя РФ от 10 ноября 1996 г. № 18-78

2.1.2. Зарубежный опыт по размещению трасс трубопроводов на густонаселенных территориях

С целью анализа зарубежных подходов к безопасному размещению трубопроводов, пересекающих густонаселенные территории, были рассмотрены стандарты США, Канады, Австралии, Великобритании, Германии и Японии, регламентирующие вопросы безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации МТ [41]. Основные результаты анализа представлены ниже (Таблица 15).

Таблица 15 – Безопасные расстояния и другие законодательно установленные способы обеспечения безопасности при прокладке МТ на густонаселенных территориях

| Страна (вид МТ) | Классификация территорий | Требования по безопасным расстояниям | Способы обеспечения безопасности при прокладке МТ на густонаселенных территориях | Нормативные документы |
|---|---|---|--|--------------------------|
| США (газопроводы) | Деление территорий вдоль МТ на 4 класса по плотности застройки | Не установлены | <ul style="list-style-type: none"> - ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной $0,72 \pm 0,4$ от нормативного предела текучести металла трубы; - уменьшение расстояния между задвижками (с 16 до 4 км); - увеличение глубины заложения/ высоты засыпки; - ограничение рабочего давления | [42] |
| США (нефте-, продуктопроводы, МТ СУГ) | - | 15 м от жилых домов, промышленных зданий и мест скопления людей | Требование по соблюдению безопасных расстояний (15 м) может быть отменено при дополнительном заглублении МТ на 0,3 м | |
| Канада | Деление территорий вдоль МТ на 4 класса по плотности застройки (аналогично МГ США) | Не установлены | <ul style="list-style-type: none"> - уменьшение расчетного давления; - уменьшение расстояния между задвижками (с 25 до 8 км); - увеличение глубины заложения/ высоты засыпки; - ограничение рабочего давления; - контроль за землепользованием. | [43] |
| Австралия | Деление территорий вдоль МТ на категории (4 класса, 5 подклассов) в зависимости от типа застройки, плотности коммуникаций | Не установлены | <ul style="list-style-type: none"> - определено минимальное количество мер для предотвращения внешнего воздействия: 2 технических (альтернативы: глубина заложения, ограждение, увеличение толщины стенки, бетонное покрытие и др.) и 2 организационных (альтернативы: установка оповещающих знаков, информирование населения, патрулирование, ограничение проведения | [44] |

| Страна (вид МТ) | Классификация территорий | Требования по безопасным расстояниям | Способы обеспечения безопасности при прокладке МТ на густонаселенных территориях | Нормативные документы |
|--------------------------------|--|--|--|--------------------------|
| | | | <p>работ вблизи трубопровода сторонними организациями и др.);</p> <ul style="list-style-type: none"> - уменьшение расстояния между задвижками (с 30 до 15 км); - для производства труб используют металл с минимальным пределом текучести, исключая возможность образования разрывов и крупных трещин при максимально допустимом рабочем давлении. | |
| Германия | - | \leq DN 150 - 4 м $>$ DN 150 \leq DN 400 - 6 м $>$ DN 400 \leq DN 600 - 8 м $>$ DN 600 - 10 м | <ul style="list-style-type: none"> -увеличение толщины стенки; - ограничение рабочего давления; - уменьшение расстояния между задвижками (с 18 до 10 км). | [45, 46] |
| Великобритания (МН) | - | Безопасные расстояния задаются при проектировании с целью обеспечения беспрепятственного доступа при строительстве, а также технического обслуживания и ремонта в процессе эксплуатации, и доступа в случае аварии (но не менее 3 м) | - ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной 0,72÷0,3 от нормативного предела текучести металла трубы. | [47, 48, 49] |
| Великобритания (МГ, МТ СУГ) | Деление территорий вдоль МТ на категории в зависимости от плотности населения (3 класса) | Безопасные расстояния задаются при проектировании: а) по контурам индивидуального риска [49] (10^{-5} 1/год); б) для МГ в зависимости от допустимого рабочего давления и диаметра МГ по графикам в | Прокладки трубопроводов через густонаселенные районы (3 класс) следует избегать. <ul style="list-style-type: none"> -уменьшение расчетного давления; - ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной 0,72÷0,3 от нормативного предела текучести металла трубы; - увеличение толщины стенки. | [47, 48, 49] |

| Страна (вид МТ) | Классификация территорий | Требования по безопасным расстояниям | Способы обеспечения безопасности при прокладке МТ на густонаселенных территориях | Нормативные документы |
|--------------------|-----------------------------|--|---|--------------------------|
| | | <p>соответствии с IGE/TD/1 [47].</p> <p>в) в зависимости от рабочего давления, диаметра МТ, толщины стенки, расчетного коэффициента по пределу текучести и вида транспортируемого вещества:</p> <ul style="list-style-type: none"> - при уровне кольцевых напряжений $\leq 0,72$ в соответствии с [48], ниже оценка: МТ ШФЛУ – до 100 м; аммиакпровод – до 200 м. - при толщине стенки $\geq 11,9$ мм и уровне кольцевых напряжений $\leq 0,3$: МГ – 3 м; МТ СНГ – 5,5 м; МТ ШФЛУ – 7 м; аммиакпровод – 14 м. | | |
| Япония | - | <p>Нормируются только для надземных трубопроводов до мест с массовым скоплением людей:</p> <ul style="list-style-type: none"> - железных дорог – 25 м; - школ, домов престарелых, больниц, театров, кинотеатров, ж/д станций, магазинов – 45 м; - достопримечательностей – 65 м. | <ul style="list-style-type: none"> - расположение задвижек через 1 км; - задается номинальная толщина стенки для каждого типоразмера труб | [50] |

Анализ зарубежных документов (Таблица 15) показал, что в ряде стран (Канада, Австралия, США) отсутствуют законодательно установленные минимальные безопасные расстояния между трубопроводами и объектами с присутствием людей.

Вместо этого в областях с высокой плотностью населения на стадии проектирования предусматриваются дополнительные технические требования по обеспечению безопасности (например, снижение рабочего давления, увеличение толщины стенки, уменьшение расстояния между задвижками, увеличение минимального заглубления и т.д.), требования к мониторингу (например, частота патрулирования, чувствительность системы обнаружения утечек и т.д.), контролю землепользования (установление запретных и охранных зон).

Японские правила регламентируют минимальные безопасные расстояния до мест с массовым скоплением людей только для надземных трубопроводов.

В Германии, где безопасные расстояния напрямую задаются в нормативных документах, целью их установления является не защита населения, а прежде всего защита самих трубопроводов от внешнего воздействия со стороны третьих лиц.

Стандарты Великобритании предполагают два подхода к оценке минимальных безопасных расстояний:

- по уровню индивидуального риска гибели людей от опасных факторов аварий на МТ (безопасным считается расстояние, на котором человек подвергается риску от аварии, равному бытовым рискам, в т.ч. автомобильных аварий, пожаров, падений с высоты, огнестрельных ранений, поражений электрическим током, утоплений – 10^{-5} год⁻¹);
- в зависимости от технологических параметров и надежности трубопровода.

Сравнение предлагаемых британскими стандартами зон [47-49] с зонами действия поражающих факторов при авариях на МТ (раздел 1.2) и [51-53], можно сделать вывод, что предлагаемые расстояния не могут обеспечить безопасность населения при возникновении аварии, т.е. фактически безопасными не являются.

В ряде публикаций [51-53], касающихся безопасности МТ, по мнению западных экспертов, представляется заключение, что установление «действительно безопасных расстояний», гарантирующих отсутствие пострадавших и погибших при авариях, невозможно (вероятно ввиду существующей плотной застройки и частной собственности на землю).

Также следует отметить, что в большинстве промышленно развитых странах землепользование в большей степени регулируется условиями договоров, заключенными между владельцами трубопроводов и землевладельцами, чем специальными нормативными правовыми документами в сфере промышленной безопасности.

Правила [42-50] имеют сходные подходы к регулированию вопросов размещения трубопроводов в городах. Их целью является не установление безопасных расстояний между трубопроводами и объектами воздействия, а уменьшение вероятности возникновения крупных аварий в густонаселенных районах путем ужесточения требований по обеспечению надежности таких трубопроводов (Таблица 15).

Таким образом, анализ зарубежной практики показал фактический отказ от установления безопасных расстояний между трубопроводами и объектами воздействия в пользу сокращения времени случайного нахождения людей в опасных зонах и снижения вероятности перерастания инцидентов в крупные аварии – «защита временем».

2.2 Способы установления безопасных расстояний от магистральных трубопроводов до объектов с присутствием людей

Рассмотрение существующих подходов и анализ возможных способов определения безопасных расстояний от МТ до объектов с присутствием людей указывает на их непосредственное сопоставление с возможными зонами действия поражающих факторов аварий на МТ, которые устанавливаются на основе:

1. фактических данных о наблюдавшихся зонах поражения происшедших крупных промышленных аварий на МТ (фактологический или апостериорный подход);
2. расчета зон поражения при МГА на МТ (типовом и/или заданном);
3. оценки риска гибели людей и/или иных ущербов от аварии на типовом и/или заданном МТ.

Адекватность получаемых оценок размеров безопасных расстояний в первом случае базируется на представительности статистических данных об известных крупных авариях на МТ, во втором — определяется степенью консервативности при выборе рассчитываемого сценария МГА и использовании подходящих расчетных методик, в третьем — на учете вероятности возникновения аварии с различными последствиями и выборе критериев приемлемого (допустимого) риска. В любом из этих подходов могут использоваться «коэффициенты запаса», компенсирующие неполноту существующих знаний и представлений.

Первым, наиболее распространенным и устоявшимся способом определения минимальных безопасных расстояний является т.н. фактологический (эмпирический) или апостериорный подход – определение безопасных расстояний исходя из опыта произошедших аварий на аналогичных объектах. Этот подход частично (совместно с моделированием) реализован в нормах СНиП 2.05.06–85* «Магистральные трубопроводы» (см. раздел 2.1).

В данном случае достаточно представительный «аварийный эксперимент» имеет место только для МГ [23]: анализ произошедших достаточно многочисленных аварий позволяет сделать вывод, что размеры зон максимального поражения людей при авариях на МГ (разлет осколков, тепловое излучение от горения струй) не превышают 100 – 350 м от оси трубы и в первом приближении может определяться диаметром МГ и рабочим давлением в трубопроводе (раздел 2.1, Таблица 12).

Для МН представительная статистика по зонам поражения при авариях отсутствует, поэтому данный способ не подходит, а определение зон поражения скорее носит гипотетический характер экспертной оценки (раздел 2.1, Таблица 13).

Трагический опыт единичной аварии с катастрофическими последствиями под Уфой в 1989 г. (глава 1.2) ярко обозначил повышенную аварийную опасность выбросов СУГ. Следствием этой катастрофы явилось десятикратное увеличение нормативных значений безопасных расстояний от МГ СУГ до объектов с присутствием людей (см. раздел 2.1, Таблица 14).

Второй способ установления минимальных безопасных расстояний для МГ — расчет зон поражения при МГА с рассмотрением конкретного (или типового) участка трубопровода (профиль трассы, задвижки и т.д.), свойств транспортируемых углеводородов, технологических параметров, условий окружающей среды и действий по локализации и ликвидации аварии. «Коэффициент запаса» по безопасности в этом случае неявно заложен в допущениях и предположениях о возникновении и развитии аварии и определяется степенью консервативности при выборе рассчитываемого сценария МГА.

Данный детерминистский подход основан на расчете сценария с полным разрушением МГ и максимальной дальностью распространения поражающих факторов при аварийных выбросах опасных веществ (МГА).

При авариях на МГ СУГ наибольшая зона смертельного поражения связана с воспламенением дрейфующих облаков ТВС (см. раздел 1.2).

Расчет дрейфа облака ТВС при наихудших условиях рассеяния позволяет оценить абсолютно безопасное расстояние для отдельного участка конкретного трубопровода. Для МГ ШФЛУ DN 500-700 максимальные зоны действия поражающих факторов могут достигать 1500-2500 м (см. раздел. 3.5).

Третий способ обоснования минимальных безопасных расстояний основан на использовании КОР и позволяет оценить возможность возникновения аварии, в том числе МГА.

Данный способ предполагает оценочный расчет вариантов выброса для всего диапазона размеров дефектных отверстий на рассматриваемом участке трассы МТ (от свища до гильотинного разрыва трубопровода) и все возможные исходы аварий.

При моделировании распределения в пространстве зон действия поражающих факторов учитываются вероятность возникновения аварии и условная вероятность развития аварии по тому или иному сценарию.

В качестве безопасного принимается расстояние, на котором рассчитанное значение потенциального риска гибели человека не превышает уровня, заданного в качестве допустимого.

Критерии приемлемости устанавливаются для каждого участка МТ с учетом уязвимости объектов сближения, а также восприятия опасностей аварий в массовом сознании.

Другие вопросы применения обозначенных выше подходов к установлению минимальных безопасных расстояний для разных видов МТ: газо-, нефтепроводы, трубопроводы СУГ рассмотрены в статье [37].

По результатам рассмотрения различных способов определения безопасных расстояний от МТ до объектов воздействия, можно сделать вывод, что детерминистские подходы, которые применимы (в большинстве случаев) для установления минимальных безопасных расстояний для МГ и МН, для трубопроводов СУГ не позволяют реализовывать проекты по строительству и реконструкции продуктопроводов ШФЛУ и нестабильных конденсатов вследствие невозможности прокладки их трасс на «абсолютно безопасном» удалении от соседних объектов.

В настоящей работе для обоснования минимальных безопасных расстояний от МТ СУГ до соседних объектов, зданий, сооружений, населенных пунктов и транспортных путей предлагается использовать методологию анализа опасностей и количественной оценки риска аварий [57-61].

Также методология КОР может применяться для обоснования минимальных безопасных расстояний при прокладке нефте- и газопроводов в стесненных условиях (наличие развитой социальной, производственной и транспортной инфраструктуры, особенности рельефа).

2.3 Общий алгоритм количественной оценки риска для обоснования безопасных расстояний от магистральных трубопроводов сжиженного углеводородного газа до объектов с присутствием людей

На основании отечественного опыта декларирования промышленной безопасности и признанных результатов анализа риска аварий на магистральных нефтегазовых трубопроводах

в настоящей работе разработан специальный алгоритм количественной оценки риска для обоснования безопасных расстояний от МТ СУГ до объектов с присутствием людей – риск-ориентированный подход к оценке безопасных расстояний при размещении МТ.

Оценка риска аварий при обосновании безопасных расстояний от МТ до ОПЛ проводится в 4 этапа:

1. Идентификация опасностей аварий и определение участков сближения.
2. Расчет зон поражения МГА и выделение высокоопасных участков для проведения количественной оценки риска.
3. Расчет значений показателей риска аварии на высокоопасных участках МТ. Построение полей потенциального риска.
4. Оценка минимальных безопасных расстояний. Разработка рекомендаций по снижению риска аварии для участков, лежащих вне зон приемлемого риска.

Блок-схема алгоритма риск-ориентированного подхода оценки безопасных расстояний от МТ до ОПЛ приведена на рисунке 7.

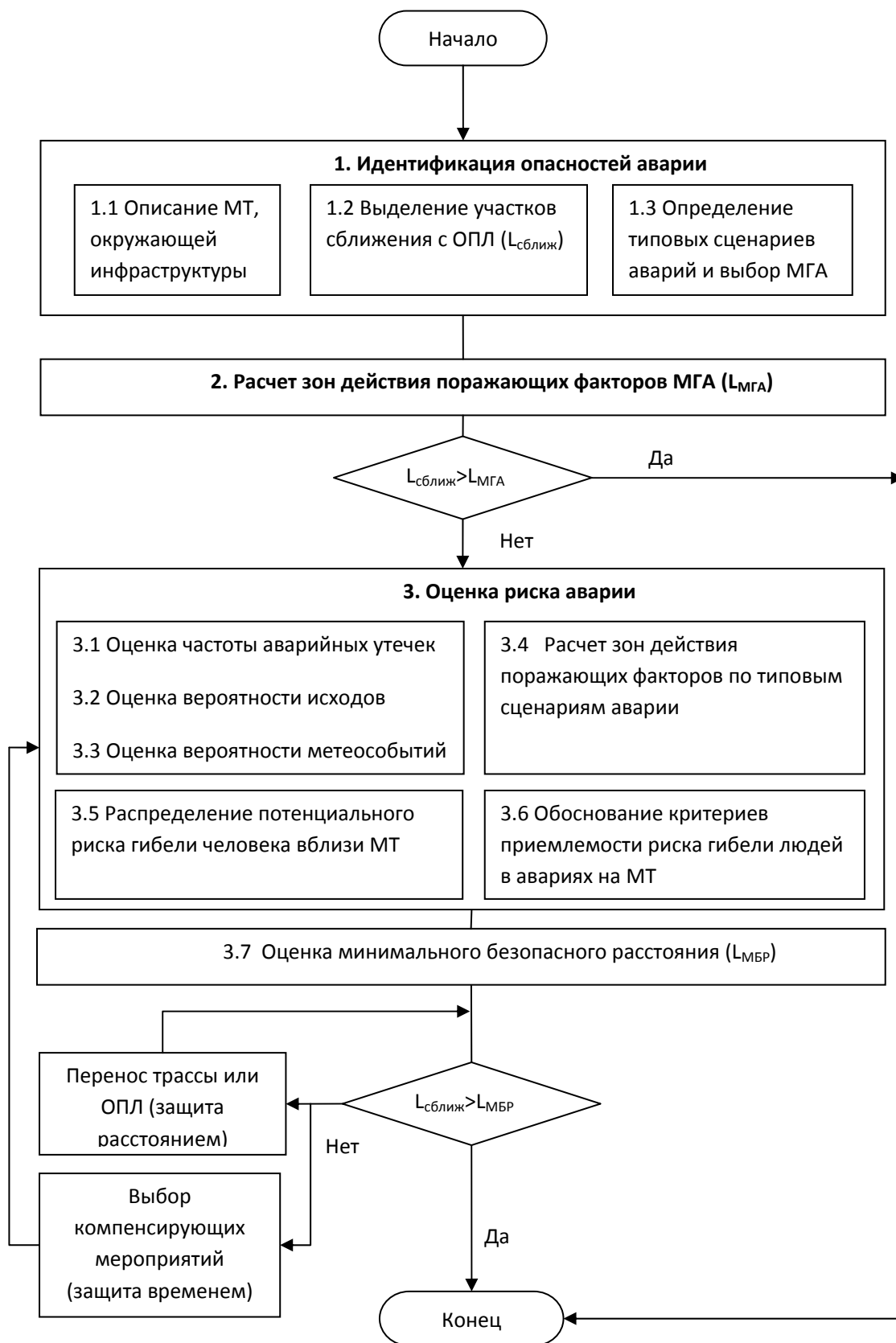


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма риск-ориентированного подхода оценки безопасных расстояний для МТ СУГ

2.3.1 Идентификация опасностей аварий

Основная задача идентификации опасностей аварии – выявление и четкое описание всех источников опасностей аварий (участков МТ), и сценариев реализации аварий.

На этапе «Идентификация опасностей аварии»:

- производится деление МТ на участки, при этом выделяются участки сближений трассы МТ с объектами транспортной и социальной инфраструктуры. В качестве участков сближений идентифицируются участки МТ, проходящие с нарушением расстояний, указанных в СНиП 2.05.06-85*;
- описывается МТ и условия его окружения, идентифицируются опасные свойства транспортируемого продукта;
- определяются особенности аварийного истечения продукта;
- проводится анализ условий возникновения и последовательность развития аварий, определяются типовые сценарии развития аварий для рассматриваемого МТ, в т.ч. сценарий МГА.

2.3.1.1 Особенности аварийных выбросов на продуктопроводах СУГ

При разгерметизации МТ СУГ вблизи аварийного отверстия происходит падение давления, а по МТ от места разрыва распространяются волны разгрузки. На участке до места разрыва (по потоку) среда ускоряется, а на участке после места разрыва – замедляется, вплоть до образования обратного потока жидкости. Скорость распространения волн разгрузки по трубопроводу приблизительно равно скорости звука в среде (для СУГ – 0,7 км/с).

В первые секунды после разрушения, пока идет падение давления в транспортируемой жидкости вблизи отверстия разгерметизации, происходит выброс жидкой фазы с очень высокой интенсивностью. Выброшенный на этой стадии продукт вскипает за пределами трубопровода.

Если давление в трубопроводе в распространяющихся волнах разгрузки упадет ниже давления насыщенных паров СУГ для данной температуры, то в трубопроводе произойдет вскипание СУГ, и тогда в трубопроводе будет двигаться двухфазный поток. От места, где началось вскипание, по трубопроводу начинает двигаться волна вскипания, в которой и происходит фазовый переход. В результате в трубопроводе с СУГ распространяется двухфронтная структура из волны разрежения и волны вскипания. Вскипание потока в трубопроводе приведет к тому, что двухфазная среда будет ускоряться значительно меньше, чем, если бы это была однородная жидкость, происходит т.н. «запирание» потока. Кроме того, в двухфазном потоке в протяженных трубах существенную роль будет играть трение, поскольку появление газовой фазы приводит к росту скорости движения среды. Все это приводит к тому,

что удельный расход на месте выброса в случае вскипания транспортируемой среды существенно меньше, чем в случае отсутствия вскипания.

После полной остановки насосов и прекращения нагнетания СУГ, в трубопроводе образуются участки, заполненные парами СУГ при давлении насыщенных паров. При самотечном режиме истечения можно выделить две стадии поступления СУГ в окружающую среду. На первой стадии, когда уровень отверстия разгерметизации расположен ниже уровня жидкой фазы СУГ, происходит выброс жидкой фазы. На второй стадии, когда уровень жидкости достигает уровня отверстия разгерметизации, начинается выброс только газовой фазы, истекающей из трубопровода, где она находится при давлениях до давления насыщенных паров. При этом если СУГ находилась в перегретом состоянии на момент достижения уровня отверстия разгерметизации, то возможно его дальнейшее вскипание в трубопроводе, после чего в «карманах» трубопровода, останется охлажденный СУГ, который будет испаряться из трубопровода (в т.ч. и за счет теплообмена с грунтом). В локальных максимумах могут образовываться газовые подушки с избыточным давлением, поскольку при падении давления в этих точках ниже давления насыщенного пара транспортируемого продукта начинается переход жидкости в газовую фазу (кипение). За счет этого избыточного давления в локальных максимумах трубопровода возможно частичное передавливание жидкости из одного локального минимума (кармана) в другой, а при достижении в ходе расширения газовой «подушки» локального минимума открывается возможность перехода газа из одной газовой «подушки» в другую.

Таким образом, при исследовании аварийного истечения жидких продуктов из МТ СУГ можно выделить две основные стадии:

- истечение в напорном режиме, когда в трубопровод подается и из трубопровода отбирается продукт;
- самотечный режим истечения.

На стадии напорного истечения (до перекрытия потока) давление на месте разгерметизации, а, следовательно, и масса, выброшенная из трубопровода на этой стадии, определяется размером дефектного отверстия, величиной спада давления по трубопроводу, степенью вскипания СУГ в трубопроводе и характеристиками насосов на трубопроводе.

Истечение СУГ из дефектного отверстия после остановки насосов (самотечный режим) будет определяться профилем трассы и разностью температур перекачиваемого продукта и окружающей среды (она будет определять долю вскипания СУГ в трубопроводе и соответственно давление насыщенных паров в трубопроводе). В самотечном режиме скорость истечения будет зависеть от перепада высоты дефектного отверстия и высоты столба СУГ в трубопроводе на участке до перевальных точек, а также от давления насыщенных паров СУГ.

Давление в трубопроводе на месте аварии будет обусловлено сначала разностью этих высот по всей трассе трубопровода (плюс давление насыщенных паров), а после полного перекрытия задвижек – разностью высот только на отсеченном участке трубопровода (опять же плюс давление насыщенных паров).

Последовательная схема развития аварий, связанных с разгерметизацией продуктопровода и поступлением СУГ в окружающую среду может быть представлена так:

Разгерметизация трубопровода или арматуры, уставленной на нем → начало выброса СУГ из трубопровода → распространение по трубопроводу волн разгрузки, регистрация утечки системой обнаружения утечки → вскипание СУГ в трубопроводе (если СУГ находился в перегретом состоянии) образование двухфазного потока в трубопроводе → отключение насосов, закрытие линейных задвижек → истечение СУГ в самотечном режиме из отсеченного участка трубопровода → возможное образование участков в трубопроводе, заполненных газовой фазой СУГ при давлении насыщенного пара (газовые подушки) и жидкой фазы (карманов) → прекращение потока СУГ при падении давления, эмиссия паров из отверстия разгерметизации.

Гидродинамика истечения нестабильных жидкостей из трубопровода рассчитывается по модели двухфазного истечения [62].

Движение среды по каждому участку описывается следующими одномерными нестационарными уравнениями для осредненного по сечению течения:

- закон сохранения массы:

$$\frac{\partial(\rho \cdot A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w)}{\partial x} = M_k - M_0, \quad (1)$$

где:

x – пространственная координата вдоль оси трубопровода, м;

t – время, с

ρ – общая плотность смеси, кг/м³;

w – скорость движения среды, м/с;

A – площадь сечения, м²;

$M_0(t)$ – расход выброса, кг/(м·с);

$M_k(x_k, t)$ – скорость закачки (забора) новых порций ШФЛУ на отметках x_k , кг/(м·с).

- закон сохранения отдельных компонент:

$$\frac{\partial(\rho \cdot A \cdot Y_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot Y_m \cdot w)}{\partial x} = Y_{mk} M_k - Y_m M_0 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \cdot A \cdot (D_m + D_{turb}) \cdot \frac{\partial Y_m}{\partial x} \right), \quad (2)$$

где:

Y_{mk} – массовая доля m -го компонента смеси в потоке, закачиваемом/забираемом с новыми порциями ШФЛУ на отметках x_k ;

D_m, D_{turb} - коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии m -го компонента, м²/с.

- закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w^2)}{\partial x} = I_k - I_0 - A \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - A \cdot g \cdot \rho \cdot \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\lambda}{2 \cdot R} + \xi_l \right) \cdot \rho \cdot w \cdot |w| \cdot R^2, \quad (3)$$

где:

p – давление в системе, Па;

$I_0(t)$ – потери импульса в системе при выбросе среды, кг/с²;

$I_k(x_k, t)$ – поток импульса в систему/из системы за счет закачки (забора) новых порций ШФЛУ на отметках x_k , кг/с²;

g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²);

z – высотная отметка трубопровода, м;

R – радиус трубопровода, м;

π – число Пифагора (3,14...);

λ – коэффициент трения;

ξ_l – величина местных сопротивлений, м⁻¹.

- закон сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \cdot A \cdot \left(\varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \cdot A \cdot w \cdot \left(\varepsilon + \frac{w^2}{2} \right) \right) = \\ E_k - E_0 + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \cdot A \cdot \sum_{m=1}^N \varepsilon_m \cdot (D_m + D_{turb}) \cdot \frac{\partial Y_m}{\partial x} \right) + \\ - \frac{\partial(\rho \cdot A \cdot w)}{\partial x} - A \cdot w \cdot g \cdot \rho \cdot \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{\lambda}{2 \cdot R} + \xi_l \right) \cdot \rho \cdot w^3 \cdot R^2 \\ + Q \cdot A + \frac{\partial}{\partial x} \left((k + k_{turb}) \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \Theta(T, T_{sur}) \end{aligned}, \quad (4)$$

где:

ε – удельная внутренняя энергия (на единицу массы), Дж/кг;

ε_m – удельная внутренняя энергия (на единицу массы) m -го компонента смеси, Дж/кг;

$E_0(t)$ – потери энергии в системе при выбросе среды, Дж/(м·с);

$E_k(x_k, t)$ – поток энергии в систему/из системы за счет закачки (забора) новых порций ШФЛУ на отметках x_k , Дж/(м·с);

Q – удельная (на единицу массы) скорость энерговыделения/энергопоглощения за счет реакций протекающих в системе, либо за счет подогрева смеси в отдельных точках трассы, Дж/(м³·с);

k и k_{turb} – коэффициенты молекулярного и турбулентного теплопереноса;

$\Theta(T, T_{sur})$ – теплообмен с окружающей средой через стенки трубы, Дж/(м·с).

Представленная система уравнений учитывает широкий перечень факторов и процессов:

- изменение сечения по длине трубопровода;
- изменение параметров среды (плотность, концентрация, скорость и энергия) в каждой точке пространства (первые слагаемые левых частей в уравнениях (1)-(4));
- перенос в поле скорости (конвективный перенос) массы в целом, массы отдельных компонент смеси, импульса и энергии (вторые слагаемые левых частей в уравнениях (1)-(4));
- поступление/забор массы (в т.ч. отдельных компонент), импульса и энергии в систему/из системы за счет закачки (забора) новых порций ШФЛУ на отметках x_k (первые слагаемые правых частей в уравнениях (1)-(4));
- потери массы (в т.ч. отдельных компонент), импульса и энергии в системе при выбросе среды на местах разрушения (вторые слагаемые правых частей в уравнениях (1)-(4));
- молекулярная и турбулентная диффузии отдельных компонент смеси (и связанный с этим перенос энергии) вдоль оси трубопровода (третьи слагаемые в уравнениях (2) и (4));
- действие сил давления (третье слагаемое правой части (3) и четвертое слагаемое правой части (4));
- действие силы тяжести (четвертое слагаемое правой части (3) и пятое слагаемое правой части (4));
- потери на трение на стенках трубы и на фитинге трубопровода (пятое слагаемое правой части (3) и шестое слагаемое правой части (4));
- энерговыделение/энергопоглощение за счет реакций протекающих в транспортируемой среде, в т.ч. за счет принудительного внешнего нагрева транспортируемого продукта (седьмое слагаемое правой части (4));
- молекулярный и турбулентный перенос тепла в направлении транспортировки среды (восьмое слагаемое правой части (4));
- теплообмен продукта, транспортируемого по трубопроводу с окружающей средой (через стенки трубопровода) (девятое слагаемое правой части (4)).

Данная система уравнений является достаточно общей и в зависимости от конкретных условий может быть упрощена путем исключения соответствующих слагаемых.

Для сред, движущихся с наличием развитой турбулентности в потоке, можно пренебречь процессами молекулярной диффузии и теплопередачи (соответственно зануляются коэффициенты D_m и k). В случае отсутствия реакции в потоке и нагрева смеси слагаемое $Q=0$. Если в системе состав не изменяется (постоянно подается один и тот же состав на входе, а по пути транспортировки подкачивается только такой же состав), то $Y_m = \text{const}$ и все слагаемые, содержащие Y_m под знаком производной зануляются. Наконец, если система представляет собой единственную трубу, в которой не забираются и не подкачиваются новые продукты, то слагаемые M_k, I_k, E_k также зануляются.

Система уравнений (1)-(4) должна быть дополнена соответствующими начальными и граничными условиями. В качестве граничных условий используются параметры оборудования стоящего в начале и в конце трубопровода: насосы, емкости, жесткие заглушки и т.д.

Кроме того, система уравнений (1)-(4) замыкается уравнением состояния. В качестве такого уравнения состояния используются результаты термодинамического расчета задачи об отыскании параметров в системе при известных плотности (берется из решения уравнения (1)), энергии (берется из решения уравнения (4)) и составе (берется из решения уравнения (2)). Именно в ходе термодинамического расчета отыскивается давление, температура и доля вскипания в соответствующем сечении трубопровода.

Наконец, соответствующие слагаемые, описывающие диффузию, теплообмен с окружающей средой, трение о стенки и потери на местных сопротивлениях рассчитываются согласно имеющимся справочным данным [63].

Система уравнений (1-4) решается численно на ЭВМ с использованием разностных методов необходимой точности.

Решение системы (1)-(4) позволяет отыскать величину $M_0(t)$, а также пространственно-временное распределение всех параметров обуславливающих $M_0(t)$: скорость продукта в трубопроводе, давление, температуру, вскипевшую долю и состав СУГ и т.д. Именно расход продукта $M_0(t)$ и его параметры на месте выброса позволяют проводить в дальнейшем необходимые расчеты по последствиям выброса.

При истечении из трубопровода интенсивность истечения меняется от максимального значения в первый момент времени до меньших значений в последующие моменты (при этом не исключены отдельные «всплески» повышения интенсивности выброса за счет циркуляции волн в трубопроводе). Падение интенсивности истечения в среднем обусловлено падением давления на месте выброса. Падение интенсивности выброса необходимо учитывать при рассмотрении последствий и, в частности, при моделировании рассеяния выброса.

Для расчета рассеяния выброса по интегральным моделям может применяться подход, основанный на расчете «эффективной» интенсивности выброса, т.е. такой интенсивности

выброса, которая будет учитывать ряд факторов, связанных с упрощениями интегральной модели, и, прежде всего, учитывать размыв (интенсивное смешение с воздухом) переднего фронта облака (диффузия в направлении ветра, смешение с воздухом за счет вихревой пары на переднем фронте, дополнительное рассеивание за счет горизонтального сдвига разновысотных слоев выброса с последующей диффузией из них в вертикальных направлениях). Для выбросов из крупных трещин трубопроводов большого диаметра при низких скоростях ветра такая «эффективная» интенсивность выброса устанавливается на 60-й секунде для устойчивых состояний атмосферы и на 120-300-й секундах для неустойчивых (при неустойчивой стратификации диффузия сильнее размывает передний фронт облака). Именно с этих моментов времени концентрация в той или иной точке перестает размываться процессами, протекающими на переднем фронте. При более высоких скоростях «эффективная» интенсивность выброса устанавливается на более ранних стадиях истечения.

2.3.1.2 Определение типовых сценариев аварии на МТ СУГ

Специфика аварийных выбросов СУГ связана с термодинамическими свойствами продукта: низкой температурой кипения и высокой плотностью паров.

Нарушение термодинамического баланса при аварийной разгерметизации трубопровода вызывает интенсивное кипение и испарение истекающего и распространяющегося по поверхности земли сжиженного газа. Дополнительно пары продукта поступают в атмосферу за счет теплообмена жидкости с подстилающей поверхностью и атмосферой. Т.к. пары СУГ тяжелее воздуха, в результате вскипания продукта формируются протяженные облака, которые способны дрейфовать на расстояния в несколько сотен метров.

Поскольку СУГ и его пары обладают способностью к воспламенению, существует вероятность возникновения пожара (вблизи мест интенсивной деятельности человека доля таких пожаров достигает 90 % по отношению к общему количеству выбросов). Наиболее вероятным источником случайного воспламенения являются искры от двигателей транспортных средств (см. раздел 1.2, таблица 11). Другими источниками случайного зажигания являются разряды статического и атмосферного электричества, искры при соударении металлических частей, поверхности, нагретые до высокой температуры, неосторожные действия человека (курение, использование открытого огня) и т.д.

При появлении источника зажигания в области, загазованной парами СУГ, происходит их воспламенение и прорыв пламени по шлейфу облака к месту пролива с последующим возгоранием пролива. При этом в окружающей среде возможно распространение ударных волн. Возможно также диффузионное догорание переобогащенных объемов смесей СУГ с воздухом.

При зажигании непосредственно пролива также возможен проскок пламени по шлейфу. Кроме того, если воспламенение произошло в момент, когда еще продолжается выброс, то возможно образование горящего факела на месте разрушения трубопровода.

Типовой сценарий развития аварии на МТ СУГ выглядит следующим образом:

Разгерметизация трубопровода → истечение СУГ из трубопровода, в том числе в двухфазном режиме при вскипании СУГ в трубопроводе → образование на месте разрушения пролива СУГ (для подземного трубопровода – фильтрация СУГ через грунт с возможностью размыва почвы) → растекание, кипение и испарение СУГ (в том числе при соприкосновении с почвой), интенсивное смешение с воздухом → образование в атмосфере газокпельного облака охлажденного до температуры кипения СУГ → распространение облака СУГ в атмосфере → воспламенение СУГ → сгорание облака СУГ, возникновение на месте разрушения факела, пожара пролива → воздействие открытого пламени, продуктов сгорания, теплового излучения и избыточного давления ударной волны на людей, оказавшихся в зоне поражения.

Распределение возможных аварийных исходов на трубопроводе СУГ описывается характерным деревом событий (п.2.3.3.3).

Наибольшая опасность при аварийной разгерметизации трубопровода СУГ связана с отложенным воспламенением дрейфующего облака ТВС. Сценарий МГА может быть описан следующей последовательностью событий:

Образование крупной трещины, «гильотинный» разрыв МТ → выброс СУГ из трубопровода с высокой интенсивностью (1500-2500 кг/с), в т.ч. в двухфазном режиме → образование в атмосфере облака охлажденного до температуры кипения СУГ → дрейф облака СУГ в атмосфере при наихудших условиях рассеяния в направлении мест скопления людей → воспламенение и сгорание облака СУГ → воздействие открытого пламени, продуктов сгорания, теплового излучения и избыточного давления ударной волны на людей, оказавшихся в зоне поражения.

Следует отметить одну особенность крупных разрушений трубопроводов с СУГ (примерно с 20 % от площади поперечного сечения трубопровода) – расход с некоторого момента времени практически перестает зависеть от размера разрушения. Т.е. с увеличением площади разрушения расход возрастает лишь в первые несколько десятков секунд от начала разгерметизации, а затем выходит на одинаковый уровень максимального расхода.

На рисунке 8 представлена типовая картина истечения СУГ (расчет интенсивности аварийного выброса по уравнениям (1)-(4) для МТ ШФЛУ DN 500) для трех размеров аварийных отверстий: 20 % от площади сечения (что соответствует крупным трещинам согласно пп. 2.3.3.2), 40 и 60 %. Из рисунка 8 видно, что, начиная с некоторого момента

времени (после 200 с), разница в скоростях истечения нивелируется. Таким образом, все крупные разрушения могут быть объединены в одну группу крупных трещин («гильотинных» разрывов).

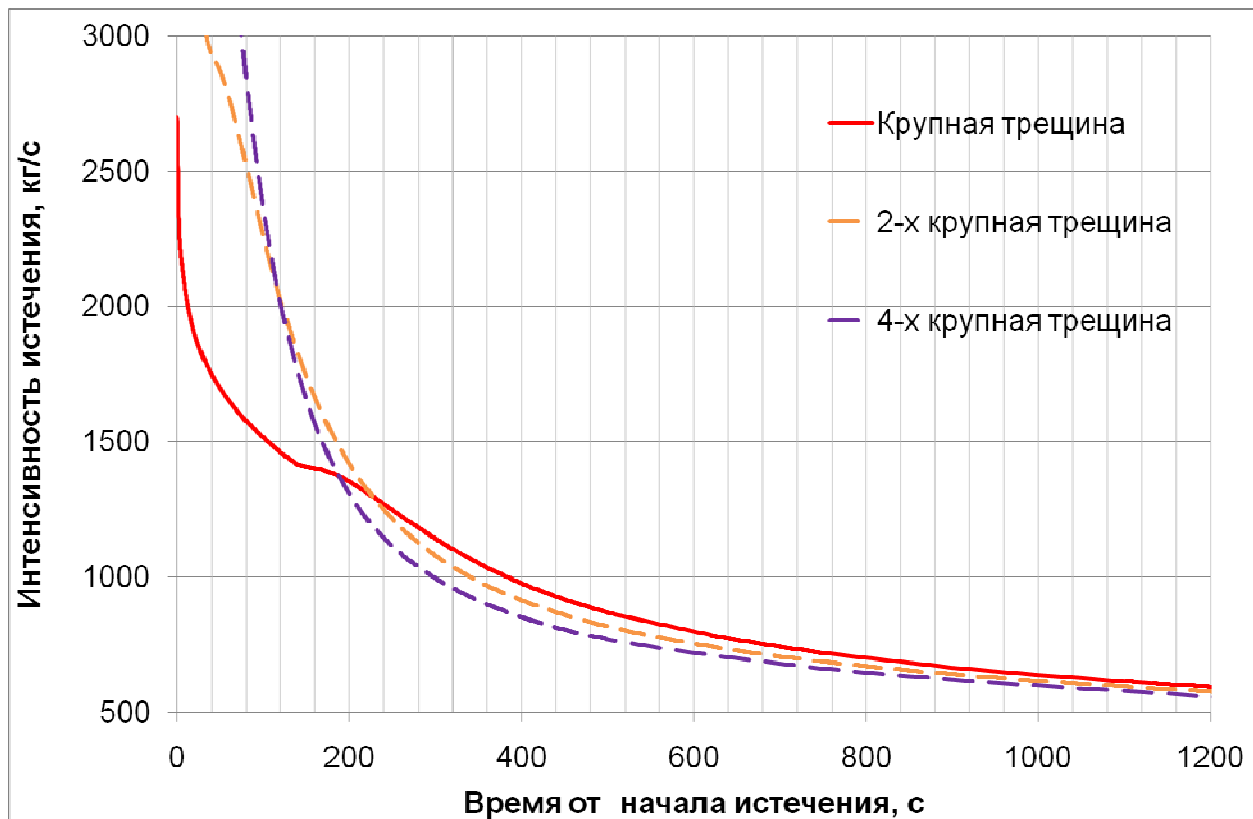


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности выброса при аварийной разгерметизации МТ СУГ от времени от начала истечения для разных размеров аварийных отверстий

2.3.2 Расчеты зон поражения и выделение высокоопасных участков

На данном этапе производится оценка последствий аварий. По результатам расчета зон действия поражающих факторов МГА определяются безусловно безопасные расстояния для данного МТ СУГ и выделяются высокоопасные участки.

Для определения безусловно безопасных расстояний проводится оценка зон поражения МГА (пожар-вспышка облака ТВС). Прочие поражающие факторы рассматриваются при оценке безопасности людей в «ближней» зоне, либо для высокоопасных участков при проведении оценки риска.

Для объектов, расположенных за пределами зоны действия поражающих факторов МГА проведение оценки риска нецелесообразно.

2.3.2.1 Расчет вероятных зон действия поражающих факторов при аварии на МТ СУГ

В соответствии с п.2.3.1.2 можно выделить следующие возможные физические проявления аварии на трубопроводах, транспортирующих СУГ:

- горение паров ШФЛУ непосредственно в зоне пролива (пожар пролива);
- горение факела;
- дрейф и сгорание облака паров СУГ.

Следует отметить, что воздействие поражающих факторов аварий на незащищенного человека на открытом пространстве и на людей, находящихся в зданиях, сооружениях будет различным. Так, для незащищенных людей, находящихся на открытом пространстве, основным поражающим фактором при авариях на МТ СУГ будут являться открытое пламя и тепловое излучение при горении факела, пожаре пролива, пожаре-вспышке, а для людей, находящихся в зданиях – вторичные факторы пожара (задымление, изменение состава газовой среды, токсичные продукты горения и термического разложения, пониженная концентрация кислорода) и взрыва (вследствие разрушения/повреждения зданий, сооружений ударными волнами), а в случае эскалации аварии и возникновения пожара в здании – воздействие пламени и теплового излучения.

С целью учета возможности поражения людей, как на открытом пространстве, так и при нахождении в зданиях, сооружениях, в транспортных средствах, необходимо ориентировать на более консервативные значения зон поражения, т.е. без учета защитных свойств гражданских и производственных зданий.

Ниже приведен краткий обзор основных методических документов и допущения, связанные с их применением для расчета зон поражения при авариях на МТ СУГ. Вычисления по описанным ниже методикам проводились с помощью компьютерной программы «Токси+Risk» [64, 65].

Пожар пролива

Для оценки поражения открытым пламенем и тепловым излучением при пожаре пролива рассчитывается интенсивность теплового потока в направлении объекта воздействия [66, 67]:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau \quad (5)$$

где E_f — среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м²;

F_q — угловой коэффициент облученности;

τ — коэффициент пропускания атмосферы.

Интенсивность излучения с единицы поверхности принимается в зависимости от размера пролива и типа выгорающего продукта. Для СУГ тепловой поток изменяется в диапазоне от 40 до 80 кВт/м² в зависимости от площади пожара пролива.

Удельная скорость выгорания ШФЛУ из пролива согласно [66, 67] – 0,1 кг/(м²·с), а теплота сгорания – 41870 кДж/кг.

Определяющий вклад в формирование зон поражения открытым пламенем и тепловым излучением при горении пролива вносит площадь растекания, которая для легкокипящих жидкостей определяется по соотношению интенсивности истечения и скорости испарения [66, 68, 69].

При растекании по ровной поверхности через несколько минут размер пролива практически стабилизируется, и дальнейшее увеличение его поверхности происходит медленно по мере охлаждения грунта. Стабилизация поверхности разлива означает материальный баланс между количеством СУГ, попадающим на грунт при аварийном истечении, и количеством пара, поступающим в атмосферу в результате теплообмена с грунтом. Руководствуясь этими соображениями и экспериментальными наблюдениями, для оценочных расчетов можно использовать следующее уравнение по расчету площади поверхности разлива [70]:

$$S = \frac{G}{\rho_g W^* (\tau_f)} \quad (6)$$

где: G – массовый расход сжиженного газа, ρ_g – плотность паров сжиженного газа при температуре кипения, W^* – скорость поступления паров в атмосферу (определяется решением задачи теплообмена сжиженного газа с грунтом и атмосферой [66]), τ_f – время формирования лужи сжиженного газа.

Интенсивность испарения сжиженных газов через 1-2 минуты после начала истечения резко снижается в 3-6 раз [66]. Натурные эксперименты по разливу СУГ, проведенные ВНИИГАЗ [71] и ВНИИПО МВД РФ [72], свидетельствуют, что установившаяся интенсивность испарения сжиженных газов в значительной степени зависит от проницаемости и влажности грунта, а также скорости ветра и может варьироваться от 7 до 40 г/м²/с (в среднем при низких скоростях ветра 10).

Струйное горение

При аварийной разгерметизации подземного МТ СУГ, истекающая под высоким давлением жидкость за короткий промежуток времени размывает грунт засыпки в траншее и растекается по поверхности земли. В случае воспламенения выброса ШФЛУ в первые минуты после разрушения, на месте выброса возможно образование факела (горящей струи).

Однако, для подземных участков продуктопроводов, на месте аварии будет образовываться котлован, который быстро заполнится истекающим СУГ. Импульс струи в котловане будет гаситься, таким образом, струйное горение будет возможно либо при мгновенном воспламенении, либо при полном выгорании разлившегося в котлован СУГ, либо при механическом смещении труб (последнее крайне маловероятно).

Зоны поражения при горении струй определяются в соответствии с [66, 67].

Дрейф и сгорание облака ТВС

Образующееся в результате разгерметизации МТ СУГ облако ТВС является важнейшим фактором опасности аварии. Наличие источников зажигания на пути дрейфа облака в границах изолинии концентрации между верхним и нижним концентрационными пределами воспламенения ($C_{ВКПВ}$ и $C_{НКПВ}$) обуславливает воспламенение и сгорание облака по всему объему с образованием воздушной волны сжатия, т.е. возникновение термического и барического факторов поражения.

Для расчета концентрационных полей при рассеивании и дрейфе паров СУГ, а также расчета массы топлива, участвующего в энерговыделении, используется методика РД-03-26–2007 [73]. Определение параметров волны сжатия при воспламенении ТВС на открытом воздухе проводится согласно РД 03-409–01 [74].

Согласно [74] основным режимом горения для облаков СУГ при наличии типовых источников воспламенения на открытом слабозагроможденном пространстве является дефлаграция с незначительным ростом давления. Дефлаграционное горение характеризуется тем, что фронт пламени создает при движении впереди себя волну сжатия. Избыточное давление в волне сжатия увеличивается постепенно от фронта волны к фронту пламени. Максимальные значения избыточного давления и скоростного напора достигаются перед фронтом пламени. Позади фронта пламени образуются продукты горения с высокой температурой.

Зона поражения открытым пламенем и тепловым излучением при сгорании облака ограничена размерами облака по концентрации $C_{НКПВ}$. Предполагается, что в пределах пожароопасного облака при его воспламенении имеет место 100% поражение людей, находящихся вне специальных укрытий и помещений (т.е. без учета защитных свойств гражданских и производственных зданий).

При расчетах дрейфа облака, максимальную зону поражения рекомендуется оценивать по концентрации $0,5 C_{НКПВ}$, что позволяет косвенно учесть неоднородность концентрации в облаке и эффект возможного перемещения пламени в область с концентрацией меньшей НКПВ за счет расширения несгоревшего облака при распространении фронта и его сноса ветром.

Последствия воздействия ударной волны при сгорании облака ТВС будут сильно отличаться для людей на открытой площадке и людей, находящихся в зданиях. Так, прямое воздействие ударной волны на человека носит травматический характер (травмирование с летальным исходом человек получает при избыточном давлении около 100 кПа), а при воздействии на здания, сооружения – разрушительный характер (давление во фронте ударной волны 30-50 кПа приводит к сильным разрушениям зданий). Вероятности гибели людей при различных разрушениях зданий (по статистике для землетрясений) рассмотрены в работе [75].

Доля поражения людей в результате воздействия воздушной волны сжатия с избыточным давлением 10...30 кПа не превышает 10...20 % от количества пораженных людей при пожаре.

Воздействие воздушной волны сжатия рекомендуется также учитывать косвенно путем увеличения размеров границы пожароопасного облака до $0,5 C_{НКПВ}$. В зависимости от динамики поступления паров в атмосферу и условий рассеяния граница облака $0,5 C_{НКПВ}$ увеличивает расчетную дальность зоны поражения до 30...60 % по сравнению с зоной $C_{НКПВ}$.

Таким образом, при расчете пространственных распределений характеристик волн сжатия и продуктов дефлаграционного сгорания облаков ТВС следует принимать допущение, что волны сжатия, продукты сгорания и тепловое воздействие с параметрами, достаточными для смертельного поражения человека, не выходят за пределы облака ТВС, ограниченного изолинией концентрации $0,5 C_{НКПВ}$.

Таким образом, изолиния концентрации $0,5 C_{НКПВ}$ характеризует внешнюю границу зоны негативного воздействия для сценариев аварий с воспламенением облаков ТВС.

2.3.3 Оценка вероятности аварий

На этапе «Оценка риска аварий» необходимо провести оценку:

- частоты аварийных утечек;
- частоты образования дефектного отверстия в зависимости от его размеров;
- распределения аварийных исходов для построения дерева событий;
- вероятности возникновения окружающих условий, влияющих на развитие аварий.

2.3.3.1 Оценка частоты аварийных утечек на МТ

2.3.3.1.1 Краткий обзор основных существующих методик по оценке частоты аварийных утечек на МТ

Вследствие большой протяженности трасс МТ их участки эксплуатируются в неоднородных ландшафтно-топографических, грунтовых, сейсмических, антропогенных и техногенных условиях, что ведет к неоднородности внешних воздействий на трубопровод и существенным различиям в тяжести последствий возможных аварий.

С этим связана характерная особенность аварийности на МТ: различия в ожидаемых значениях частоты аварий на отдельных участках МТ. Поэтому при оценке частоты аварийных утечек на МТ принята процедура деления трассы анализируемого МТ на участки, характеризующиеся примерно постоянным значением локальной частоты (удельной интенсивности) аварии внутри каждого участка.

Среди существующих методов анализа риска [76] для оценки интенсивности аварий на отдельных участках МТ чаще применяются индексные методы [20, 12]. Применение вероятностных методов, например, вероятностного анализа безопасности (ВАБ), базирующегося на анализе «деревьев отказов», для магистрального трубопроводного транспорта [77, 78, 79] не получило широкого распространения ввиду отсутствия требуемых для анализа статистических данных и несоразмерно высокой трудоемкости проведения такого анализа.

Общий принцип, лежащий в основе индексных методов, состоит в выделении значимого числа факторов, наиболее полно характеризующих состояние системы. Каждому фактору по установленному алгоритму присваивается взвешенное число баллов. Полученные баллы обрабатываются (чаще всего путем суммирования баллов по всем группам с весовыми коэффициентами), в результате чего определяется значение окончательного показателя, или индекса, характеризующего общее состояние системы. Итоговый показатель (индекс) выражает опасность объекта в относительных условных единицах.

Индексные методы для оценки частоты аварийных утечек на МТ в России получили распространение в нормативно-методических документах МЧС России [67] (для магистральных нефте- и газопроводов), ОАО «Газпром» [66, 80] (для газопроводов и конденсатопродуктопроводов), ОАО «Транснефть» [33, 81] (для нефте- и нефтепродуктопроводов).

Методика [67] построена на результатах регрессионного анализа статистических данных по аварийности на западно-европейских газопроводах [24]. Сравнительный анализ статистических баз данных по аварийности на МТ России и стран Европы (раздел 1.1) показал, что база данных и отчеты [24, 25, 26] не могут служить статистической основой для разработки

методики расчета частоты аварийной разгерметизации отечественных МТ, вследствие существенных различий как в технологических параметрах труб (диаметр, толщина стенки), так и в причинах возникновения аварий на МТ в России и в странах Европы (см. также [82]).

Методики [81, 83], основанные на методе балльных оценок факторов влияния, разработаны с учетом российской специфики аварийности на МТ и уточнены по результатам 10-летнего опыта их использования при декларировании промышленной безопасности объектов магистрального трубопроводного транспорта [33, 66].

Однако, несмотря на актуализацию методики (в методике [33] упрощен подход для поведения балльной оценки для проектируемых нефте- и нефтепродуктопроводов), остаются трудности ее применения для новых и проектируемых МТ, в т.ч. связанные с избыточной конкретизацией условий прокладки, но вместе с тем с недостаточным учетом компенсирующих мероприятий, повышающих надежность проектируемого МТ по сравнению со среднестатистическим эксплуатируемым.

Таким образом, рассмотрение существующих методик по оценке вероятности аварий на МТ показало, что они не могут служить адекватным инструментом корректировки среднестатистического значения интенсивности аварий на МТ СУГ, проектируемых и строящихся в России.

Методика оценки частоты аварийных утечек на проектируемых и/или реконструируемых участках МТ СУГ должна учитывать влияние компенсирующих мероприятий на степень риска аварии и позволять оценить их достаточность.

2.3.3.1.2 Краткий обзор основных технических решений, направленных на снижение риска аварий на МТ

В результате анализа технических решений, предлагаемых в качестве компенсирующих мероприятий в СТУ на проектирование и строительство трубопроводов, в т.ч. продуктопроводов ШФЛУ [84-89], можно выделить две группы мер обеспечения безопасности: организационно-технические мероприятия, направленные на уменьшение вероятности аварии и меры, направленные на смягчение тяжести последствий аварии.

Среди решений, направленных на исключение разгерметизации МТ и предупреждение аварийных выбросов опасных веществ (уменьшение вероятности аварии) следует отметить:

- применение повышенных толщин стенки трубы (по сравнению с расчетами по СНиП 2.05.06-85*) и материалов повышенной прочности;
- прокладка МТ методом «труба в трубе» на наиболее опасных участках;
- сверхнормативное (по сравнению с СНиП 2.05.06-85*) заглубление МТ;

- повышенная частота внутритрубной диагностики (до 1-2 года);
- испытания на прочность и герметичность при повышенных (по сравнению со СНиП 2.05.06-85) испытательных давлениях;
- повышение эффективности охраны МТ и мероприятия по защите от вандализма и терроризма;
- применение современной системы обнаружения несанкционированных врезок, в т.ч. система виброакустического мониторинга;
- контроль напряженно-деформированного состояния МТ на участках с высокой вероятностью перемещения грунта (зоны опасных сейсмических процессов, оползневые участки и проч.).

Среди решений, направленных на уменьшение тяжести последствий аварий, следует отметить:

- установка более чувствительных систем обнаружения утечек;
- ограничение площадей возможных аварийных разливов за счет возведения инженерных сооружений (траншей, дамб, валов, амбаров);
- установка датчиков загазованности;
- информирование персонала и населения об опасностях крупных аварий (в т.ч. через процедуру декларирования промышленной безопасности).

2.3.3.1.3 Оценка частоты аварийных утечек на участках проектируемых и реконструируемых МТ СУГ

Поскольку проектируемый МТ – элемент системы трубопроводного транспорта, аварийность на нем должна оцениваться, опираясь на среднее значение аварийности $\bar{\lambda}$ для действующих отечественных МТ.

В предположении поддержания равного уровня техобслуживания для всех эксплуатируемых объектов МТ, можно отметить отличия в антропогенных и природных условиях прокладки и надежности самих МТ.

Для действующих МТ отличия ожидаемой частоты аварий на отдельном участке от среднестатистической частоты $\bar{\lambda}$ за счет влияния на указанный участок различных негативных и позитивных, внешних и внутренних факторов учитываются в методике [33] с помощью соответствующего коэффициента влияния $k_{вл}$.

Оценку частоты аварийных утечек на проектируемых/реконструируемых участках МТ

СУГ предлагается проводить, опираясь на среднее значение аварийности $\bar{\lambda}$ для действующих отечественных МТ с учетом особенностей окружающей местности и применения компенсирующих мероприятий:

$$\lambda_n = \bar{\lambda} \cdot k_p \cdot k_x, \quad (7)$$

где:

$\bar{\lambda}$ – средняя ожидаемая интенсивность аварий, определяемая как средняя интенсивность аварий за последние 5 лет для действующих отечественных МТ (раздел 1.1), год⁻¹;

k_p – коэффициент расположения, учитывающий отличия в антропогенных и природных условиях прокладки участка МТ;

k_x – коэффициент, учитывающий компенсирующие мероприятия.

Коэффициент расположения k_p при рассмотрении конкретного n -го участка трассы рассчитывается аналогично коэффициенту $k_{эл}$ [33]. Но, поскольку на начальных этапах проектирования при отсутствии конкретных данных о трассе продуктопровода проведение балльной оценки может быть затруднительно, предлагается при оценке k_p использовать результаты расчета балльных оценок для типовых участков МТ согласно методике [33].

Ниже (Таблица 16) приведены результаты расчета балльных оценок для типовых участков МТ согласно методике Балльной оценки факторов влияния состояния проектируемых магистральных МН/ МНПП на степень риска аварии [33].

Коэффициент расположения k_p рассчитывается по формуле:

$$k_p = B_n / B_{cp} \quad (8)$$

где B_n – максимальная балльная оценка n -ого участка трассы МТ ШФЛУ, определяемая по таблице 16;

B_{cp} – средняя балльная оценка трассы, получаемая на основе балльной оценки каждого участка трассы ($n=1, \dots, N$):

$$B_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N B_n \quad (9)$$

При оценке k_p только для одного участка трассы B_{cp} можно принять равной балльной оценке «среднего» участка трассы МТ (Таблица 16), $B_{cp}=2$.

Таким образом, для участков линейной части МТ, проходящих через зоны с повышенной плотностью населения (сближения с населенными пунктами, дорогами) $k_p=1,5$.

Таблица 16 – Балльные оценки B_n различных типовых участков МТ

| Характеристика типового участка МТ | Рассчитанная балльная оценка для участка, B_n |
|---|---|
| «Средний» участок трассы МТ | 2 |
| Участки трассы, удаленные от населенных пунктов и транспортных коммуникаций, проходящие по лесистой или степной зоне без болот и речных переходов | 1,5 |
| Места расположения запорной и вспомогательной арматуры и ответвлений (лупингов) Участки трассы, примыкающие к НПС, которые являются «источниками» или «приемниками» циклических нагрузок на МН, связанных с изменениями режима перекачки и возникновением при этом гидравлических волн | 2 |
| Участки трассы, проходящие через зоны с повышенной плотностью населения | 3 |
| Воздушные переходы через овраги, реки Подземные переходы через наземные транспортные коммуникации | 4 |
| Переходы через водные преграды и обводненные участки трассы | 4-6 |
| Участки трассы, пересекающие зоны с повышенной опасностью природных воздействий (геологические разломы, оползни, горные условия) | 5 |

Большая часть действующих отечественных МТ, аварии на которых представляют собой основу для прогноза вероятности аварийной разгерметизации, спроектирована по СНиП 2.05.05-85*.

Коэффициент k_k характеризует повышенную надежность проектируемого МТ по сравнению со среднестатистическим «типовым» МТ, спроектированным по СНиП 2.05.05-85*, путем учета технических решений и компенсирующих мероприятий. Учет компенсирующих мероприятий с помощью коэффициента k_k основывается на долевом распределении причин произошедших аварий, а также экспертной оценки в результате логического рассмотрения причинно-следственных механизмов возникновения аварии:

$$k_k = 1 - \sum_{i=1}^l p_i \cdot (1 - \prod_k (1 - m_{ki})), \quad (10)$$

где:

m_{ki} – коэффициент, показывающей снижение аварийности по соответствующей причине при применении каждого технического решения;

p_i – весовой коэффициент, показывающий степень влияния группы мер (технических решений) на устойчивость МТ ко всем рассматриваемым воздействиям.

Весовой коэффициент p_i устанавливается на основе долевого распределения причин произошедших аварий (Таблица 17).

Таблица 17 – Долевое распределении причин произошедших аварий на МН/ МНПП

| i | Причины | Количество аварий на МН, МНПП за 1998-2012 гг. | Доля аварий, произошедших по соответствующей причине | Весовой коэффициент p_i Доля аварий без учета несанкционированных врезок ¹⁸ |
|-----|--|--|--|---|
| 1 | Механическое воздействие при проведении земляных работ | 25 | 0,13 | 0,25 |
| 2 | Брак строительства/ изготовления/ конструктивные недостатки | 39 | 0,21 | 0,39 |
| 3 | Ошибка персонала/ нарушение порядка проведения опасных работ | 16 | 0,08 | 0,16 |
| 4 | Коррозия, износ оборудования | 11 | 0,06 | 0,10 |
| 5 | Несанкционированные врезки | 88 | 0,47 | 0,0 |
| 6 | Прочие | 10 | 0,05 | 0,10 |
| | Итого | 189 | | |

Ниже (Таблица 18) приведены поправочные коэффициенты для учета технических характеристик МТ, определяемые на основе опыта разработанных СТУ. При рассмотрении конкретного n -го участка трассы последовательно оценивается степень влияния каждого технического решения m_{ki} , влияющего на снижение аварийности по i -ой причине.

¹⁸ Врезки в продуктопроводы СУГ с целью хищения продукта не характерны, остается небольшая вероятность врезки в продуктопровод по ошибке. С целью сохранения консервативности оценки, доли аварий без учета «врезок», были не сокращены, а перераспределены.

Таблица 18 – Оценка влияния технических решений на вероятность возникновения аварий и размеры зон действия поражающих факторов при аварии (пример)

| k | Характер влияния | Технические решения | Коэффициент снижения аварийности по i-ой причине, m | | | |
|----|---|--|---|----------------|----------------|-----------------|
| | | | p ₁ | p ₂ | p ₃ | p ₄ |
| 1. | Увеличение толщины стенки трубы повышает надежность МТ по отношению к коррозионному воздействию, снижает вероятность повреждения продуктопровода при механических воздействиях и при нарушении процесса перекачки, в т.ч. гидроудар | Отношение принятого в проекте значения толщины стенки на данном участке $\delta_{\text{факт}}$ к расчетному значению $\delta_{\text{расч}}$ (п. 8.15* СНиП 2.05.06-85*): $\delta_{\text{факт}}/\delta_{\text{расч}} < 1,25$ | 0 | - | 0 | 1 ¹⁹ |
| | | $1,25 \leq \delta_{\text{факт}}/\delta_{\text{расч}} \leq 1,8$ | 0,5 | - | 0,7 | 1 |
| | | $\delta_{\text{факт}}/\delta_{\text{расч}} > 1,8$ | 0,9 | - | 1 | 1 |
| 2. | Снижение вероятности механического повреждения продуктопровода при проведении земляных работ | Увеличение глубины заложения продуктопровода до 2 м (для нормальных грунтов) | 0,9 | - | - | - |
| | | Установка опознавательных знаков с интервалом не более 100 м и укладка в траншею сигнальной ленты | 0,4 | - | - | - |
| | | Устройство защитного футляра, кожуха ²⁰ | 0,7 | - | - | - |
| | | Прокладка с использованием технологии наклонно-направленного бурения | 0,8 | - | - | - |
| | | Прокладка с использованием технологии микротоннелирования | 1 | - | - | - |
| 3. | Снижение вероятности разгерметизации продуктопровода по причине коррозии | Применение усиленного защитного покрытия труб и соединительных деталей | - | - | - | 0,8 |
| | | 100 % резервирование электрохимической защиты | - | - | - | 0,5 |
| 4. | Снижение вероятности разгерметизации продуктопровода по причине дефектов геометрии трубопровода (гофры, вмятины), коррозионных дефектов, дефектов типа зарождающихся трещин | Проведение первичной ВТД и устранение выявленных дефектов до ввода продуктопровода в эксплуатацию. | - | 0,8 | - | - |
| | | Повышение требований к частоте проведения последующей диагностики | - | - | 0,5 | 1 |

¹⁹ Припуск на коррозию – 1÷1,5 мм на 10 лет.

²⁰ Кожух также выполняет функцию «организованного» отвода продукта, следовательно, и зон поражения в сторону от объекта воздействия.

| k | Характер влияния | Технические решения | Коэффициент снижения аварийности по i-ой причине, m | | | |
|----|--|---|---|-----|----|----|
| | | | p1 | p2 | p3 | p4 |
| 5. | Снижение вероятности возникновения аварии по причине брака изготовления | Повышение требований к испытаниям на прочность и герметичность | - | 0,4 | - | - |
| 6. | Снижение вероятности возникновения аварии по причине брака строительномонтажных работ | Контроль 100% качества сварных монтажных соединений труб не менее чем двумя методами неразрушающего контроля | - | 0,4 | - | - |
| 7. | Снижение вероятности образования протяженных трещин и гильотинного разрыва в 10 раз, что в свою очередь ведет перераспределению потенциального риска в поперечном сечении продуктопровода | Ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений в стенках труб величиной 0,3 от нормативного предела текучести металла трубы | - | - | - | - |
| 8. | Характеризует сопротивляемость металла трубы зарождению и развитию трещины. Исключает образования протяженных трещин и гильотинного разрыва, и, следовательно, уменьшает зоны возможного дрейфа облака ТВС на 30-45 %. | Использование труб с особыми показателями химического состава, структуры металла, ударной вязкости, стойкости к растрескиванию. Необходимо проведение комплексных исследований [ГОСТ 9454-78] с целью экспериментального определения свойств металла трубы и допускаемых размеров дефекта | - | - | - | - |
| 9. | Влияет на площадь разлива и размеры зоны поражения тепловым излучением при пожаре пролива (100-300 м от МТ). Слабо влияет на зоны дрейфа облака ТВС, и, следовательно, безопасные расстояния. | Повышенные требования к чувствительности системы обнаружения утечек. Управление технологическим процессом (автоматическая остановка перекачки) при возникновении возможных аварий и инцидентов | - | - | - | - |

В рамках принятого в настоящей работе алгоритма основные мероприятия направлены на снижение интенсивности аварийных утечек (мероприятия по повышению надежности МТ). Кроме того, мероприятия п.7,8 направлены на изменение структуры распределения утечек – снижение вероятности образования крупных трещин, и, следовательно, ограничение предельных размеров облака как потенциального источника опасности.

2.3.3.2 Оценка частот образования дефектных отверстий различных размеров

Для последующего прогноза масштабов зон действия поражающих факторов и оценки риска аварий необходимо оценить частоты для различных вариантов нарушения герметичности МТ и характерные размеры ожидаемых дефектных отверстий/ трещин. Ниже приведены частоты возникновения аварийных отверстий с характерными параметрами в соответствии со статистическими данными (пп.1.1.4) (Таблица 19).

Таблица 19 – Параметры дефектного отверстия в МТ и условная вероятность его возникновения

| Параметры дефектного отверстия * | Дефектное отверстие | | | |
|----------------------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------------------------------|
| | Свищ * | Малая трещина | Средняя трещина | Крупная трещина, «гильотинный» разрыв |
| L_p/DN | — | 0,30 | 0,75 | 1,50 |
| $S_{эфф}/S_0$ | — | 0,0072 | 0,0448 | 0,179 |
| f^{LP} | 0,7 | 0,165 | 0,105 | 0,030 |

Примечания:

Свищ характеризуется площадью $S_{эфф} \leq 10^{-4} \text{ м}^2$

f^{LP} – условная вероятность возникновения дефектного отверстия с характерным размером L_p .

Для расчета динамических характеристик истечения аварийная трещина моделируется в виде симметричного вытянутого ромба с соотношением длины к ширине – 8:1 [33, 66, 81]. D_N – номинальный диаметр трубопровода, м; L_p – характерный линейный размер дефектного отверстия, м; $S_{эфф}$ – эквивалентная площадь дефектного отверстия, м^2 ; S_0 – площадь поперечного сечения трубы, м^2 .

Протяженность разрыва в основном определяется вязкостью трубной стали и свойствами истекающего продукта (жидкость, газ), влияющими на снижение температуры в металле вблизи аварийного отверстия (повышение хрупкости) [5]. Для снижения вероятности образования крупных трещин обычно ставится задача по подбору характеристик металла труб таким образом, чтобы исключить образование протяженных трещин и «гильотинного» разрыва.

Существующие нормативные документы на трубы не регламентируют рассматриваемые критерии механики разрушения. Оценка вязкости разрушения металла труб малого и среднего диаметров проводят на основе результатов испытаний образцов Шарпи и Менаже (ГОСТ 9454-78). Ударная вязкость на образцах Шарпи, определяемая при температуре, равной минимальной температуре стенки трубопровода при эксплуатации, позволяет оценить сопротивляемость трубной стали на стадии развития разрушения. Ударная вязкость на образцах Менаже,

определяемая при температуре строительства характеризует сопротивляемость металла трубы зарождению и развитию трещины. Исходя из этого, можно оценить минимальную величину ударной вязкости по Шарпи и соответствующую данной трубе критическую длину сквозной трещины.

При окончательном выборе труб для сооружения рассматриваемых трубопроводов необходимо проведение комплексных исследований с целью экспериментального определения истинных свойств металла трубы и допускаемых размеров дефекта.

Удельная частота аварий на участке с возникновением дефектных отверстий определенного размера определяется по формуле:

$$\lambda_m^c = \lambda_n \cdot F^{LP}, \quad (11)$$

При внедрении компенсирующих мероприятий по повышению качества металла частота возникновения «гильотинных» разрывов может быть уменьшено в 10 раз: с 0,03 до 0,003 (Таблица 18).

2.3.3.3 Распределение аварийных исходов, построение дерева событий

Распределение источников зажигания по территории, прилегающей к месту выброса влияет на вероятность и момент воспламенения выброса, и, следовательно, на сценарий развития аварии.

«Мгновенное» воспламенение инициирует струевое горение выброса и/ или горение пролива с формированием в «ближней зоне» опасных факторов аварии: открытого пламени и теплового излучения.

Аварии с отложенным воспламенением создают возможность для формирования облака ТВС, его дрейфа и последующего воспламенения. При этом зоны поражения (открытым пламенем, тепловым излучением, ударной волной) могут находиться на значительном удалении от места выброса.

Распределение аварийных исходов на трубопроводе СУГ может быть описано следующим деревом событий (Рисунок 9).



Рисунок 9 – «Дерево событий» при разгерметизации подземного участка МТ СУГ

Возможность образования напорной струи в окружающей среде рассматривалась только для надземных и подземных трубопроводов (оба варианта без кожуха), в этом случае условная вероятность b полагалась равной 1. В случае прокладки трубопровода под водой или внутри кожуха условная вероятность b полагалась равной 0, т.е. возможность струевого пожара исключалась.

Согласно литературному обзору (пп.1.1.5) вероятность воспламенения СУГ при аварийных утечках из МТ составляет: 0,03 – для свищей, 0,13 – для утечек из трещин, 0,33 – для «гильотинных» разрывов.

Однако, это достаточно осредненная картина, в реальности вероятности зажигание (a и c на рисунке 9) зависят от распределения источников зажигания по территории [66].

В случае, когда такой анализ произвести затруднительно можно рассматривать три исхода: немедленное зажигание, отсроченное зажигание, отсутствие зажигания с равной вероятностью $a=c=0,33$. Такой подход предполагает, что в 50 % случаев имеет место воспламенение непосредственно на месте выброса и тогда образуется факел (горящие струи, пожары в котловане). В остальных 50 % случаев происходит воспламенение с задержкой в момент образования максимального по размеру облака ТВС. Такой подход представляется достаточно консервативным, поскольку предполагает максимальные зоны поражения, и близок к почти 100 %-му зажиганию.

2.3.4 Оценка риска гибели людей

При оценке риска гибели людей для каждого участка опасного сближения рассчитываются зоны действия поражающих факторов аварий (пожар пролива, струйное горение, пожар-вспышка облака ТВС) для четырех случаев аварийной разгерметизации (см. пп.2.3.3.2). Каждая авария рассматривается при определенных погодных условиях (одно из 8 направлений ветра, один из 12 месяцев года, один из 3 диапазонов ветра 1, 3 или 9 м/с, одно из двух времен суток – день или ночь). По всем этим сценариям с учетом вероятности инициирующего события (разгерметизация трубопровода) строится поле потенциального риска смертельного поражения человека, характеризующее частоту возникновения смертельных поражающих факторов аварии в данной точке территории.

Величина потенциального риска вдоль оси однониточного трубопровода $P(x_0, r_0)$, год⁻¹, в определенной точке с координатами (x_0, r_0) , где координата x_0 – координата вдоль оси трубопровода, км, r_0 – координата по оси перпендикулярной оси трубопровода, расположенной на расстоянии r_0 , км от оси магистрального трубопровода определяется по формуле:

$$P(x_0, r_0) = \int_{x_{\min_pot}}^{x_{\max_pot}} \lambda(x) \cdot \sum_{k=1}^{K_0(x)} Q_k \cdot Q_{порк}(x, x_0, r_0) dx, \quad (12)$$

где:

$\lambda(x)$ – удельная частота разгерметизации МТ в точке с координатой x вдоль оси МТ, год⁻¹·км⁻¹;

$K_0(x)$ – число сценариев развития аварии в точке с координатой x вдоль оси МТ;

Q_k – условная вероятность реализации k -го сценария развития аварии;

$Q_{порк}(x, x_0, r_0)$ – условная вероятность поражения человека в точке территории с координатой (x_0, r_0) в результате реализации k -го сценария развития аварии, произошедшей в точке МТ с координатой x .

Способ определения удельных частот различных типов разгерметизации МТ СУГ приведен в пп. 2.3.3.2, а условной вероятности реализации сценариев – в пп. 2.3.3.3. Критерии и условные вероятности поражения человека определяются соответствующей пробит-функцией.

Верхняя и нижняя границы интегрирования – x_{\min_pot} и x_{\max_pot} – определяются таким образом, что ни для одного возможного сценария аварий в точках с координатой менее x_{\min_pot} или с координатой более x_{\max_pot} вдоль оси трубопровода зоны действия поражающих факторов не будут распространяться на точку территории с координатами (x_0, r_0) .

Пример отображения распределения потенциального риска в проекции поперечного сечения трубопровода представлен ниже (Рисунок 10). На профиле по горизонтали

откладывается расстояние от оси трубопровода в метрах, по вертикали – потенциальный риск гибели человека.

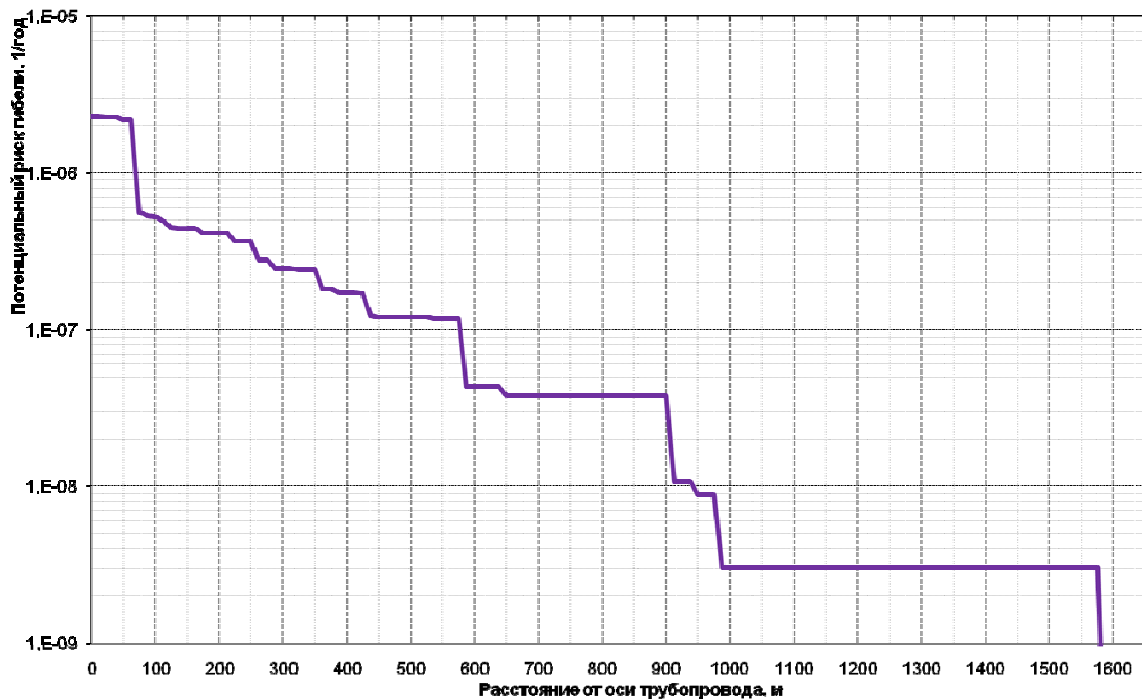


Рисунок 10 – Пример построения профиля потенциального риска в проекции поперечного сечения типового трубопровода СУГ (МТ ШФЛУ DN 500, P=3,6 МПа)

При оценке опасности для человека чаще всего нормируется показатель индивидуального риска [40] – частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых опасных факторов аварий, т.е. с учетом вероятности присутствия конкретного человека в определенной области территории.

Однако показатель индивидуального риска не дает представления о частоте аварий с гибелью людей и возможных масштабах такой аварии.

Поэтому, при оценке безопасных расстояний целесообразно использовать показатели, характеризующие интенсивность возникновения аварий со смертельными несчастными случаями: частота гибели одного (любого), 10, 30 и более человек (социальный риск, иллюстрируемый FN-кривой) [33].

Если не представляется возможным оценить вероятность присутствия людей в каждой области территории, используется показатель потенциального риска гибели человека.

Графически граница безопасных расстояний определяется изолинией на территории вдоль трассы МТ, соответствующей значению потенциальному риску гибели людей, принятому в качестве приемлемого.

В случае, если расстояние сближения участка проектируемого МТ с населенным пунктом меньше рассчитанного МБР, требуется либо перенос трассы МН, либо применение дополнительных мер по обеспечению безопасности (см. пп.2.3.3.1.2).

2.3.5 Критерии приемлемости

Ниже (Рисунок 11) в качестве обзорного примера приведены законодательно установленные критерии приемлемости индивидуального риска гибели людей (из числа населения) от промышленных аварий в разных странах мира [40, 90, 91].

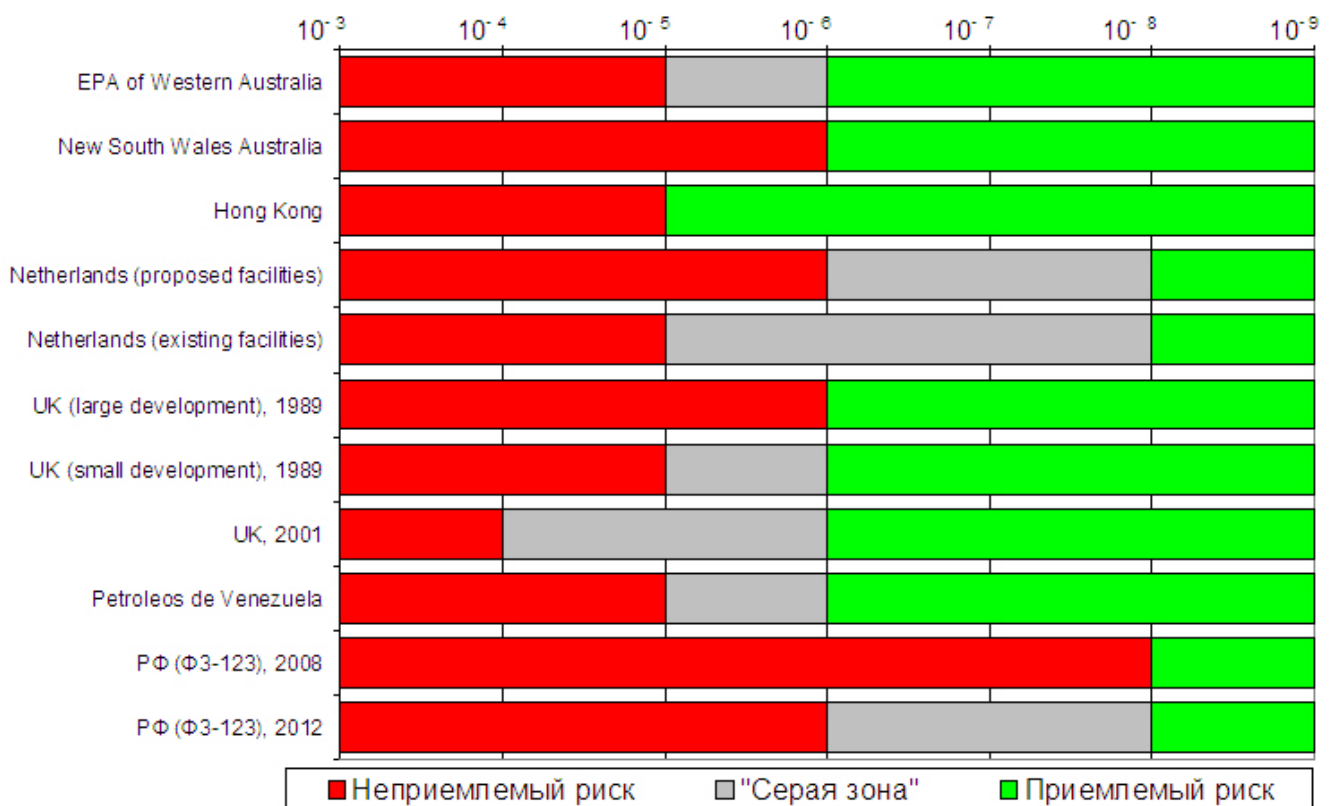


Рисунок 11 – Законодательно установленные критерии приемлемости риска гибели людей

Из рисунка 11 видно, что абсолютного и общепризнанного критерия приемлемости индивидуального риска гибели людей не существует: оценки лежат в довольно широком диапазоне – 10^{-4} – 10^{-8} год⁻¹. Так называемая «серая зона» – фактическое признание невозможности создания четкого алгоритма по обоснованию безопасности с использованием абсолютных критериев приемлемого риска.

Поэтому критерии приемлемости целесообразно устанавливать для каждого участка МТ с учетом уязвимости объектов сближения, а также восприятия опасностей аварий в массовом сознании.

Под уязвимостью понимается возможность нанесения на данном объекте максимального ущерба (в т.ч. с учетом подготовленности людей к действиям при аварии) и его общественное восприятие (социальная значимость).

Для обоснования критериев приемлемости в работе предложен подход, основанный на предварительной классификации территорий по уязвимости. Пример предлагаемой классификации представлен ниже (Таблица 20).

Таблица 20 – Пример классификации территории по уязвимости

| Классификация территории, ОПР | Индекс уязвимости |
|---|--------------------------|
| Зона с временным нахождением персонала эксплуатирующей организации | 0 |
| Зона с постоянным (в течение рабочей смены) нахождением персонала эксплуатирующей организации | 1 |
| Соседние промышленные и сельскохозяйственные объекты | 2 |
| Транспортные коммуникации, отдельно стоящие жилые дома, дачные участки | 3 |
| Населенные пункты, объекты социальной инфраструктуры, рекреационные зоны | 4 |

Восприятие опасностей аварий и показателей риска аварий

Восприятие опасностей в общественном сознании может существенно отличаться от реального состояния. Поэтому для выбора критериев приемлемости введем безразмерную величину – децибел риска гибели человека (дБргЧ).

Децибелы широко применяются в различных областях техники, где требуется измерение величин, меняющихся в широком диапазоне (на несколько порядков).

Для применения децибелов и оперирования логарифмами вместо процентов или долей есть ряд причин:

- характер отображения в органах чувств человека и животных изменений течения многих физических и биологических процессов пропорционален не амплитуде входного воздействия, а логарифму входного воздействия (закон Вебера-Фехнера). Поэтому вполне естественно шкалы единиц устанавливать именно логарифмические, в том числе, используя децибелы (для адекватного относительного восприятия уровня опасности);
- удобство логарифмической шкалы в тех случаях, когда в одной задаче приходится оперировать одновременно величинами, различающимися на много порядков;
- удобство отображения и анализа величины, изменяющейся в очень широких пределах.

Децибел риска гибели человека (дБргЧ) служит для определения отношения двух величин: измеряемой величины риска (R) и фонового уровня риска (R_0):

$$R_{dB} = 10 \lg \frac{R}{R_0} \quad (13)$$

В качестве опорного/ фонового уровня (R_0) целесообразно принять риск гибели людей в пожарах и ДТП в России за последние 5 лет (как наиболее знакомых для большинства техногенных опасностей). Оценка $R_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$, (т.е. 288 погибших на 1 млн. населения в среднем за 2008-2012 гг. [92]).

Ниже приведен пример установления критериев приемлемости для объектов с присутствием людей (Таблица 21).

Таблица 21 – Пример установления критериев приемлемости для объектов с присутствием людей

| Индекс уязвимости | Индивидуальный риск гибели человека, дБргЧ | Во сколько раз отличается по сравнению с фоновым риском | Индивидуальный риск гибели человека, год ⁻¹ (*справочно) |
|-------------------|--|---|---|
| 0 | 0 | фоновый риск | 3×10^{-4} |
| 1 | -10 | меньше в 10 раз | 3×10^{-5} |
| 2 | -20 | меньше в 100 раз | 3×10^{-6} |
| 3 | -30 | меньше в 1 тыс. раз | 3×10^{-6} |
| 4 | -40 | меньше в 10 тыс. раз | 3×10^{-8} |

Для примера ниже представлены фоновые значения опасностей аварий в децибелах риска гибели человека для некоторых опасных отраслей промышленности (Таблица 22).

Таблица 22 – Фоновый риск гибели людей на российских опасных производственных объектах²¹

| Отрасль промышленности | Верхняя оценка среднего риска гибели человека за 2007-2011 гг. | |
|---|--|----------------------|
| | дБргЧ | год ⁻¹ |
| Производство, хранение и применение взрывчатых веществ промышленного назначения | +6,9 | $1,4 \times 10^{-3}$ |
| Угольная промышленность | +4,8 | $8,6 \times 10^{-4}$ |
| Горнорудная и нерудная промышленность | -3,1 | $1,4 \times 10^{-4}$ |
| Нефтедобывающая промышленность | -3,5 | $1,3 \times 10^{-4}$ |
| Нефтеперерабатывающая промышленность | -6,1 | 7×10^{-5} |
| Химическая и нефтехимическая промышленность | -10,4 | $2,6 \times 10^{-5}$ |

²¹ По данным рискпром.рф

| Отрасль промышленности | Верхняя оценка среднего риска гибели человека за 2007-2011 гг. | |
|---------------------------------|--|----------------------|
| | дБргЧ | год ⁻¹ |
| Металлургическая промышленность | -11,4 | $2,1 \times 10^{-5}$ |
| Газодобывающая промышленность | -18,0 | 4×10^{-6} |

Эти значения нельзя сразу принимать в качестве приемлемых; требуется специальное обсуждение, предметом которого станет вопрос, а на сколько от текущего фоновое значения должен отличаться приемлемый риск в той или иной отрасли (и даже на конкретном ОПО). Этот «коэффициент запаса» не может быть одинаковым для всех ОПО и всех отраслей – понятно, что он должен зависеть от «размещения» опасности на риск-шкале. Этот во многом социально-политический вопрос выходит за рамки настоящего исследования.

Выводы к главе 2

1. Проведен обзор существующих подходов к вопросу размещения трубопроводов в непосредственной близости от городских (густонаселенных) территорий в России и за рубежом. Анализ зарубежной практики показал фактический отказ от установления безопасных расстояний между трубопроводами и объектами воздействия в пользу «защиты временем» (сокращение времени случайного нахождения людей в опасных зонах и снижение вероятности перерастания инцидентов в крупные аварии).
2. Исследованы основные способы определения безопасных расстояний от МТ до объектов с присутствием людей. По результатам рассмотрения различных способов определения безопасных расстояний от МТ до объектов воздействия сделан вывод, что детерминистские подходы, которые применимы в большинстве случаев для газо- и нефтепроводов, для трубопроводов СУГ, не позволяют реализовывать проекты по строительству и реконструкции продуктопроводов ШФЛУ и нестабильных конденсатов вследствие невозможности прокладки их трасс на «абсолютно безопасном» удалении от соседних объектов. В целях обеспечения безопасности людей в условиях сложившихся ландшафтных или инфраструктурных ограничений в качестве компромисса для отдельных участков сближения предложено устанавливать минимально безопасные расстояния (с ограничением по потенциальному или индивидуальному риску гибели людей) с обязательным обоснованием соответствующих компенсирующих мероприятий. Для решения этой проблемы в настоящей работе предложено использовать методологию анализа опасности и количественной оценки риска.
3. Разработан алгоритм риск-ориентированного подхода оценки безопасных расстояний от МТ до объектов с присутствием людей.
4. Исследование особенностей аварийных выбросов на продуктопроводах СУГ позволило выделить типовые сценарии аварий, в т.ч. сценарий максимальной гипотетической аварии. Поскольку наибольшая опасность аварий на продуктопроводах СУГ связана с возможностью дрейфа и сгоранием облаков ТВС, для определения безусловно безопасных расстояний и выделения высокоопасных участков необходимо и достаточно рассчитать расстояние дрейфа облака ТВС с сохранением способности к воспламенению (критерий – концентрация в облаке 0,5 НКПВ).
5. По результатам критического анализа существующих методик по оценке частоты аварий на МТ отмечены трудности их применения для новых и проектируемых МТ, в т.ч. связанные с избыточной конкретизацией условий прокладки, но недостаточным учетом компенсирующих мероприятий, повышающих надежность проектируемого МТ по сравнению со

среднестатистическим эксплуатируемым. Для устранения этого методического недостатка в работе предложен способ оценки частоты аварийных утечек на проектируемых (реконструируемых) участках МТ, учитывающий влияние антропогенных и природных особенностей прокладки и компенсирующих мероприятий на степень риска аварии. Также учтена возможность ограничения размеров зон действия поражающих факторов при исключении (снижении вероятности) образования крупных трещин в случае применения трубной стали повышенной вязкости, стойкой к развитию трещин, либо ограничении кольцевых напряжений в трубе.

6. Предложена концепция установления критериев приемлемого риска на основе классификации территорий по уязвимости с учетом особенностей восприятия опасностей аварий в массовом сознании. Для адекватного сравнительного восприятия уровня опасности в настоящем исследовании предложена к использованию безразмерная величина – децибел риска гибели человека. Преимуществами использования децибелов являются удобство отображения и сравнительного анализа рассчитанных величин.

ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ШФЛУ

В третьей главе проведено обобщение результатов применения методологии КОР для определения безопасных расстояний от МТ СУГ. Описаны неопределенности и приведены ограничения для применения расчетной модели. Выделены и проранжированы по степени значимости технологические и внешние факторы, влияющие на размеры зон поражения и безопасные расстояния от МТ СУГ.

На основе анализа результатов оценки риска и практики определения безопасных расстояний для МТ ШФЛУ выявлены функциональные зависимости между технологическими параметрами МТ СУГ (диаметр, давление в трубопроводе) и интенсивностью аварийного истечения, условиями рассеяния в момент аварии и расстояниями дрейфа образовавшегося облака ТВС. Оценена степень влияния частоты разгерметизации МТ, в т.ч. при исключении протяженных трещин, а также типичных метеоусловий на территориальное распределение потенциального риска гибели людей.

По результатам использования традиционной методологии анализа риска на основе исследования влияния технологических параметров МТ и окружающих условий предложен инженерный подход к оценке безопасных расстояний для МТ ШФЛУ (графо-аналитические зависимости). Разработаны рекомендации для определения безопасных расстояний на основе приближенной оценки максимальных зон действия поражающих факторов возможных аварий в зависимости от технологических параметров МТ ШФЛУ (P, DN).

3.1 Неопределенности и ограничения применения расчетной модели

Как и любая иная, применяемая расчетная модель оценки риска аварии имеет неопределенности и связанные с ними ограничения. К основным допущениям и соответствующим ограничениям могут быть отнесены следующие:

- традиционная методология оценки риска на МТ СУГ обычно не учитывает особенности рельефа, поэтому для сохранения достоверности результатов расчетов последствий аварий по применяемой модели, необходимо посредством проектных решений исключить растекание жидкой фракции и дрейфа вторичного облака (шлейфа) в сторону нижерасположенного объекта воздействия путем принятия инженерных мероприятий (возведение валов, траншей, амбаров с учетом рельефа местности);

- анализ проводился в предположении отсутствия мощных источников инициирования, способных привести к детонации сгорающего облака;
- при расчетах безопасных расстояний подробно не рассматривается вопрос взрывоустойчивости зданий, поражение людей вторичными факторами пожара и взрыва, поэтому критерии приемлемого риска аварий для подобных участков МТ СУГ необходимо ориентировать на более консервативные значения;
- имеющихся статистических и исходных данных на практике, как правило, недостаточно для оценки вероятности воспламенения утечек в зависимости от распределения источников зажигания по территории для разных ландшафтов и для оценки изменения вероятности воспламенения во времени, что существенно повышает роль мер по оперативному обнаружению утечки и реагирования на аварию и ЧС, в т.ч. перекрытие дорог, оповещение, эвакуация.

Для компенсации этих и других неопределенностей в модели оценки риска аварии на МТ СУГ принимаются следующие консервативные допущения:

- расчет дрейфа проводится по стационарной максимальной интенсивности истечения (на 60-ой сек.);
- максимальные зоны поражения устанавливаются по наихудшим условиям рассеяния;
- в качестве зоны поражения принимается область загазованности с концентрацией 0,5 НКПВ;
- предполагается, что при рассеянии облако воспламеняется в момент, когда оно покрывает наибольшую площадь.

Анализ результатов применения модели оценки риска аварий на МТ СУГ указывает на приоритет ее использования для обоснования минимальных безопасных расстояний и на ограниченность ее использования для обоснования безопасности при отступлений от требований промышленной безопасности, тем более без разработки соответствующих компенсирующих мероприятий (например, исключение запорной арматуры на отдельных участках без разработки проектных решений по заградительным валам, накопительным амбарам и мерам оперативного обнаружения утечек и оповещения населения о значительных аварийных проливах).

3.2 Анализ результатов оценки риска и практики определения безопасных расстояний для магистральных трубопроводов ШФЛУ

Разработанный риск-ориентированный подход был использован для определения безопасных расстояний и оценки риска аварий ряда действующих, реконструируемых и проектируемых продуктопроводов ШФЛУ ОАО «Сибур Холдинг» (шесть продуктопроводов общей протяженностью более 2 тыс. км):

- «Губкинский ГПК – Ноябрьская Наливная эстакада» DN 250 (проектируемый);
- «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция» DN 500 (проектируемый);
- «Губкинский ГПЗ – Нижневартовский ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ – Тобольский НХК» DN 500 (проектируемый);
- «Сургут – Южный Балык» DN 500 (проектируемый);
- «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим» DN 700 (действующий);
- «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим» DN 700 (проектируемый).

Конфигурация действующих и проектируемых продуктопроводов ШФЛУ ОАО «Сибур Холдинг» представлена ниже (Рисунок 12).

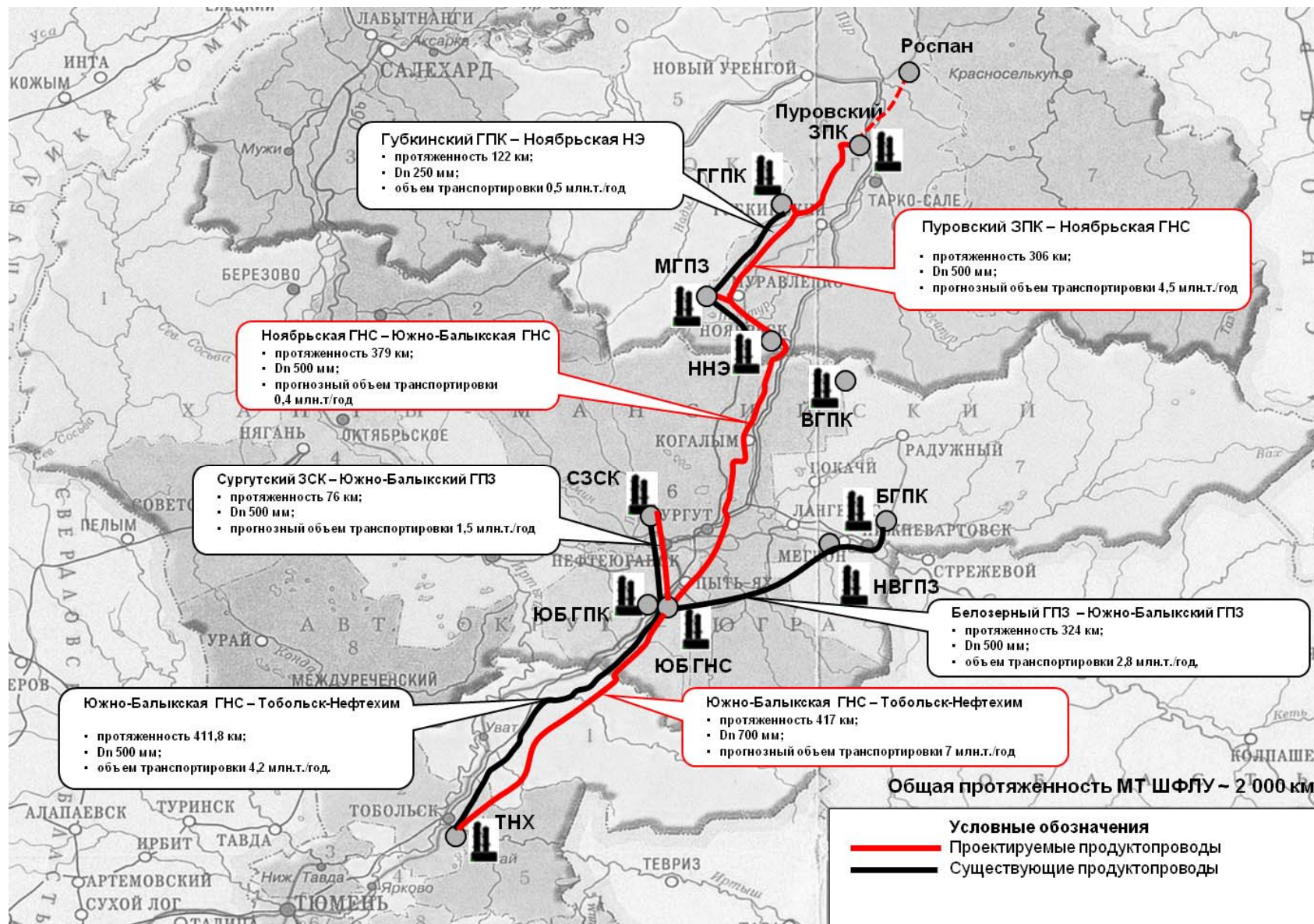


Рисунок 12 – Схема расположения проектируемых и действующих продуктопроводов ШФЛУ ОАО «Сибур Холдинг»

Основные результаты расчетов безусловно безопасных расстояний (по зонам действия поражающих факторов МГА) и минимальных безопасных расстояний (по критериям приемлемого риска гибели людей) от МТ ШФЛУ до объектов с присутствием людей представлены ниже (Таблица 23).

Согласно представленным результатам размеры зон поражения при аварийном выбросе ШФЛУ для МТ DN 700 могут достигать 1,6-2,4 км, а минимальные безопасные расстояния при потенциальном риске $10^{-6} \dots 10^{-8}$ год⁻¹ оцениваются в 0,5...1,5 км.

Для МТ DN 500 размеры зон поражения могут достигать 1,1-2,2 км, минимальные безопасные расстояния при потенциальном риске $10^{-6} \dots 10^{-8}$ год⁻¹ составляют 0,3...1,3 км.

Для МТ DN 250 размеры зон поражения могут достигать 0,7 км, минимальные безопасные расстояния при потенциальном риске 10^{-8} год⁻¹ составят 0,35 км, риск 10^{-6} не достигается даже в непосредственной близости от оси МТ.

Полученные расчетные значения безусловно безопасных расстояний в 2-4 раза меньше, а минимальные безопасные расстояния по критерию 10^{-8} год⁻¹ – в 3-5 раз меньше установленных нормативных значений по СНиП 2.05.06-85* для городов и поселений городского типа (п.2.1.1).

Таблица 23 – Обобщение результатов практических работ по анализу риска аварий на МТ ШФЛУ

| № | Параметры трубопровода | Район прокладки трубопровода | Доля вскипания при аварии | Зона действия поражающих факторов при МГА (0,5 НКПВ/НКПВ), м | Интенсивность аварий, 1/год/1000 км | Расстояние, м, на котором достигается потенциальный риск гибели человека, год ⁻¹ | | | Ссылка на отчет |
|---|---|------------------------------|---------------------------|--|-------------------------------------|---|--------------------|--------------------|-----------------|
| | | | | | | 1·10 ⁻⁸ | 1·10 ⁻⁷ | 1·10 ⁻⁶ | |
| 1 | Губкинский ГПК – Ноябрьская наливная эстакада (проектируемый) DN 250, L=127 км P = 4,4÷3 МПа Производительность 0,9 млн.т./год | Тюменская обл. | | 670/260 | 0,13 | 350 | 120 | - | [101] |
| 2 | Белозерный ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ (проектируемый) DN 500, L= 324 км P = 2,95÷1,5 МПа Производительность 2,65 млн.т./год | ЯНАО | 0,2 | 1150 | 0,13 | 1000 | 600 | 300 | [93] |
| 3 | Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская ГНС (проектируемый) DN 500, L= 685 км P= 6,1÷1,45 МПа Производительность 8 млн.т./год | ЯНАО, ХМАО | 0,33-0,43 | 2200/ 1210 | 0,19 | 1250 | 1160 | 330 | [97, 105,106] |

| | | | | | | | | | |
|---|---|------|---------|------------|----------------------------|---------------|--------------|---------|---------------------|
| 4 | Сургутский ЗСК – Южно-Балыкский ГПЗ DN 500, L=43 км P = 3,8÷1,3 МПа Производительность 1,5 млн.т./год | ХМАО | 0,3-0,4 | 1660/ 980 | 0,012 (0,12) ²² | 990 (1050) | 275 (950) | - (270) | [107] |
| 5 | ЮБ ГПЗ – Тобольский НХК (действующий) DN 700, L=412 км P _{раб} = 2,5 МПа Производительность 2,5 млн.т./год | ЯНАО | 0,2 | 1650/ 610 | 0,13 | 1500 | 1000 | 500 | [100] |
| 6 | ЮБ ГНС – Тобольск-Нефтехим (проектируемый) DN 700, L=417км P _{раб} = 4,1 МПа Производительность 8 млн.т./год | ЯНАО | 0,36 | 2400/ 1320 | 0,019 | 1400-1100 | 900-700 | 0 | [96, 102, 103, 104] |

²² Приведены значения для проектируемого МТ, в скобках – для существующего МТ

3.3 Влияние основных технологических и природных факторов на размеры максимальных зон поражения при авариях на магистральных трубопроводах СУГ

Зоны возможного поражения (различные по природе своего возникновения и развития) зависят в разной степени от:

- интенсивности выброса, определяемой размером аварийного отверстия, расположением аварийного участка относительно насосной станции, профилем трассы;
- объема выброса, определяемого профилем трассы, характеристиками системы обнаружения утечек, расположением и временем перекрытия задвижек;
- локальных метеоусловий (в т.ч. направление и скорость ветра в приземном слое атмосферы, устойчивость атмосферы, температура воздуха);
- рельефа местности (ландшафтные уклоны и оформившиеся водотоки);
- свойств подстилающей поверхности (шероховатость, влагопроницаемость, дренаж) и ее температуры;
- физико-химических свойств перекачиваемого продукта (температура кипения; теплоемкость, теплота испарения, НКПВ, молекулярный вес) и его температуры;
- особенности прокладки трубопроводов (наземный, подземный, подводный, надводный).

При применении расчетной модели в работе было проанализировано влияние основных технологических и природных факторов на максимальные размеры зон смертельного поражения. Основные результаты этого анализа представлены ниже (Таблица 24). Вектор влияния условно обозначен знаками «+» и «-», а степень влияния – последовательным числом соответствующих условных знаков.

Таблица 24 – Степень влияния основных технологических и природных факторов на размеры максимальных зон поражения при авариях на МТ СУГ

| № п/п | Фактор | Характер влияния | Степень влияния на размеры зон действия поражающих факторов при МГА ²³ |
|-------|--|--|---|
| 1. | Диаметр эквивалентного отверстия истечения | Определяет интенсивность аварийного истечения продукта | +++ |
| 2. | Компонентный состав, температура и свойства транспортируемого продукта | Определяет интенсивность истечения и испарения продукта, пределы воспламенения | + |

²³ Влияние на размеры зон поражения: (+++) до 10 и более раз, (++) до 5 раз, (+) до 2 раз, (-) не влияет/слабо влияет на размеры максимальных расчетных зон поражения.

| № п/п | Фактор | Характер влияния | Степень влияния на размеры зон действия поражающих факторов при МГА ²³ |
|-------|---|--|---|
| 3. | Время от момента разгерметизации до перекрытия аварийной секции | Влияет на продолжительность истечения продукта, объем аварийного выброса, размер пролива (п.5) | ⁻²⁴ |
| 4. | Давление в трубопроводе до аварии в месте разрыва (расположение места аварии относительно насосной станции) | Влияет на интенсивность истечения продукта | ++ |
| 5. | Размеры (площадь) лужи разлития жидкости | Определяет интегральную интенсивность испарения жидкости, задает форму и геометрические размеры пламени пожара | ⁻²⁵ |
| 6. | Температура и проницаемость грунта, температура воздуха | Влияют на интенсивность испарения разлитой жидкости | + |
| 7. | Метеорологические факторы: скорость и направление ветра, класс стабильности атмосферы | Влияют на интенсивность испарения; определяют особенности рассеивания и переноса паров в атмосфере, размеры облака; задают угол и направление наклона пламени при пожаре пролива | ++ |
| 8. | Рельеф местности и шероховатость поверхности вблизи аварийного участка | Влияют на особенности переноса и рассеивания облака тяжелого газа. Рельеф определяет площадь растекания жидкости, см. п.5 | + |
| 9. | Распределение источников зажигания по территории, прилегающей к месту аварии | Влияет на вероятность и момент воспламенения парового облака и, следовательно, на размеры зоны прямого огневого и барического воздействия | ⁻²⁶ |
| 10. | Ландшафтные (леса, кустарники) и топографические | Влияют на скорость (режим) сгорания облака тяжелого газа | ⁻²⁷ |

²⁴ При наличии современной системы обнаружения утечек и с учетом адекватных действий персонала.

²⁵ В отсутствие выраженных особенностей рельефа.

²⁶ В работе принято консервативное допущение о воспламенении облака при достижении им максимальных размеров.

²⁷ При типовых источниках инициирования размеры зон смертельного поражения волной сжатия, в т.ч. вследствие разрушения зданий, как правило, не превышают зон воздействия открытым пламенем/ тепловым излучением и находятся в пределах облака ТВС с концентрацией 0,5 НКПВ.

| № п/п | Фактор | Характер влияния | Степень влияния на размеры зон действия поражающих факторов при МГА ²³ |
|-------|---|---|---|
| | условия вблизи аварийного участка | | |
| 11. | Степень оперативности действий персонала и аварийных служб по локализации аварии и зон их негативного воздействия | Влияют на развитие сценариев аварии и размеры зон поражения, потери продукта, экологический ущерб | - |

Перечисленные в таблице 24 факторы опосредованно или напрямую влияют на конфигурацию и размеры зон действия поражающих факторов аварии. Проведенный анализ показал, что наибольшее влияние на размеры максимальных зон поражения при авариях на МТ СУГ (дрейф и сгорание облака ТВС), оказывают факторы, определяющие интенсивность аварийного истечения СУГ (размер аварийного отверстия, давление в трубопроводе) и условия рассеяния в момент аварии.

Большая часть перечисленных выше факторов (Таблица 24) являются детерминированными: свойства перекачиваемого вещества (2), технологические параметры трубопровода (4), особенности окружающей местности (8). Интенсивность выброса в большей степени определяется случайной величиной размера отверстия аварийной разгерметизации (1). Метеорологические факторы, влияющие на дрейф и рассеяние облака ТВС в момент аварии (7) также являются случайной величиной.

Комбинация этих детерминированных и случайных технологических и природных факторов определяет сложное многообразие сценариев аварий, подробное и исчерпывающее описание которых практически невозможно. Поэтому в практике анализа риска аварий обычно выделяют типовые сценарии аварий (группы сценариев – п.п.2.3.1.2, 2.3.4), по которым и ведут консервативный расчет зон возможного поражения. Когда таких расчетов проведено достаточно много, появляется возможность определить зависимости между природно-технологическими (техно-ландшафтными) факторами и размерами возможных зон поражения для решения практической инженерно-проектировочной задачи предварительного размещения продуктопровода ШФЛУ в стесненных антропогенных условиях.

3.4 Характерные зависимости между природно-технологическими факторами и размерами возможных зон поражения при авариях на магистральных трубопроводах ШФЛУ

На основании применения общей методологии анализа опасностей и количественной оценки риска аварий, для МТ СУГ был разработан инженерный подход к оценке безопасных расстояний для высокоопасных участков МТ ШФЛУ В подходе из всего спектра факторов, влияющих на риск гибели людей, были выделены наиболее значимые (Рисунок 13).

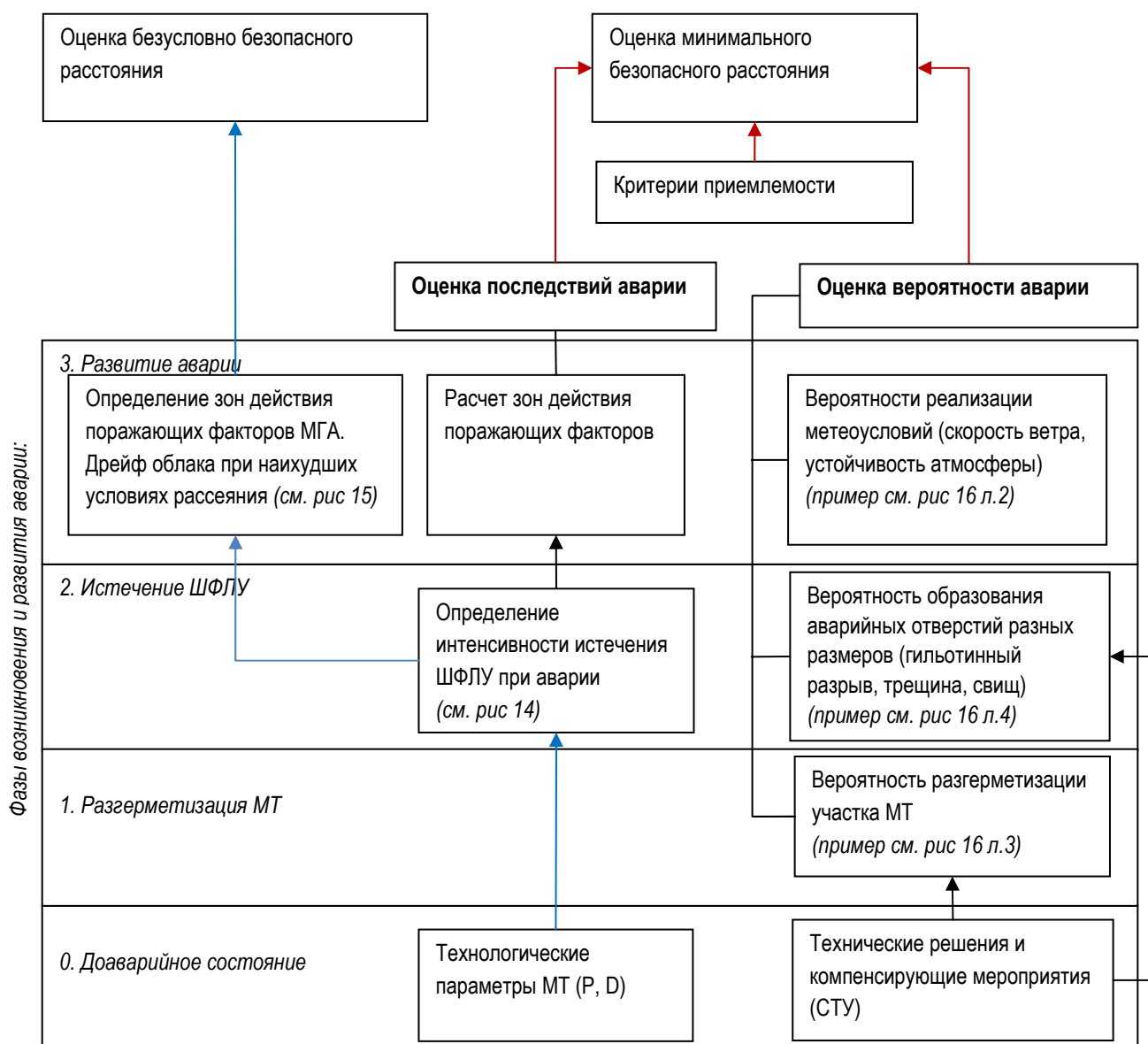


Рисунок 13 – Схема типового инженерного подхода оценки безопасных расстояний при обосновании безопасности высокоопасных участков МТ ШФЛУ

Таким образом, согласно разработанному риск-ориентированному подходу, безопасное расстояние от МТ СУГ до ОПЛ определяется как функция зон действия поражающих факторов возможных аварий и вероятности их реализации.

Оценка последствий аварии

Для оценки безопасных расстояний в первом приближении необходимо оценить максимальные зоны действия поражающих факторов при авариях (см.2.3.2). Как следует из глав 2, 3 наибольшие зоны поражения при аварии на МТ СУГ определяются дрейфом облака шлейфа, образовавшегося в течение первых минут после аварийной разгерметизации (наиболее интенсивное истечение). Интенсивность выброса определяется площадью отверстия аварийной разгерметизации и давлением на участке продуктопровода, а расстояние дрейфа образовавшегося облака в основном зависит от условий рассеивания (скорость ветра, устойчивость атмосферы).

На основании обобщения результатов работ [93-110] были получены инженерные зависимости интенсивности выброса от давления в трубопроводе для различных размеров аварийных отверстий (Рисунок 14).

Приведенные размеры отверстий аварийной разгерметизации соответствуют крупным, средним и малым трещинам для труб DN 700, DN 500, DN 250 (п.1.1.4).

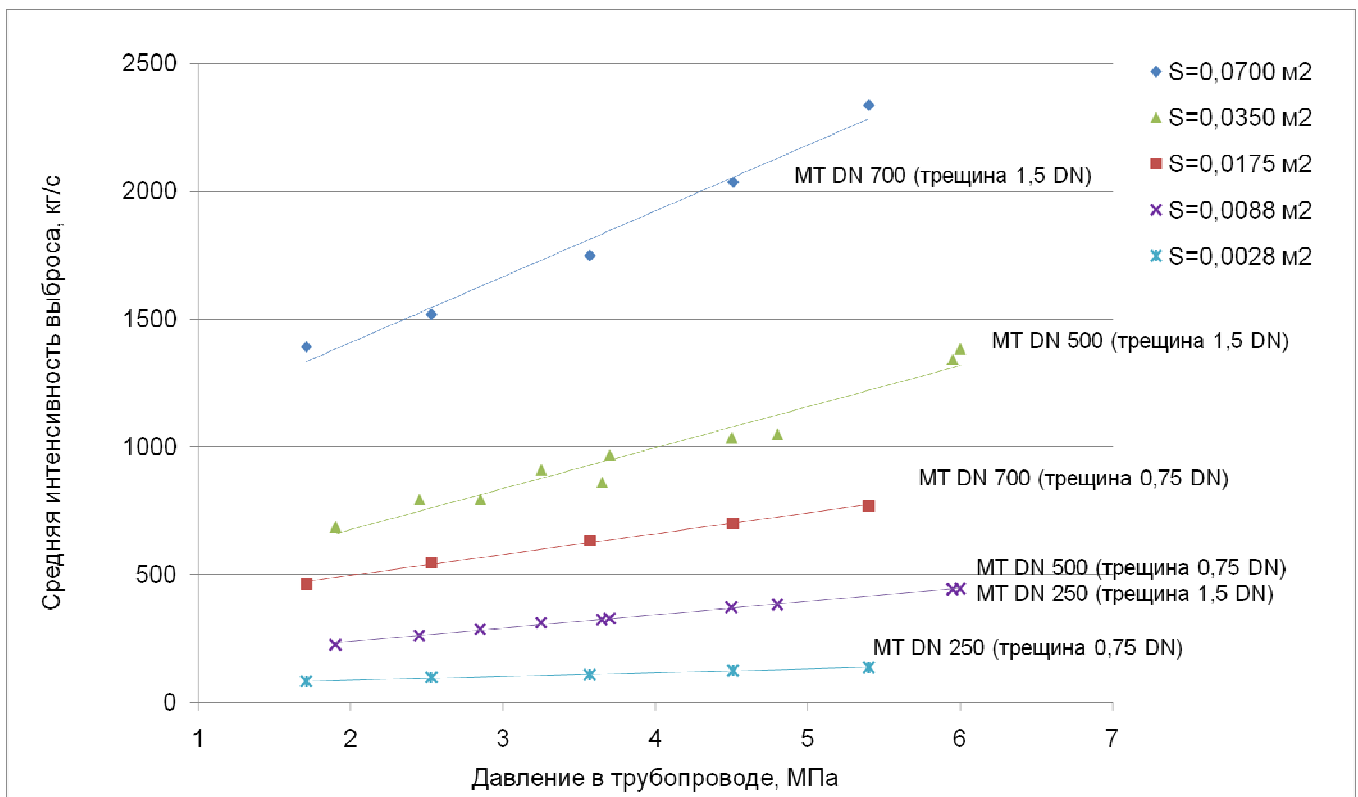


Рисунок 14 – Зависимость средней интенсивности аварийного выброса от давления перекачки для различных размеров аварийных отверстий

Из графиков (Рисунок 14) видно, что основным фактором, влияющим на интенсивность аварийного истечения, является площадь отверстия разгерметизации: при увеличении размера отверстия в 2 раза интенсивность выброса возрастет в 1,7- 2 раза.

При увеличении давления на участке МТ в 3 раза (с 2 до 6 МПа) интенсивность утечки для крупных и средних трещин увеличивается в 1,7-2 раза, для малых в 1,4-1,6 раза.

Для транспортируемых составов (табл.) была рассчитана доля вскипания, которая при температуре транспортировки составила от 20 до 40 % от массы выброса.

Типовая зависимость интенсивности выброса и условий рассеяния на расстояние дрейфа облака ТВС (при вскипании около 30 % от массы выброса) приведена ниже (Рисунок 15).

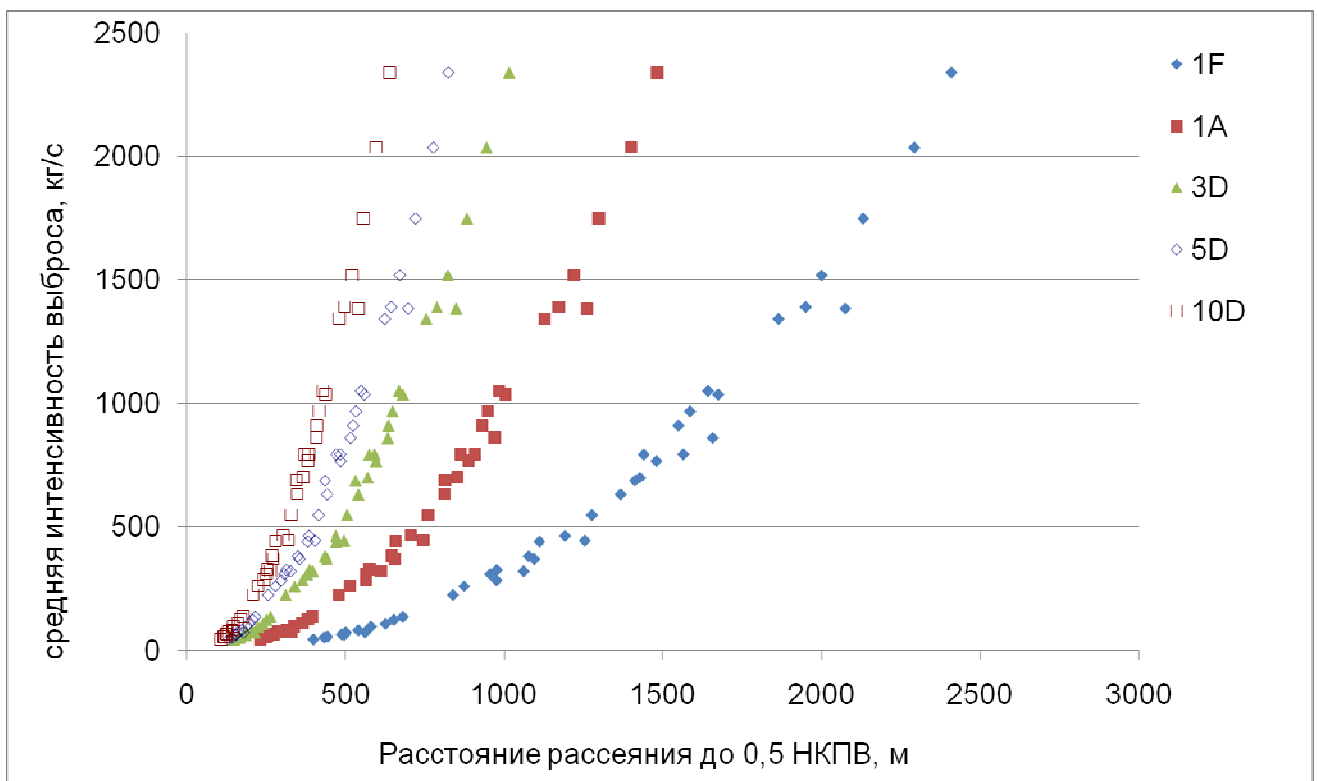


Рисунок 15 – Зависимость расстояния рассеяния шлейфа выброса до 0,5 НКПВ от интенсивности аварийного выброса при различных состояниях атмосферы

Анализ полученных зависимостей показал, что с возрастанием интенсивности выброса в 10 раз (с 225 до 2337 кг/с) расстояние дрейфа облака увеличивается в 3 раза.

Также на расстояние дрейфа сильно влияет изменение условий рассеяния²⁸. Из рассчитанных типичных условий рассеяния наибольшие расстояния дрейфа возможны при неблагоприятных условиях рассеяния: при сильной инверсии (F) расстояние дрейфа будет в 1,6-

²⁸ Используется классификация по Паскуиллу [111].

1,7 раза больше, чем при сильной конвекции (А) и в 2,4-2,5 раза больше чем при для нейтральном состоянии атмосферы (D). Влияние скорости ветра рассмотрено для нейтральной атмосферы (D): при увеличении скорости ветра с 3 до 10 м/с зоны рассеяния уменьшаются в 1,6 раза.

Оценка вероятности аварии

Вероятностная оценка зон поражения характеризуется распределением потенциально-территориального риска вблизи МТ.

На распределение потенциального риска оказывают влияние как внутренние технологические, так и внешние природно-антропогенные факторы:

- вероятность разгерметизации;
- распределение аварийных отверстий по размеру;
- вероятность воспламенения;
- изменение вероятности воспламенения во времени (условная вероятность мгновенного и отложенного воспламенения);
- повторяемость условий рассеивания;
- роза ветров;
- климатическая характеристика территории;
- свойства подстилающей поверхности (шероховатость).

Для оценки влияния различных факторов на распределение потенциального риска гибели людей, находящихся вблизи МТ рассчитаны 4 варианта (Рисунок 16):

Первый, «базовый» вариант характеризуется средней вероятностью разгерметизации – по данным аварийности на российских МТ за последние 5 лет, типичным распределением размеров дефектных отверстий (2.3.3.1.3), условной вероятностью воспламенения 0,3 и следующим повторяемостью метеоусловий: 1F – 0,05; 1A – 0,05; 3D – 0,4; 5D – 0,4; 10D – 0,1.

Второй вариант предусматривает другие типичные условия рассеивания. Повторяемостью метеоусловий: 1F – 0,25; 1A – 0,25; 3D – 0,25; 5D – 0,25.

Третий вариант – сокращение частоты разгерметизации на участке продуктопровода путем внедрения компенсирующих мероприятий (в данном примере – сокращение в 10 раз по сравнению со средней интенсивностью разгерметизаций, характерных для действующих российских МТ).

Четвертый вариант – сокращение доли протяженных трещин, крупных разрывов при применении трубной стали повышенной вязкости, сокращении кольцевых напряжений в трубопроводе (доля протяженных трещин снижена в 10 раз: с 0,03 до 0,003).

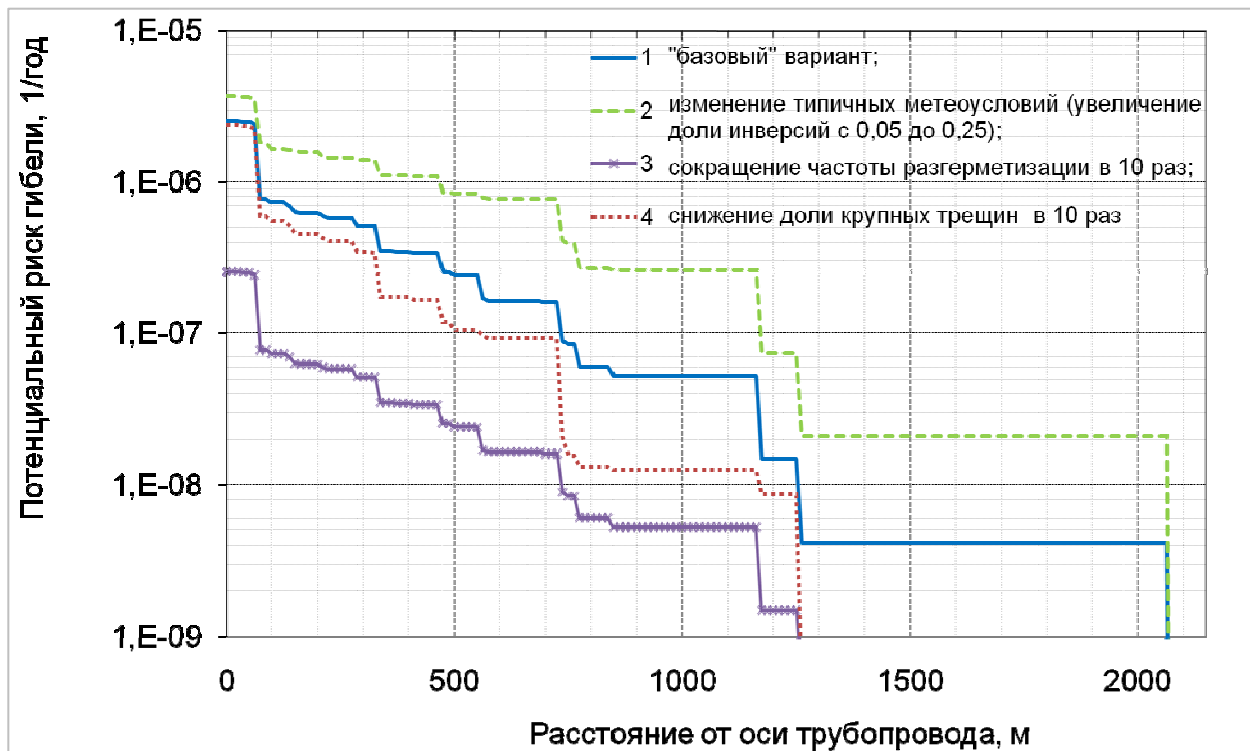


Рисунок 16 – Основные факторы, влияющие на распределение потенциального риска (на примере МТ ШФЛУ DN 700, P=3,8 МПа)

Из рисунка 16 видно, что распределение показателей риска сильно завязано на метеостатистике. В данном случае изменение характерных условий рассеяния увеличивает расстояния достижения потенциального риска 10^{-8} , 10^{-7} до 1,6 раза: с 2050 до 1250 м.

С целью сокращения минимальных безопасных расстояний наиболее эффективным является внедрение компенсирующих мероприятий, повышающих надежность МТ (п.2.3.3.1.3). Степень влияния зависит от профиля риска и от критерия приемлемости. Для примера на рисунке 16: сокращение частоты разгерметизации в 10 раз снижает минимальное безопасное расстояние по критерию 10^{-8} год⁻¹ в 1,7 раз: с 1250 до 720 м.

Технические решения по исключению крупных трещин (вязкость трубной стали, сокращение кольцевых напряжений) перераспределяет доли аварийных утечек, что также сказывается на сокращении минимальных безопасных расстояний. Но основное преимущество ограничения образования крупных трещин – минимизация, или исключение аварий с наибольшими зонами поражения.

3.5 Расстояния зон поражения максимальных гипотетических аварий для типовых МТ ШФЛУ

На разных стадиях проекта определение минимальных безопасных расстояний может требоваться с различной точностью.

На начальном этапе выполнения изыскательских работ для определения возможного коридора прокладки трубопровода с учетом безопасности населения и персонала соседних предприятий требуется знание максимально возможных зон действия поражающих факторов возможных аварий, т.н. безусловно безопасных расстояний.

Для оценки безопасности трассы проектируемого МТ и выделения отдельных критичных участков опасных сближений предлагается подход с «оценкой сверху», основанный на полученных инженерных зависимостях с поправкой на неопределенность (состав, разница температур ОС и продукта, определяющие долю вскипания) (Рисунок 17, Таблица 25).

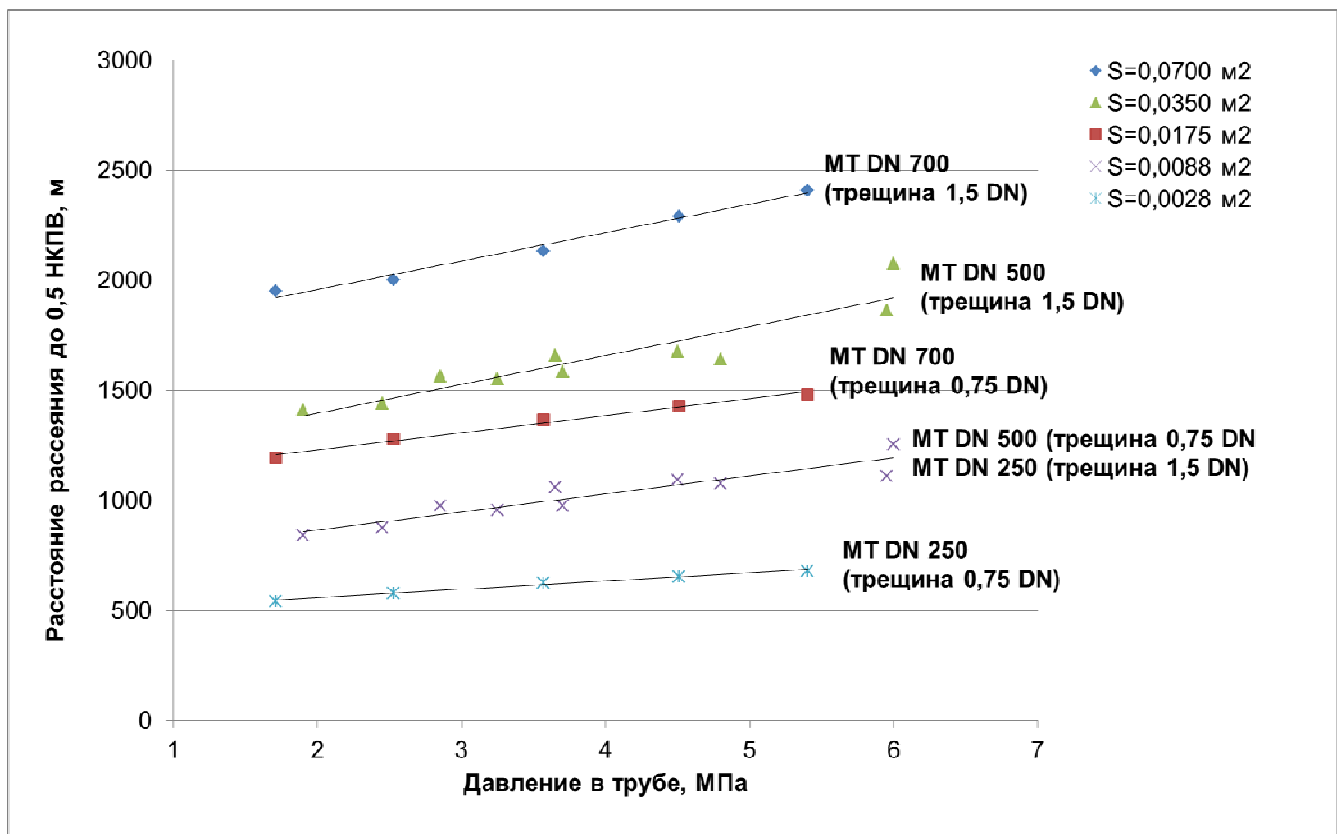


Рисунок 17 – Безусловно безопасные расстояния от оси МТ ШФЛУ

Таблица 25 – Обобщенная таблица по рассчитанным безопасным расстояниям

| Параметры трубопровода | Безопасные расстояния, м: Рассеяние облака до 0,5 НКПВ (в скобках – при применении технических решений по исключению крупных трещин) |
|-------------------------------|---|
| DN 250, P=1,5-4 МПа | 800-1000 (500-700) |
| DN 500, P=2-6 МПа | 1500-2000 (800-1200) |
| DN 700, P=2-6 МПа | 2000-2500 (1200-1500) |

Приведенные значения следует считать ориентировочными, т.к. они не учитывают конкретный компонентный состав, температуру транспортировки, изменение давления по трассе, конкретные метеорологические условия в районе прокладки продуктопровода, особенности рельефа местности, но они необходимы для предварительного ориентирования трассы проектируемого МТ (риск-ориентированный подход).

Эти результаты не носят утвердительный характер и подлежат уточнению с учетом конкретного варианта и условий прохождения трассы продуктопровода и его детальных характеристик.

Дальнейшее обоснование безопасных расстояний в проектной документации в соответствии с требованиями нормативных документов МЧС и Ростехнадзора может проводиться по методологии и алгоритму, предложенным в данной работе.

3.6 Основные результаты определения безопасных расстояний

Применение разработанного риск-ориентированного подхода позволяет построить карту опасностей для каждого конкретного участка МТ СУГ, на основании которой можно принять взвешенное решение по обоснованию безопасных расстояний до объектов сближения. Пример построения такой карты, иллюстрирующей соотношения безопасных расстояний, оцененных по разным подходам, приведен ниже (Рисунок 18).

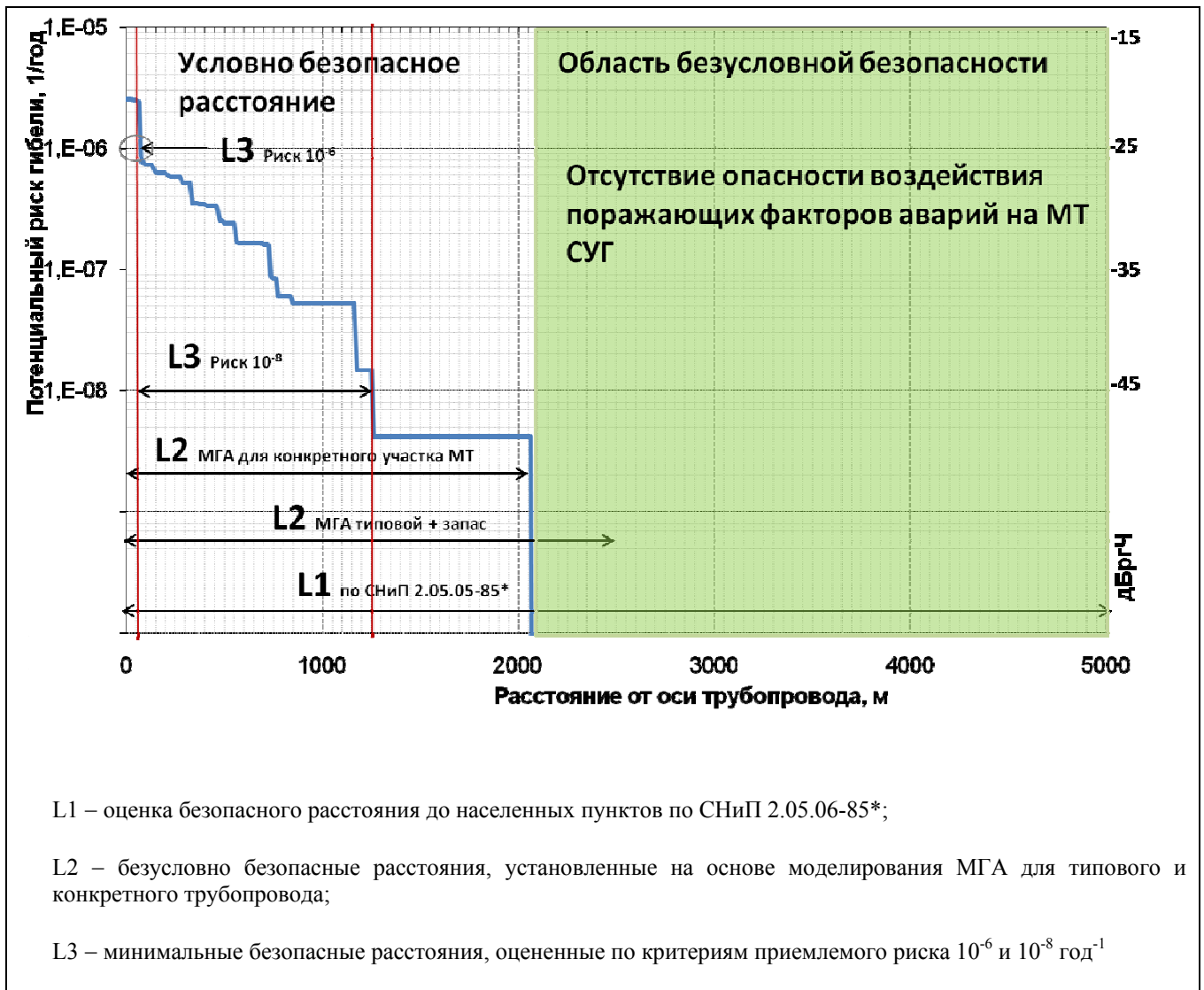


Рисунок 18 – Схематическое отображение результатов определения безопасных расстояний по разным подходам (на примере МТ ШФЛУ DN 700, P=3,8 МПа)

Из рисунка 18 видно, что при обосновании безопасности размещения МТ СУГ по различным критериям «безопасные» расстояния существенно меняются.

Расстояния по СНиП 2.05.06-85* гарантируют безопасность с большим запасом для любых (подземных) участков МТ СУГ.

При установлении безопасных расстояний большую роль играют неопределенности. Так, безусловно безопасные расстояния, установленные на основе моделирования МГА конкретного участка трубопровода точнее (и чаще всего меньше) безопасных расстояний, оцененных для типового МТ с поправкой на неопределенность (Таблица 25).

Важно понимать, что расстояния, оцененные с учетом вероятности (минимальные безопасные), не являются такими же безопасными, как оцененные по зонам действия поражающих факторов МГА.

При оценке минимальных безопасных расстояний, определяющим является выбор критерия приемлемости. Критерии приемлемости для различных групп рискующих могут отличаться. Таким образом, минимальные безопасные расстояния лежат в пределах от 0 м до области безусловной безопасности, установленные на основе моделирования МГА.

Трассы проектируемых МТ должны преимущественно планироваться таким образом, чтобы расстояние до населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, зданий и сооружений превышало расчетную зону действия смертельных поражающих факторов при максимальной гипотетической аварии. В случае невозможности установления зон безусловной безопасности вблизи объекта может проводиться оценка минимальных безопасных расстояний с обязательным обоснованием компенсирующих мероприятий.

Выводы к главе 3

1. Проведено обобщение результатов применения разработанного риск-ориентированного подхода определения безопасных расстояний от действующих, реконструируемых и проектируемых продуктопроводов ШФЛУ в Тюменской области (шесть продуктопроводов ШФЛУ общей протяженностью более 2 тыс. км).
2. По результатам проведенных исследовательских и проектных работ проранжированы по степени опасности основные факторы, влияющие на размеры зон поражения и безопасные расстояния от МТ СУГ. К наиболее значимым факторам относятся технологические параметры МТ (диаметр трубопровода, распределение давления), метеоусловия, а также выбор критериев приемлемого риска.
3. Среди факторов, влияющих на вероятность возникновения аварии и реализацию ее последствий (размеров зон поражения), исследовано влияние общей вероятности разгерметизации, условной вероятности образования крупных трещин, вероятности реализации плохих условий рассеяния (низкая скорость ветра, инверсия).
4. На основании обобщения результатов работ были получены типовые зависимости интенсивности выброса от давления в трубопроводе для различных размеров аварийных отверстий. Полученные зависимости могут использоваться для предварительной оценки безопасности людей и выделения критичных участков опасных сближений на начальном этапе проектирования МТ.
5. Применение разработанного риск-ориентированного подхода позволяет построить карту опасностей для каждого конкретного участка МТ СУГ, на основании которой можно принять взвешенное решение по обоснованию безопасных расстояний до объектов сближения.
6. По результатам моделирования возникновения и развития аварий на проектируемых и реконструируемых МТ ШФЛУ и на основе исследования влияния технических характеристик МТ и окружающих условий разработан типовой инженерный подход к оценке безопасных расстояний для обоснования промышленной безопасности при проектировании и реконструкции высокоопасных участков линейной части МТ ШФЛУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе обобщения и анализа данных по аварийности на отечественных и зарубежных магистральных трубопроводах обоснованы исходные вероятности разгерметизации, частоты образования дефектных отверстий характерных размеров, условные вероятности аварий с воспламенением, формализованы и категоризированы основные причины возникновения аварий на магистральных трубопроводах.

2. Разработаны научно-технические рекомендации по оценке ожидаемой частоты аварий на участках проектируемых магистральных трубопроводов, учитывающие необходимость внедрения современных организационных и технических мер обеспечения промышленной безопасности.

3. Определены основные особенности аварийных выбросов сжиженных углеводородных газов, учитываемые при оценке наиболее тяжелых последствий аварий (двухфазное истечение, дрейф и сгорание облака топливно-воздушных смесей).

4. Проранжированы по степени значимости факторы, влияющие на размеры зон поражения и безопасные расстояния от магистральных трубопроводов, транспортирующих широкую фракцию легких углеводородов при моделировании возникновения и развития аварии на них. К наиболее значимым факторам влияния относятся диаметр трубопровода, метеоусловия, а также выбор критериев приемлемого риска. Построены инженерные диаграммы для определения влияния наиболее значимых факторов на безопасные расстояния от магистральных трубопроводов для транспортирования широкой фракции легких углеводородов.

5. Классифицированы способы обеспечения безопасности людей от аварий на магистральных трубопроводах, включая защиту расстоянием и/или временем. Разработан алгоритм, позволяющий оценить безусловно безопасные расстояния от магистральных трубопроводов, а для участков, где соблюдение таких расстояний невозможно ввиду инфраструктурных и прочих ограничений, предложен риск-ориентированный подход к обоснованию минимальных безопасных расстояний, позволяющий учитывать внедрение новых организационно-технических решений по обеспечению безопасности на магистральных трубопроводах сжиженных углеводородных газов.

6. По результатам апробации разработанного риск-ориентированного подхода для определения безопасных расстояний для шести магистральных трубопроводов, транспортирующих широкую фракцию легких углеводородов разработаны проектные рекомендации для оценки безусловно безопасных расстояний размещения коридора прокладки

трассы за пределами зон действия поражающих факторов максимальной гипотетической аварии.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- исследование термодинамических свойств нестандартных составов сжиженных углеводородных газов и их влияния на безопасные расстояния;
- совершенствование моделей аварийного распространения сжиженных углеводородных газов с учетом рельефа местности;
- совершенствование модели истечения многофазной среды;
- сбор и накопление статистических данных о промышленных авариях с участием сжиженных углеводородных газов для построения и уточнения деревьев событий последствий аварий на магистральных трубопроводах сжиженных углеводородных газов.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

| | |
|-------------|---|
| КОР | - методология анализа опасности и количественной оценки риска |
| МБР | - минимально безопасные расстояния |
| МГ | - магистральный газопровод |
| МГА | - максимальная гипотетическая авария |
| МН | - магистральный нефтепровод |
| МНПП | - магистральный нефтепродуктопровод |
| МТ | - магистральный трубопровод |
| НКПВ | - нижний концентрационный предел воспламенения |
| ОПЛ | - объекты с присутствием людей |
| ОПО | - опасный производственный объект |
| СНГ | - сжиженный нефтяной газ |
| СПБ | - сжиженный пропан-бутан |
| СТУ | - специальные технические условия на проектирование |
| СУГ | - сжиженный углеводородные газы |
| ТВС | - топливно-воздушная смесь |
| ЧС | - чрезвычайная ситуация |
| ШФЛУ | - широкая фракция легких углеводородов |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях – М.: МГФ «Знание», 2006. – 3072 с.
2. Промышленная безопасность. Избранные научные труды / Колл. авт. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2007. – 324 с.
3. Актуальные вопросы предупреждения чрезвычайных ситуаций [Сосунов И. В., Авдоткина Ю. С., Лисица В. Н. и др.] под общ. редакцией В.А. Акимова/ МЧС России. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2010. – 350.
4. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы: оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
5. Мазур И.И., Иванцов О.М. Безопасность трубопроводных систем. – М.: ИЦ «ЕЛИЦА», 2004 – 1104 с.
6. Козлитин, А.М. Интегрированный риск техногенных систем. Теоретические основы, методы анализа и количественной оценки: монография / Анатолий Козлитин. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. – 260 с.
7. Козлитин А.М. Теория и методы анализа риска сложных технических систем: монография / А.М. Козлитин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 200 с.
8. Козлитин А.М. Чрезвычайные ситуации техногенного характера. Прогнозирование, анализ и оценка опасностей техносферы: учеб. пособие / А.М. Козлитин, П.А. Козлитин. – Саратов: Издательский Дом «Райт-Экспо», 2013. – 136 с.
9. Лисанов, М.В. Анализ риска в управлении промышленной безопасностью опасных производственных объектов нефтегазового комплекса: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / Лисанов Михаил Вячеславович. – М., 2002. – 247 с.
10. Маршалл В. Основы опасности химических производств / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
11. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: НУМИЦ Минприроды России, 1996. – 208 с.
12. Овчаров, С.В. Разработка методов анализа риска эксплуатации магистральных трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Овчаров Сергей Викторович. – М., 1998. – 344 с.
13. Сумской, С.И. Модели оценки последствий распространения опасных веществ в воздушной среде: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Сумской Сергей Иванович. – М., 2007. –

165 с.

14. Тимашев С.А. Безопасность магистральных трубопроводных систем / НИЦ НиР БСМ УрО РАН. – Екатеринбург: Препринт, 2000. – 57 с.
15. Пожарная безопасность промышленных объектов: Сб. науч. тр. / ВНИИПО под ред. Ю. Н. Шебеко. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 1991. – 159 с.
16. Моделирование пожаров и взрывов / Под ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 492 с.
17. Пожарные риски. Вып.4. Управление пожарными рисками / Под ред. Н. Н. Брушлинского, Ю.Н. Шебеко. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2006.
18. Kletz, T.A. What Went Wrong – Case Studies of Process Plant Disasters, 4th Edition, Gulf Professional Publishing/Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998, 408 p.
19. Lees' Loss Prevention in the Process Industries (3rd ed.), Elsevier/Butterworth-Heinemann, Burlington, MA/Oxford, UK, 2005, 3680p.
20. W. Kent Muhlbauer. Pipeline Risk Management Manual / Gulf Publishing Company, 1992, 256 p.
21. План развития газо- и нефтехимии России до 2030 г., утвержден 1 марта 2012 г. Приказом Минэнерго РФ №79.
22. Годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс] : архив 2004-2012 гг. – Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 16.09.2013).
23. Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс] : архив 2002-2012 гг. – Режим доступа: <http://safety.ru/IB/> (дата обращения: 16.09.2013).
24. Gas Pipeline Incidents. 8th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group [Электронный ресурс]. Doc. No EGIG 11.R.0402, December 2011. – Режим доступа: <http://www.egig.eu/reports> (дата обращения: 02.09.2013).
25. Pipeline Product Loss Incidents and Faults Report (1962 - 2011). Report of the UKOPA Fault Database Management Group [Электронный ресурс] – Ambergate UK, December 2012. – Режим доступа: <http://www.ukopa.co.uk/wp-content/uploads/2012/12/UKOPA-12-0046.pdf> (дата обращения: 02.09.2013).
26. Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2011 and since 1971 [Электронный ресурс]. Report No 3/13. – Brussels: CONCAWE, April 2013. – Режим доступа: <https://www.concawe.eu/content/> (дата обращения: 02.09.2013).
27. PHMSA Pipeline Incidents and Mileage Reports [Электронный ресурс] : база данных. – Режим доступа: <http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/PSI.html> (дата

обращения: 23.09.2013).

28. PHMSA Annual Report Mileage Summary Statistics [Электронный ресурс] : база данных. – Режим доступа: <http://www.phmsa.dot.gov/pipeline/library/data-stats> (дата обращения: 23.09.2013).

29. Using or Creating Incident Databases for Natural Gas Transmission Pipelines. Report of Study Group 3.4. A Guideline [Электронный ресурс] – Amsterdam: 23rd World Gas Conference June 1–5, 2006. – Режим доступа: <http://www.egig.eu/reports> (дата обращения: 02.09.2013).

30. Анализ российских и зарубежных данных по аварийности на объектах трубопроводного транспорта/ М.В. Лисанов, А.В. Савина, Д.В. Дегтярев, Е.А. Самусева // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 16–22.

31. Шумайлов А.С., Гуменов А.Г., Молдованов О.И. Диагностика магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1992. – 251 с.

32. Ким Б.И., Зоненко В.И. Вероятностно-статистические модели надежности систем трубопроводного транспорта // Труды МИНХ и ГП им. И.М. Губкина – 1989. – № 35. – С. 137–142.

33. РД-13.020.00-КТН-148-11. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах (утв. ОАО «АК «Транснефть» 17.10.2011).

34. Жулина С.А., Лисанов М.В., Савина А.В. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 1. – С.50–55.

35. Трубопроводы в США и Европе становятся более безопасными. Обзор иностранной прессы. Обзор иностранной прессы. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2005 – №1.– С.47–50.

36. Бесчастнов М.В. Оценка опасности перегретых жидкостей в трубопроводных системах большой протяженности // Безопасность труда в промышленности. – 1990. – № 12. – С. 19–24.

37. Савина А.В., Сумской С.И., Лисанов М.В. Анализ риска аварий на магистральных трубопроводах при обосновании минимальных безопасных расстояний // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 3. – С.58–63.

38. РД 08-204–98. Порядок уведомления и представления территориальным органам Госгортехнадзора информации об авариях, аварийных утечках и опасных условиях эксплуатации объектов магистрального трубопроводного транспорта газов и опасных жидкостей.

39. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о

безопасности зданий и сооружений» // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2010. – № 1. – Ст. 5.

40. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» // Собр. законодательства Рос. Федерации. – 2008. – № 30. – Ст. 3579.

41. F.H. Griffis, R. Dresnack, S. Evans, E. Golub, J. Greenfeld, L. Pignataro, L. Vega. Comparison of US with foreign pipeline land use and siting standards, New Jersey Institute of Technology, US Department of Transportation, Final Report № DTRS 56-94-C-0006, April 1996.

42. Pipeline Safety Regulations - 49CFR Parts 190, 191, 192, 193, 194, 195, 198 and 199, revised as of October 1, 2011, U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, Washington, D.C.

43. Z662-03 Oil and Gas Pipeline Systems, published in 2003 by the Canadian Standards Association (CSA), Rexdale (Toronto), Ontario, Canada.

44. Pipelines – Gas and Liquid Petroleum, published by Standards Australia (No. AS 2885.1-2007) in 2007, and prepared by Committee ME/38, Gas and Liquid Petroleum Piping Systems.

45. DVGW G 463:2001-12: Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Betriebsdruck größer als 16 bar – Errichtung (Gas pipelines made from steel pipes for an operating pressure greater than 16 bar – construction).

46. TRFL – Technische Regeln für Rohrfernleitungsanlagen (Technical Rules for Pipelines), 2011.

47. Steel Pipelines for High Pressure Gas Transmission. Recommendations on Transmission and Distribution Practice – IGE/TD/1 Edition 5: 2008 Communication 1735, published by the Institution of Gas Engineers;

48. Code of Practice for Pipelines - Part 1: Steel pipelines on Land. PD 8010-1:2004 published by the British Standards Institution.

49. Code of practice for pipelines – Part 3: Steel pipelines on land – Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables. PD 8010-3:2009 Supplement to PD 8010-1:2004 published by the British Standards Institution.

50. Tsusho Sangyo Roppo (the Japanese Pipeline Safety Standards), published by MITI (the Japanese Ministry of Industry and Trade).

51. J. Greenfeld, E. Golub, R. Dresnack, F.H. Griffis, L. Pignataro. Pipeline accident consequences for natural gas and hazardous liquids pipelines. New Jersey Institute of Technology, US Department of Transportation, Final Report № DTRS 56-94-C-0006, August 1996.

52. R. Dresnack, E. Golub, J. Greenfeld, F. Griffis, L. Pignataro. Effectiveness of US and

International Pipeline Regulations with Regard to Land Use Planning. Proceeding of the First International Pipeline Conference – ASME-IPC, June 1996, Vol. I, pp. 25–30.

53. J. Haklar, R. Dresnack, New Jersey Institute of Technology. Safe separation distances from natural gas transmission pipelines. Journal of pipeline safety, volume 1, number 1, 1999, p. 3–19.

54. S. Sklavounos, F. Rigas. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipeline. Journal of Loss Prevention in the process industries, № 19 (2006), p.24–31.

55. J. Haswell, G. Goodfellow. A comparison of inherent risk levels in ASME b31.8 and UK gas pipeline design codes. Proceedings of IPC2006 6-th International Pipeline Conference September 25-29, 2006, Calgary, Alberta, Canada.

56. J. Haswell, G. Goodfellow, N. Jackson, R. McConnell. New UK pipeline risk assessment codes – IChemE TD/2 and PD 8010 part 3, Symposium series No.155, IChemE, 2009, p.308–317.

57. Оценка риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС /Ю.А. Дадонов, М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 6. – С.2–6.

58. Оценка риска аварий на магистральном аммиакопроводе «Тольятти-Одесса» / Ю.А. Дадонов, Д.В. Дегтярев, И.А. Кручинина и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2003. – № 10. – С.27–30.

59. Анализ риска аварий на нефтепроводных системах БТС и МН «Дружба» / М.В. Лисанов, А.И. Гражданкин, А.В. Пчельников, А.В. Савина, С.И. Сумской //Безопасность труда в промышленности. – 2006. – №1. – С.34–40.

60. Анализ риска аварий на магистральном трубопроводе, транспортирующем широкую фракцию легких углеводородов /С.И. Сумской, А.В. Пчельников, Е.Л. Шанина, М.В. Лисанов, В.В. Зозуля // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – № 2. – С. 48–52.

61. Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности / М.В. Лисанов, С.И. Сумской, А.В. Савина, Е.Л. Шанина и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 3. – С.58–66

62. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов/ Под ред. В.Е. Селезнева. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2009.

63. Миркин А.З., Усиньш В.В. Трубопроводные системы. – М.: Химия, 1991. – 256 с.

64. Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий / С.И. Сумской, К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 10. – С. 42–50.

65. Сравнение результатов расчетов последствий аварийных выбросов опасных веществ по программным комплексам ТОКСИ+ и PHAST / М.В. Лисанов, К.В. Ефремов, С.И. Сумской, В.А. Пантелеев // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 2. – С. 56–60.
66. СТО Газпром 2-2.3-351–2009 «Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». – М.: ОАО «Газпром», 2009.
67. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 года № 404, зарег. в Минюсте РФ 17 августа 2009 года, рег. № 14541 (в ред. Приказа МЧС РФ от 14.12.2010 № 649).
68. Математическая модель испарения сжиженных углеводородных газов со свободной поверхности / Шебеко Ю.Н., Шевчук А.П., Смолин И.М., Колосков В.А. // Химическая промышленность. 1992. – №7. – С. 404–408.
69. Воротилин В.П., Горбулин В.Д. Математическая модель процесса испарения сжиженного газа при его аварийном разливе на открытых пространствах // Химическая промышленность. 1992. – №6. – С. 42–47.
70. Сравнительный анализ уровня безопасности продуктопровода ШФЛУ диаметром 420 мм и конденсатопровода "Уренгой-Сургут" диаметром 720 мм на основании численного моделирования аварий на этих трубопроводах и сопоставления зон аварийного воздействия. - Отчет о научно-исследовательской работе. – М.: ООО "ВНИИГАЗ". – 2004. – 144 с.
71. Сафонов В.С., Едигаров А.С. Анализ особенностей и расчет интенсивности испарения сжиженного природного газа при его аварийных разливах по поверхности грунта. / Сборник научных трудов «Вопросы транспорта и газа». – М.: ВНИИГАЗ, 1985. – С. 135–149.
72. Разработать комплекс физико-математических моделей и программ и провести полигонные исследования процессов горения и взрыва, а также средств взрывопожарозащиты при возникновении аварий на объектах подготовки, транспорта и переработки газа и конденсата. Отчет ВНИИПО N 978 н/с. – М., 1991.
73. РД-03-26–2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ. — Сер. 27. — Вып. 6/ Колл. авт. — М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2008. — 124 с.
74. РД 03-409–01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей // Методики оценки последствий на опасных производственных объектах: Сб. док. — Сер. 27. — Вып. 2. — М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2005. — С. 4–34.
75. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций: учебник в 3-х частях: часть 2. Инженерное обеспечение мероприятий и действий сил

ликвидации чрезвычайных ситуаций: в 3 - х книгах: книга 2. Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях. / Под общ. ред. С.К. Шойгу/ Г.П. Саков, М.П. Цивилев, И.С. Поляков и др. – М.: ЗАО «ПАПИРУС», 1998. – 166 с.

76. РД 03-418–01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – Сер. 3. – Вып. 10. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 2001.

77. РД-01.120.00-КТН-296-06. Вероятностный анализ безопасности магистральных нефтепроводов. Общие положения.

78. РД-01.120.00-КТН-297-06. Методические рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности объекта МН.

79. РД-01.120.00-КТН-283-06. Требования к составу, содержанию и форме представления исходных данных для проведения вероятностного анализа безопасности объектов магистральных нефтепроводов.

80. Методика экспертной оценки ожидаемой частоты аварий на участке газопровода (МЭОЧАГаз) в составе Рекомендаций по учету влияния технико-технологических, природно-климатических и других факторов при прогнозировании аварийности на МГ ОАО «Газпром» (утв. ОАО «Газпром» 27.03.2007).

81. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах (серия 27. Выпуск 1/ Колл. авт. – 3-е изд., испр. – М.: Научно-технический центр «Промышленная безопасность», 2009, согласовано Госгортехнадзором России 07.07.99 № 10-03/418, утвержден приказом АК «Транснефть» от 30.12.99 № 152, переутвержден 17.12.2009 №04-12/21592).

82. Овчаров С.В. О некоторых методах оценки частоты аварий на магистральных трубопроводах при расчете пожарного риска // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – №2. – С. 61–69.

83. СТО РД Газпром 39-1.10-084–2003 «Методические указания по проведению анализа риска при проектировании и эксплуатации опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром».

84. Специальные технические условия для разработки проектной документации на объект капитального строительства «Продуктопровод Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция», ЗАО НТЦ ПБ, 2012, утв. Ген. директором ООО «Запсибтрансгаз» Т.Ш. Султановым, согл. Зам. Министра регионального развития РФ В.А. Токаревым (письмо о согласовании № 11818-ВТ/17 от 17.05.2012).

85. Специальные технические условия для разработки проектной документации на объект капитального строительства «Продуктопровод Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская

головная насосная станция» с изменением № 1, ЗАО НТЦ ПБ, 2013, утв. Ген. директором ООО «Запсибтрансгаз» Т.Ш. Султановым, согл. Зам. Министра регионального развития РФ Б.М. Мурашовым (письмо о согласовании № 8158-БМ/03/ГС от 06.08.2013).

86. Специальные технические условия для разработки проектной документации на объект «Продуктопровод «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим», ЗАО НТЦ ПБ, 2011, утв. Ген. директором ОАО «СибурТюменьГаз» А.Н. Тепляковым, согл. Зам. Министра Регионального развития РФ В.А. Токаревым (письмо о согласовании № 36223-ВТ/11 от 29.12.2011).

87. Специальные технические условия для разработки проектной документации на объект «Продуктопровод «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим» с изменениями №1, ЗАО НТЦ ПБ, 2011, утв. Ген. директором ОАО «СибурТюменьГаз» А.Н. Тепляковым, согл. Зам. Министра регионального развития РФ В.А. Токаревым (письмо о согласовании № 21491-ВТ/11 от 10.09.2011).

88. Специальные технические условия для разработки проектной документации на объект «Продуктопровод «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим» с изменениями №2, ЗАО НТЦ ПБ, 2012, утв. Ген. директором ОАО «СибурТюменьГаз» А.Н. Тепляковым, согл. Зам. Министра регионального развития РФ В.А. Токаревым (письмо о согласовании № 12815-ВТ/17 от 29.05.2012).

89. Специальные технические условия для разработки проектной документации на объект «Продуктопровод «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим» с изменениями №3, ЗАО НТЦ ПБ, 2013, утв. Ген. директором ОАО «СибурТюменьГаз» А.Н. Тепляковым, согл. Зам. Министра регионального развития РФ Б.М. Мурашовым (письмо о согласовании № 8155-БМ/03/ГС от 06.08.2013).

90. М.В. Лисанов. Ошибки нормирования количественных критериев допустимого риска // Методы оценки соответствия. – 2009. – №9. – С. 41–43.

91. Comparative Quantitative Risk Analysis of Motor Gasoline, LPG, and Anhydrous Ammonia as an Automotive Fuel // Quest Consultants Inc., Iowa State University.

92. Гражданкин А.И., Кара-Мурза С.Г. Белая книга России: Строительство, перестройка и реформы: 1950–2012 гг./ Будущая Россия. №24. – М.: Либорком, 2013. – 560 с.

93. Декларация промышленной безопасности продуктопровода ШФЛУ «Белозерный ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ» ОАО «Сибур–Тюмень». М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2005.

94. Декларация промышленной безопасности ОАО «СибурТюменьГаз». Незавершенный строительством магистральный продуктопровод «Губкинский ГПЗ – Нижнеартовский ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ – Тобольский НХК» протяженностью 976,4 км.

Пусковые комплексы 1, 2 (Участок 543 – 867 км). М.: ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2006.

95. Корректировка раздела «Анализ риска» для декларации промышленной безопасности в составе проекта «Незавершенный строительством магистральный продуктопровод «Губкинский ГПЗ – Нижневартовский ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ – Тобольский НХК», протяженностью 976,4 км (участок 543 – 867 км)»: отчет о выполнении работы. – М.: ООО «НТЦ «Промышленная безопасность», 2009. – 74 с.

96. Анализ риска для Декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов Площадка станции насосной магистрального продуктопровода «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим», участок магистрального продуктопровода «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим»: отчет о выполнении работы. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012.

97. Анализ риска в составе декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта Продуктопровод «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция»: отчет о выполнении работы в двух книгах: «Пуровский ЗПК – Ноябрьская головная насосная станция», «Ноябрьская головная насосная станция – Южно-Балыкская головная насосная станция». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012.

98. Анализ риска в составе декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов «Площадка станции насосной магистрального продуктопровода «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим», «Участок магистрального продуктопровода «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим»: отчет о выполнении работы. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 175 с.

99. Анализ риска в составе декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта Продуктопровод «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская ГНС»: отчет о выполнении работы в двух книгах: Этап «Пуровский ЗПК – Ноябрьская ГНС», Этап «Ноябрьская ГНС – Южно-Балыкская ГНС». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013.

100. Количественный анализ риска для условий реконструкции действующего продуктопровода «Южно-Балыкский ГПЗ – Тобольский НХК» объекта «Незавершенный строительством магистральный продуктопровод «Губкинский ГПЗ – Нижневартовский ГПЗ – Южно-Балыкский ГПЗ – Тобольский НХК», протяженностью 976,4 км»: отчет о НИР. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 32 с.

101. Количественный анализ риска для проектируемого продуктопровода «Губкинский ГПК – Наливная ж.д. эстакада ШФЛУ в районе г. Ноябрьск»: отчет о НИР. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 37 с.

102. О результатах предварительных расчетов показателей риска для обоснования

вариантов размещения УЗА по трассе продуктопровода ШФЛУ «Южно-Балыкская ГНС – Тобольский НХК», протяженностью 417 км: отчет в рамках разработки специальных технических условий на проектирование, строительство и эксплуатация продуктопровода ШФЛУ «Головная насосная станция Южно-Балыкской ЛПДС – Тобольскнефтехим». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 12 с.

103. Обоснование технических параметров при проектировании продуктопровода ЮБ ГНС – ТНХ по показателям риска промышленных аварий»: отчет в рамках разработки специальных технических условий на проектирование, строительство и эксплуатация продуктопровода ШФЛУ «Головная насосная станция Южно-Балыкской ЛПДС – Тобольскнефтехим». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 13 с.

104. Анализ влияния технологических характеристик продуктопровода ЮБ ГНС – ТНХ на показатели риска аварий»: отчет в рамках разработки специальных технических условий на строительство нового продуктопровода «Южно-Балыкская головная насосная станция – Тобольск-Нефтехим». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2011. – 51 с.

105. Результаты анализа риска для критичных участков трассы продуктопровода «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция»: промежуточный отчет для двух вариантов прокладки трассы в рамках специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства «Продуктопровод Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2011. – 56 с.

106. Результаты анализа риска для критичных участков трассы продуктопровода «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция»: заключительный отчет в рамках Специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства «Продуктопровод Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 60 с.

107. Анализ риска для критичных участков трассы «Продуктопровод ШФЛУ Сургут – Южный Балык (участки 13-18 км и 40-76 км): отчет в рамках специальных технических условий на проектирование и строительство объекта «Продуктопровод ШФЛУ Сургут – Южный Балык. Участки 13-18 км и 40-76 км». – М.: АНО АИПР, 2012. – 66 с.

108. Результаты количественного анализа риска аварий для проектируемого продуктопровода «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция» в целях обоснования минимальных расстояний до соседних объектов»: отчет в рамках корректировки специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства «Продуктопровод «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция». – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 71 с.

109. Оценка риска повреждения магистрального нефтепровода «Заполярье – Пурпе» при авариях на продуктопроводе ШФЛУ Ду 500 «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция»: отчет о выполнении работы. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 24 с.

110. Обоснование безопасности пересечения проектируемым продуктопроводом «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция» поверхностей взлета и заходов на посадку к аэродрому г.Когалым»: отчет в рамках корректировки специальных технических условий для разработки проектной документации на объект капитального строительства: «Продуктопровод «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская головная насосная станция».– М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 16 с.

111. Pasquill F. Atmospheric Diffusion. – New York: J. Wiley, 1974. – 429 p.