

На правах рукописи



Иванова Татьяна Юрьевна

**УПРАВЛЕНИЕ СРЕДСТВАМИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ
НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

Специальность 05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных
ситуациях (энергетика)

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

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Управление и защита в чрезвычайных ситуациях»

Научный руководитель

– доктор техн. наук, профессор

Яковлев Вячеслав Владимирович

Официальные оппоненты:

– доктор техн. наук, ст. науч. сотр.

Виноградов Виктор Владимирович

– кандидат техн. наук

Ярошевич Михаил Викторович

Ведущая организация – ФГУП «Российский государственный научно-исследовательский и проектный институт Урбанистики», Санкт-Петербург.

Защита состоится 21 июня 2011 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

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

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

Автореферат разослан «20» мая 2011 г.

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

Факс: (812)-552-6552

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Нефть составляет основу топливно-энергетических балансов всех экономически развитых стран мира. Россия на сегодняшний день занимает одно из лидирующих мест по добыче нефти, но, несмотря на это, современное состояние безопасности на объектах нефтедобычи далеко от совершенства.

Повышение безопасности на нефтяных месторождениях может рассматриваться в разных аспектах: повышение устойчивости внутрипромысловых, напорных и магистральных трубопроводов; повышение прочности резервуаров хранения нефти и т.д. Одним из способов повышения безопасности для объектов нефтедобычи также является рациональное распределение сил и средств, предназначенных для локализации и ликвидации аварийных ситуаций с нефтепродуктами.

Современная нормативно-правовая база в области предупреждения и ликвидации аварийных ситуаций с нефтепродуктами, не предусматривает рекомендаций по конкретным методикам расчета распределения сил и средств. Ликвидация нефтяного разлива на внутрипромысловых нефтепроводах осложнена тем, что для доставки специализированной техники не создана соответствующая инфраструктура, в связи с чем необходимы дополнительные затраты со стороны владельца нефтепромысла и увеличение ущерба от последствий аварии.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью совершенствования системы безопасности на объектах нефтяных месторождений за счет рационального управления средствами ликвидации последствий аварий на основе методик их оптимального распределения.

Целью работы является выбор такой системы управления средствами повышения безопасности на нефтяных месторождениях, которая обеспечит максимальную эффективность их использования при минимальных затратах или минимальном времени доставки сил и средств к месту аварии.

Задачи диссертационного исследования. Основными задачами исследования являются:

- общая постановка задачи управления средствами повышения безопасности в чрезвычайных ситуациях на объектах нефтедобычи;
- выбор глобального критерия и обоснование рационального распределения общей задачи между частными задачами повышения безопасности в конкретных условиях;

- сравнительный анализ действующих методик расчета объемов, площади разлива нефтепродуктов и давления насыщенных паров;
- оптимизация количества резервуаров хранения нефтепродуктов на территории месторождения;
- минимизация времени доставки сил и средств для локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов;
- оптимизация распределения сил и средств для локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

Методы исследования:

- анализ и обобщение исходных данных на основе методов математической статистики;
- вероятностные методы оценки ожидаемого ущерба;
- методы математического программирования в целях решения задач оптимального распределения сил и средств, минимизации времени доставки оборудования к месту аварии.

Научная новизна:

- произведен сравнительный анализ существующих методик расчета площади разлива нефтепродуктов и расчета давления насыщенных паров на основе оценки доверительных интервалов возможных значений их основных параметров;
- поставлена и решена задача оптимизации количества резервуаров, исходя из требуемого объема хранения нефтепродуктов на территории месторождения и прогнозируемых климатических условий;
- предложена методика расчета объема разлива нефти (нефтепродуктов) при различной разгерметизации трубопровода;
- обоснован метод выбора оптимального варианта маршрута, обеспечивающего минимальное время доставки сил и средств к месту аварийного разлива нефти;
- поставлена и решена задача рационального распределения сил и средств, участвующих в ликвидации последствий аварии в вариантах сбалансированного и разбалансированного запаса оборудования.

Основные положения, выносимые на защиту:

- задача оптимального распределения сил и средств для локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов по объектам нефтепромысла по критерию минимальной стоимости;
- методика определения минимального времени доставки сил и средств для ликвидации аварии в условиях трудно проходимой местности;

- методика определения оптимального количества резервуаров хранения нефтепродуктов на нефтяных месторождениях при различных климатических условиях.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследований; в обосновании методов решения сформулированных задач, в разработке методик и алгоритмов, доведенных до рабочих программ на персональном компьютере; в обработке, формулировке, обобщении полученных результатов и выработке рекомендаций по условиям применения методик.

Практическая значимость. Результаты работы применяются при разработке Планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в ряде проектных организаций (ООО «ТЭК», ООО «НТК «Экопромбезопасность»), а также могут быть использованы при проектировании инфраструктуры для нефтяных месторождений. Результаты исследований внедрены при разработке Планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на объектах месторождений ОАО «Печоранефть» и ООО «Новатэк-Таркосаленефтегаз».

Достоверность и обоснованность положений и выводов подтверждена многочисленными расчетами с применением современных методов программирования, результаты которых не противоречат данным литературных источников.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались на II Всероссийской научно-практической конференции «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2010), на Научно-практической конференции «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» (Санкт-Петербург, 2010), на XIV Всероссийской конференции «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2010), на международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ», на научно-практической конференции «Проблемы управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях» (Санкт-Петербург, 2010) и др.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ, три из них в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа включает 128 страниц текста, 14 рисунков, 26 таблиц и список литературы из 95 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы и научная новизна, определены цели и задачи исследования, а также конкретизирована практическая значимость результатов работы.

В **первой главе** проанализировано значение нефти и нефтепродуктов в экономике и энергетике России и мира. Выделен ряд экологических проблем, связанных с добычей нефти: загрязнение водоемов, выбросы вредных веществ в атмосферу, образование твердых отходов, низкие темпы утилизации отходов и т.д.

На основе анализа статистических данных по аварийным ситуациям, связанным с разливами нефти на этапах добычи, транспортировки, хранения и переработки были построены и исследованы «деревья событий». На рис. 1 приведено «дерево событий» для чрезвычайных ситуаций, обусловленных разливом нефти (нефтепродуктов) (далее – ЧС(Н)), связанной с разрывом нефтепровода.

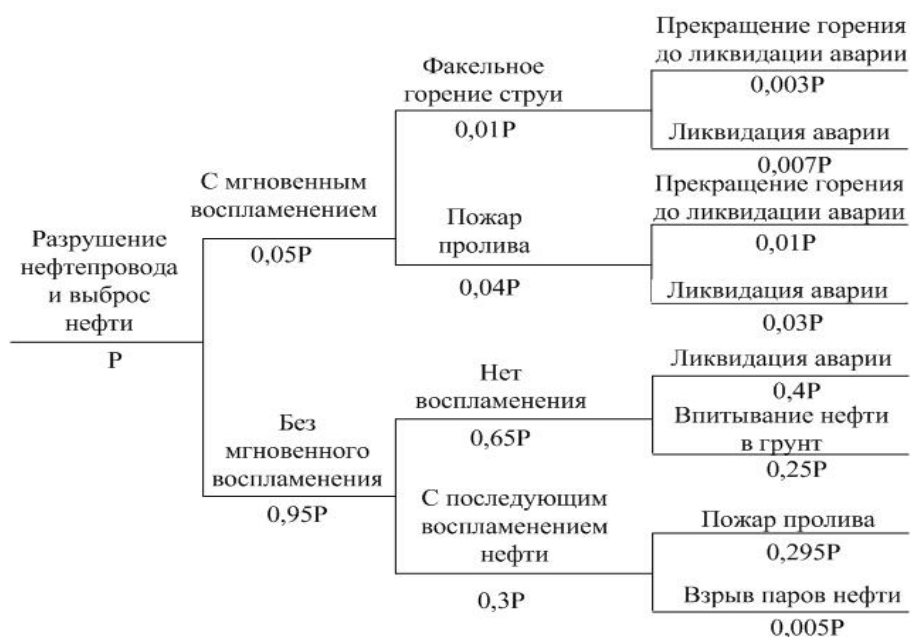


Рис. 1. «Дерево событий» для ЧС(Н), связанной с разрывом нефтепровода

В результате анализа «деревьев событий», а также из опыта разработки планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, сделан вывод о необходимости рассмотрения задач, связанных с определением объема разлива нефти, площади разлива нефти, массы испарившихся нефтепродуктов, оптимального количества резервуаров хранения нефтепродуктов на территории месторождения, оптимизации распределения сил и средств для ликвидации аварии и времени их доставки.

Во **второй главе** проведен анализ нормативно-правовой документации, а также современных исследований в области безопасности в чрезвычайных ситуациях. В изученных материалах в качестве меры безопасности, как правило, принимается риск.

В мультипликативном подходе риск определяется как произведение вероятности возникновения чрезвычайной ситуации на математическое ожидание ущерба.

В качестве основного критерия безопасности выбрана количественная мера риска, которая может быть представлена в виде функции:

$$F(...C, t, K...) = W(...C, t, K...) \cdot M(...C, t, K...) \quad (1)$$

где C – стоимость ликвидации аварии (состав сил и средств, способ доставки их к месту аварии); t – время доставки сил и средств к месту аварии; K – климатические условия в районе аварии; $W(\cdot)$ – вероятность возникновения аварии; $M(\cdot)$ – ожидаемый ущерб в случае возникновения аварии.

Основную значимость в функции (1) играют аргументы C и t – управляемые переменные. Остальные аргументы, входящие в функцию (1) принимаются параметрами.

Повышение безопасности будет адекватно стремлению минимизации функции:

$$F(...u, K...) \rightarrow \min_{u \in U} F(...u, K...) \quad (2)$$

где u – функция управления:

$$u = u(C, t) \quad (3)$$

Как показывает опыт, решение задачи (2) можно свести к поиску оптимума по одному из аргументов: C или t .

В целом, задача исследований состоит в поиске такого управления, которое доставит функции (1) минимальное значение при фиксированном времени:

$$\left. \begin{array}{l} \min F(...C...) \\ | \\ t = \text{const} \end{array} \right\} \begin{array}{l} F(...C^*, t, K...) = \min_C F(...C, t, K...) \\ C^* \in \{C | C_{\min} < C < C_{\max}\} \end{array} \quad (4)$$

или при фиксированной стоимости ликвидации аварии:

$$\left. \begin{array}{l} \min F(...t...) \\ | \\ C = \text{const} \end{array} \right\} \begin{array}{l} F(...C, t^*, K...) = \min_t F(...C, t, K...) \\ t^* \in \{t | 0 < t < t_2\} \end{array} \quad (5)$$

где t_2 – момент времени, после достижения которого нанесенный ущерб будет максимальным независимо от принятого решения.

В третьей главе осуществлен расчет остаточного ресурса трубопровода по минимальной вероятной толщине стенки, проведен анализ существующих методик расчета объема, площади разлива нефти и методик расчета давления насыщенных паров.

Все известные методики *определения объема вытекшей нефти* из аварийного нефтепровода разделяют процесс истечения на три этапа: истечение нефти при полном действующем давлении от момента разгерметизации трубопровода до момента отключения перекачивающих станций; истечение нефти от момента отключения насосов перекачивающих станций до момента закрытия задвижек; свободное истечение нефти от момента закрытия задвижек до полного истечения нефти из аварийного участка трубопровода. При порыве (гильотинном разрыве) нефтепродуктопроводов потенциально возможный объем истечения V_{\max} определяется как сумма 25 % максимального объема V_1 прокачки в течение 6 ч и объема V_2 нефтепродукта между задвижками, ограничивающими аварийный участок трубопровода. При проколе нефтепродуктопровода объем истечения определяется как 2 % максимального объема прокачки V_3 в течение 14 дней. В практике эксплуатации трубопроводов подобные случаи наблюдались чрезвычайно редко.

Для прогноза более реальной ситуации при возможных авариях на трубопроводе в работе предложено использование среднего значения ожидаемой (наиболее вероятной) массы утечек нефтепродукта, т.е. вероятного максимума аварийных разливов, учитывающего вероятностный характер их возникновения и развития. Расчет вероятного максимума $V_{\text{ВЕР}}$ аварийного выхода перекачиваемого по трубопроводу продукта производится при априори рассчитанных значениях вероятности W_1 возникновения аварии с гильотинным разрывом трубопровода и вероятности W_2 прокола. Тогда:

$$V_{\text{ВЕР}} = W_1 \cdot (V_1 + V_2) + W_2 \cdot V_3 \quad (6)$$

Если имеется возможность проанализировать трассу (профиль) трубопровода между задвижками и определить наиболее опасные (наиболее вероятные по аварийности) участки, то производится дробление трассы, для каждого интервала рассчитывается вероятность возникновения аварии на каждом участке и производится расчет максимального вероятного выхода нефтепродукта на каждом участке с использованием принципа недостаточности информации Лапласа. Расчет вероятности выхода объема нефтепродукта предложено рассчитывать в предположении о нормальном законе распределения координаты аварии по рельефу местности.

Одним из основных аспектов, влияющих на *распределение сил и средств* для локализации и ликвидации аварийных разливов является площадь. В настоящее время существует ряд методик для расчета данного параметра. Разработан метод выбора рациональной методики расчета площади разлива. Постановка задачи выбора рациональных методик расчета площади разлива разделена на 3 этапа:

1. Определение объема разлива нефти (нефтепродукта).
2. Оценка доверительного интервала математического ожидания радиуса разлива.
3. Выбор рациональной методики расчета площади разлива.

Определение объема разлива производится по приведенной выше методике (6).

Доверительный интервал для математического ожидания m радиуса пятна определяется соотношением:

$$W \left(\bar{x} - \frac{s \cdot t_{\frac{1+\gamma}{2}}(n-1)}{\sqrt{n-1}} < m < \bar{x} + \frac{s \cdot t_{\frac{1+\gamma}{2}}(n-1)}{\sqrt{n-1}} \right) = \gamma \quad (7)$$

где γ – вероятность попадания значения математического ожидания генеральной совокупности в обозначенный интервал; $t_{\frac{1+\gamma}{2}}(n-1)$ – квантиль распределе-

ния Стьюдента порядка $\frac{1+\gamma}{2}$ с числом степеней свободы $(n-1)$; n – объем выборки; s – среднее квадратическое отклонение случайной величины по выборке; \bar{x} – среднее значение случайной величины по выборке; m – математическое ожидание случайной величины генеральной совокупности.

Для подтверждения разработанного метода в работе был проведен анализ семи известных методик оценки радиуса разлива нефти (нефтепродукта):

1. Временное методическое руководство по оценке экологического риска деятельности нефтебаз и автозаправочных станций:

$$R = \sqrt{\frac{\pi \cdot 25,5 \cdot V}{4 \cdot \pi}} \quad (8)$$

где R – радиус разлива, м; V – объем пролива, м³.

2. Методика Донецкой пожарно-технической лаборатории:

$$R = 3.018 \cdot V^{0.393} \cdot \nu^{-0.116} \cdot t^{0.115} \cdot K_{\Pi} \quad (9)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, Ст; t – время растекания нефтяного пятна, с; K_{Π} – коэффициент поверхности растекания.

3. Методика профессора Алексева:

$$R = V^{\frac{1}{3}} \cdot 0.58 \cdot \left(\frac{g \cdot V}{\nu^2} \right)^{0.08} \cdot \left(\frac{g \cdot t^2}{V^{\frac{1}{3}}} \right)^{0.06} \cdot K_{II} \quad (10)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

4. Нормы пожарной безопасности НПБ 105-03:

$$R = \sqrt{\frac{0.15 \cdot V \cdot 10^3}{\pi}} \quad (11)$$

5. Методикой оценки степени риска эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов СО 11-04-АКТНП-006-2006:

$$R = \frac{\sqrt{53.3 \cdot V}}{\pi} \quad (12)$$

6. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах:

$$R = \sqrt{\frac{20 \cdot V}{\pi}} \quad (13)$$

где коэффициент 20 – для разлива на почве.

7. Формула Мэнсфила и Линели (1991 г.):

$$R = \frac{3,5 \sqrt{\frac{V}{3,8 \cdot 10^{-3}}}}{2} \cdot 0,3 \quad (14)$$

Графики зависимости радиуса пятна от объема разлива, выполненные по приведенным выше методикам, представлены на рис. 2.

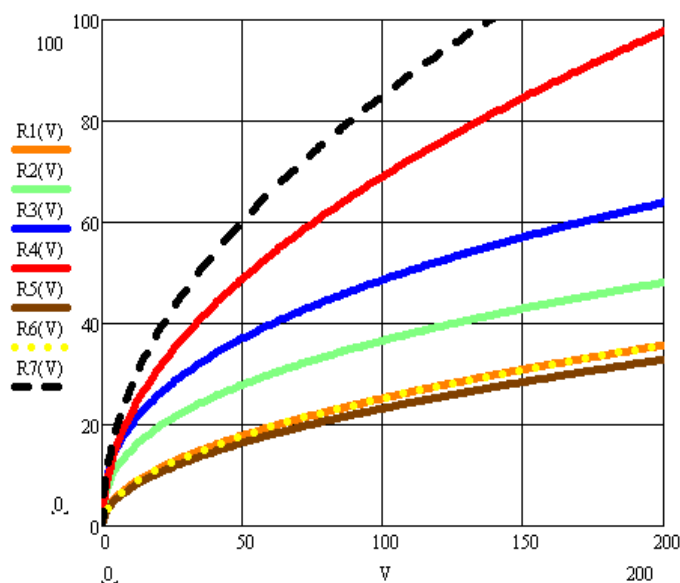


Рис. 2. Графики зависимости радиуса пятна от объема разлива

В силу того, что все методики являются аппроксимацией реального процесса их обобщение по среднестатистическим показателям допустимо. Результаты расчета по каждой конкретной методике приняты за случайную величину в выборке объемом n .

Статистический анализ выполнен по двум показателям: зависимость $R(V)$ и зависимость ширины доверительного интервала от γ .

Вывод о приемлемости методик можно сделать на основе проверки попадания математического ожидания в доверительный интервал. На основе сравнения левой и правой границы интервала оказалось, что для малых значений V при $\gamma=0,8$ в доверительный интервал попадают результаты расчетов, выполненные по методике Донецкой лаборатории. При значениях объема более 500 м^3 число результатов расчетов, попадающих в доверительный интервал, возрастает. При увеличении γ , количество значений, попадающих в доверительный интервал, увеличивается.

Оценка безопасности включает в себя кроме площади *массу испарившихся нефтепродуктов*, которая определяет способность вызвать воспламенение и взрыв. Массу испарившихся нефтепродуктов с поверхности разлива или из открытой емкости рекомендуется рассчитывать согласно НПБ 105-03:

$$G = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_n \cdot F_n \cdot t_n \quad (15)$$

где F_n – площадь испарения, м^2 ; t_n – время испарения, с; η – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения; P_n – давление насыщенного пара, кПа.

Давление насыщенных паров нефтепродуктов является основным аргументом, влияющим на массу испарившихся нефтепродуктов. Справочные данные по значению P_n не всегда содержат значения для всех нефтепродуктов, поэтому данную величину приходится вычислять различным методикам. Сравнение методик произведено по аналогии, с использованием методов математической статистики. Решение задачи выбора методики расчета P_n сводится к следующему алгоритму:

1. Задается достоверность γ для доверительного интервала математического ожидания m давления насыщенного пара нефтепродукта.
2. Рассчитываются границы доверительного интервала $\Delta(\gamma)$.
3. При значениях $m \in \Delta(\gamma)$ методика принимается, $m \notin \Delta(\gamma)$ – методика отвергается.

Для проверки разработанной методики в работе было проведено сравнение 3-х известных методик расчета P_H :

1. Уравнение Антуана:

$$P_H = 10^{\left[\frac{A \cdot B}{T_0 + C_A} \right]} \quad (16)$$

где A, B, C – константы уравнения Антуана; T_0 – температура окружающей среды, °С.

2. Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепродуктообеспечения, расположенных на селитебной территории:

$$P_H = \frac{\exp[6,908 + 0,0433 \cdot (t_H - 0,924 \cdot t_{всп} + 2,055)]}{1047 + 7,48 \cdot t_{всп}} \quad (17)$$

где t_H – температура нефтепродукта, °С; $t_{всп}$ – температура вспышки нефтепродукта в закрытом тигле, °С.

3. Рекомендации ПБ 09-540-03:

$$P_H = P_0 \cdot \exp \left[\frac{r}{b} \cdot \left(\frac{1}{T_K} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (18)$$

где P_0 – атмосферное давление при н.у., кПа; r – удельная теплота парообразования, МДж/кг; R – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса вещества, кг·кмоль⁻¹; $b = R/M$ – газовая постоянная данной горючей смеси, Дж/(К·моль); T_K – температура кипения, К; T – температура окружающей среды, К.

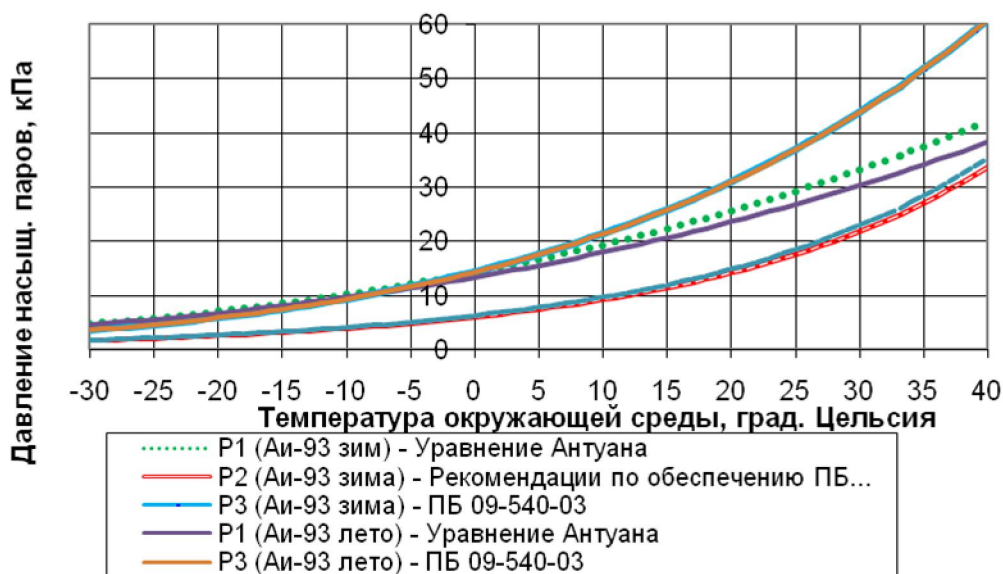


Рис. 3. Графики зависимости давления насыщенных паров от температуры окружающей среды

Изменение значения давления насыщенных паров было рассмотрено в диапазоне температур окружающей среды от -30 до $+40$ °С для бензина Аи-93 и дизельного топлива. Графики зависимости давления насыщенных паров от температуры окружающей среды для бензина представлены на рис. 3.

На основе сравнения левой и правой границы доверительного интервала оказалось, что при $\gamma = 0,8$ в доверительный интервал не попадают результаты расчетов по методике (17). При увеличении γ , в доверительный интервал попадают результаты расчетов по всем рассмотренным методикам. Таким образом, можно сделать вывод, что рассмотренные методики равнозначны. К сожалению, постановка эксперимента невозможна, ввиду отсутствия полигона, на котором можно было проверить методики не только по статистическим показателям, но и по физическим.

Таким образом, остаточный объем разлившего нефтепродукта зависит не только от перечисленных условий, но и от времени до момента локализации пятна:

$$V(t) = V - \frac{G(t)}{\rho} \quad (19)$$

где $V(t)$ – остаточный объем нефтепродукта на момент локализации, м^3 ; V – начальный объем разлива, м^3 ; ρ – плотность нефтепродукта, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В четвертой главе поставлена и решена задача определения оптимального количества резервуаров хранения нефтепродуктов на территории месторождения, решена задача оптимального распределения сил и средств для ликвидации аварии, осуществлен выбор оптимального маршрута их доставки.

Решение задачи об оптимальном количестве резервуаров произведено в игровой постановке, при этом задачу удалось свести к задаче линейного программирования. Алгоритм решения задачи:

1. Выбор целевой функции

$$F(x) = \sum_{i=0}^n x_i \quad (20)$$
$$x_i = \frac{p_i}{v}$$

где p_i – вероятность; v – цена игры.

2. Формирование ограничений и граничных условий.

3. Выполнение расчетов.

4. Анализ полученных результатов.

Для подтверждения работоспособности методики выполнены расчеты для конкретного месторождения: стоимость доставки на месторождение 1 т дизель-

ного топлива (далее – ДТ) $C1 \approx 27$ тыс. руб. Стоимость хранения 1 т ДТ $C2 \approx 18$ тыс. руб. Стоимость своевременной доставки 1 т ДТ $C \approx 15$ тыс. руб. Для функционирования месторождения при различных климатических условиях ДТ необходимо $m_0 = 60$ т, $m_1 = 170$ т, $m_2 = 230$ т, $m_3 = 380$ т, $m_4 = 510$ т. Требуется определить оптимальный объем запаса ДТ и оптимальное количество резервуаров.

Платежная матрица при данных условиях имеет вид:

$$a = \begin{pmatrix} C & C1 \cdot (m1 - m0) & C1 \cdot (m2 - m0) & C1 \cdot (m3 - m0) & C1 \cdot (m4 - m0) \\ C2 \cdot (m1 - m0) & C & C1 \cdot (m2 - m1) & C1 \cdot (m3 - m1) & C1 \cdot (m4 - m1) \\ C2 \cdot (m2 - m0) & C2 \cdot (m2 - m1) & C & C1 \cdot (m3 - m2) & C1 \cdot (m4 - m2) \\ C2 \cdot (m3 - m0) & C2 \cdot (m3 - m1) & C2 \cdot (m3 - m2) & C & C1 \cdot (m4 - m3) \\ C2 \cdot (m4 - m0) & C2 \cdot (m4 - m1) & C2 \cdot (m4 - m2) & C2 \cdot (m4 - m3) & C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & a_{0,2} & a_{0,3} & a_{0,4} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & a_{1,4} \\ a_{2,0} & a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} & a_{2,4} \\ a_{3,0} & a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} & a_{3,4} \\ a_{4,0} & a_{4,1} & a_{4,2} & a_{4,3} & a_{4,4} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Каждый столбец матрицы « a » соответствует климатическим условиям на планируемый период работы объекта. Каждая строка матрицы « a » соответствует завозу топлива из расчета расхода в условиях различного климата.

Необходимо рассчитать значения вероятностей p_0, p_1, p_2, p_3, p_4 , с которыми будет осуществляться завоз топлива в зависимости от климатических условий. Целевая функция имеет вид (20). Ограничения и граничные условия:

$$\begin{aligned} x_0 \cdot a_{0,0} + x_1 \cdot a_{1,0} + x_2 \cdot a_{2,0} + x_3 \cdot a_{3,0} + x_4 \cdot a_{4,0} &\leq 1 & x_0 &\geq 0 \\ x_0 \cdot a_{0,1} + x_1 \cdot a_{1,1} + x_2 \cdot a_{2,1} + x_3 \cdot a_{3,1} + x_4 \cdot a_{4,1} &\leq 1 & x_1 &\geq 0 \\ x_0 \cdot a_{0,2} + x_1 \cdot a_{1,2} + x_2 \cdot a_{2,2} + x_3 \cdot a_{3,2} + x_4 \cdot a_{4,2} &\leq 1 & x_2 &\geq 0 \\ x_0 \cdot a_{0,3} + x_1 \cdot a_{1,3} + x_2 \cdot a_{2,3} + x_3 \cdot a_{3,3} + x_4 \cdot a_{4,3} &\leq 1 & x_3 &\geq 0 \\ x_0 \cdot a_{0,4} + x_1 \cdot a_{1,4} + x_2 \cdot a_{2,4} + x_3 \cdot a_{3,4} + x_4 \cdot a_{4,4} &\leq 1 & x_4 &\geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

Все решения выполнены в среде MathCad. Оптимальная масса хранения ДТ на объекте составляет 330 т, что эквивалентно 5 резервуарам РГС-100 с коэффициентом заполнения 0,85. Методика применима только в случае линейной зависимости стоимости завоза от массы нефтепродукта.

На нефтепромыслах часто возникает задача выбора профессионального аварийно-спасательного формирования (далее – АСФ) для осуществления мер по локализации и ликвидации аварийных разливов. Распределение сил и средств АСФ к месту возникновения аварии на территории месторождения удалось свести к транспортным задачам двух видов: со сбалансированным и разбалансированным запасом сил и средств. Целевая функция в данном случае будет иметь вид (общая стоимость перевозок):

$$F(x) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} c_{i,j} \cdot x_{i,j} \quad (23)$$

где $c_{i,j}$ – стоимость доставки одного комплекта оборудования от i -го стационарного пункта АСФ (a_i) к месту аварии на территории j -го месторождения Компании (b_j).

Ограничения представлены в виде блок-схемы на рис. 4.

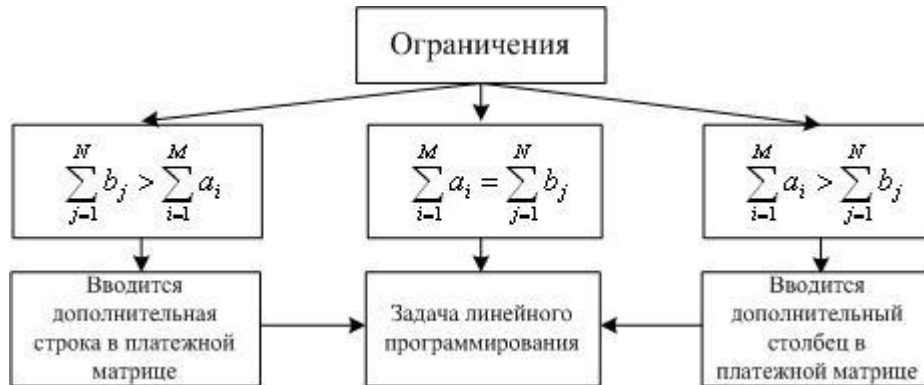


Рис. 4. Ограничения к постановке задачи об оптимальном распределении сил и средств для ликвидации аварийного разлива нефти

Граничные условия: $x_{i,j} \geq 0$.

Для проверки работоспособности методики были выполнены расчеты рационального распределения средств между маршрутами перевозок.

В табл. 1 представлены данные по имеющимся в рассматриваемом регионе АСФ и необходимые комплекты техники для ликвидации аварии на конкретных месторождениях Предприятия.

Таблица 1

Распределение техники по стационарным пунктам АСФ1, АСФ2, АСФ3, АСФ4 и количество необходимой техники на месторождениях

Номер стационарного пункта	a_1	a_2	a_3	Итого	
Запас оборудования на каждом стационарном пункте АСФ1	5	7	11	23	
Запас оборудования на каждом стационарном пункте АСФ2	6	10	7	23	
Запас оборудования на каждом стационарном пункте АСФ3	8	6	14	28	
Запас оборудования на каждом стационарном пункте АСФ 4	5	3	8	16	
Номер месторождения Компания	b_1	b_2	b_3	b_4	Итого
Необходимое число комплектов оборудования для ликвидации ЧС(Н)	4	7	6	6	23

Полученные в результате решения задачи распределения оборудования соответствуют минимальному значению целевой функции (23), т.е. – минимальным затратам на перевозку. Оптимальное распределение комплектов оборудования и значения целевой функции представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальное распределение сил и средств АСФ по месторождениям Компании

Стационарные пункты АСФ1	Месторождения Компании				Итого
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
a ₁	0	0	3	2	5
a ₂	0	7	0	0	7
a ₃	4	0	3	4	11
Итого: 206,3 фин.ед.	4	7	6	6	23
Стационарные пункты АСФ2	Месторождения Компании				Итого
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
a ₁	0	3	0	3	6
a ₂	0	4	6	0	10
a ₃	4	0	0	3	7
Итого: 197 фин.ед.	4	7	6	6	23
Стационарные пункты АСФ3	Месторождения Компании				Итого
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
a ₁	0	0	6	0	6
a ₂	0	0	0	6	6
a ₃	4	7	0	0	11
Итого: 198 фин.ед.	4	7	6	6	23
Стационарные пункты АСФ4	Месторождения Компании				Итого
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
a ₁	4	0	0	1	5
a ₂	0	0	0	3	3
a ₃	0	7	0	1	8
Итого: 133 фин.ед.	4	7	0	5	16

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимальным по минимуму стоимости и удовлетворению потребностей Компании при данных условиях будет выбор АСФ2. Задача решена при $t = 6$ часов, что является регламентированным временем для локализации разливов нефтепродуктов в соответствии Постановлением Правительства РФ №613 от 21.08.2000 г.

Вместе с вышеперечисленными задачами актуальной является задача поиска оптимального варианта маршрута АСФ для *достижения пункта аварии в кратчайшее время.*

Месторождение Предприятия расположено в трудно проходимой болотистой местности. Произошла авария на внутрипромысловом нефтепроводе. На территории района расположения месторождений Предприятия аттестованных АСФ нет. Доставка техники осуществляется авиатранспортом до вертолетной площадки, а затем по суше до места аварии. Движение техники по бездорожью возможно с максимальной скоростью v_1 , по проселочной дороге – со скоростью v_2 , $v_2 > v_1$. Расположение объектов представлено на рис. 5.

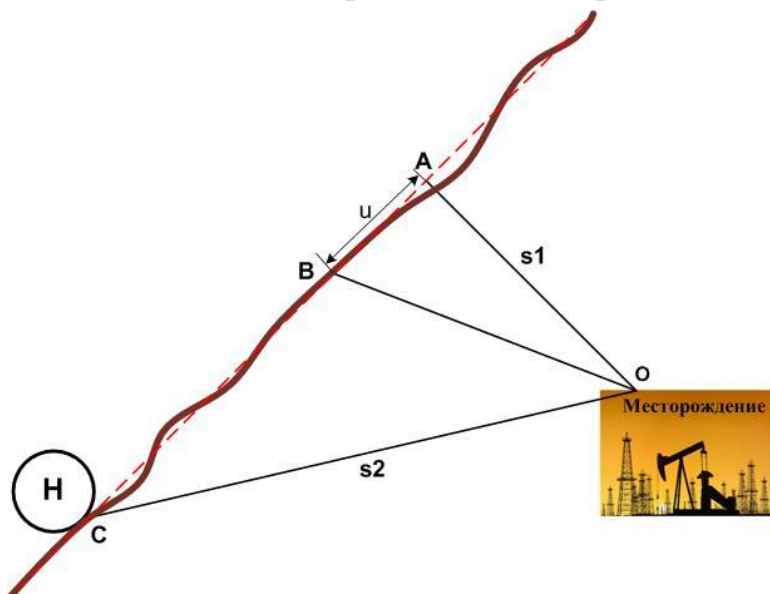


Рис. 5. Расположение объектов

Задача сводится к поиску такого значения $u^* \in U$, для которого $t(u^*) = \min_U t(u)$, где $U = \{0 < u < u_{CA}\}$. Граничные условия: $u \geq 0$.

Целевая функция имеет вид (функция изменения времени t доставки сил и средств в зависимости от выбранного управления u):

$$t(u) = \left(\frac{\sqrt{s_1^2 + u^2}}{v_1} \right) + \frac{s_2 - u}{v_2} \quad (24)$$

Для проверки метода выбора оптимального пути доставки (минимального времени) выполнены расчеты применительно к конкретному месторождению. Исходные данные: $v_1=5$ км/ч; $v_2=30$ км/ч; $s_1=21$ км; $s_2=32$ км; $AC=45$ км.

Результаты решения: $u = AB = 3,6$ км; $t = 5,2$ ч.

Осуществлена оценка риска в зависимости от выбора оптимального управления средствами повышения безопасности.

Результаты расчета риска при выборе оптимального и максимального числа резервуаров хранения ДТ на месторождении представлены в табл. 3. Частота разгерметизации резервуара хранения ДТ принята $5,5E-06$ 1/год, согласно Ме-

тодике, утв. Приказом МЧС РФ №404. Ущерб рассчитан по Методическим рекомендациям по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах РД 03-496-02.

Таблица 3

Оценка риска аварийного разлива ДТ в зависимости от выбранного количества резервуаров хранения

№ п/п	Масса, т	Кол-во резервуаров, шт.	Ущерб, тыс.руб.	Вероятность, 1/год	Риск, руб./год
1	330	5	7986,42	2,67E-05	213,0
2	510	7	12342,42	3,73E-05	460,9

В результате выбора оптимального числа резервуаров хранения по сравнению с имеющимся на сегодняшний день количеством резервуаров ущерб снижен на 4,356 млн.руб., значение риска снижено более чем в 2 раза.

Частота разрушения нефтепровода принята равной 4,7E-07 на 1 м нефтепровода в год для $D = 250$ мм. Оценка риска произведена для разрыва трубопровода длиной 14 км. Объем истечения 100 и 500 м³. Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка риска аварийного разлива нефти в зависимости от выбранного пути доставки и распределения сил и средств для ликвидации аварии

№ п/п	Путь	Время, часы	Вероятность, 1/год	Ущерб (АСФ1), тыс.руб.	Ущерб (АСФ2), тыс.руб.	Риск (АСФ1), руб./год	Риск (АСФ2), руб./год
$V = 100 \text{ м}^3; S = 2003 \text{ м}^2$							
1	СВО	5,2	2,88E-03	3179,24	3169,94	9141,8	9115,0
2	СО	6,4	2,88E-03	3446,46	3437,16	9910,2	9883,4
3	САО	5,7	2,88E-03	3290,59	3281,29	9462,0	9435,2
$V = 500 \text{ м}^3; S = 10010 \text{ м}^2$							
1	СВО	5,2	2,88E-03	15071,01	15061,71	43336,1	43309,4
2	СО	6,4	2,88E-03	16407,12	16397,82	47178,0	47151,3
3	САО	5,7	2,88E-03	15627,73	15618,43	44936,9	44910,2

В результате выбора оптимального распределения сил и средств для ликвидации аварии удалось существенно снизить значение ущерба от аварии. В результате выбора оптимального пути доставки сил и средств для ликвидации аварии ущерб снижен на 267 тыс. руб., значение риска снижено примерно на 8 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основными результатами выполненных диссертационных исследований являются:

- проведен сравнительный анализ действующих методик расчета площади разлива нефтепродуктов. В результате анализа в доверительный интервал с вероятностью 0,8 попадают, как правило, результаты расчетов по одной из рассмотренных методик. При значениях объема более 500 м³ число значений, попадающих в доверительный интервал, возрастает. При увеличении доверительной вероятности, количество результатов расчетов, попадающих в доверительный интервал, увеличивается;
- проведен сравнительный анализ действующих методик расчета давления насыщенных паров. Полученные результаты подтверждают равнозначность рассмотренных современных методик;
- предложена методика расчета вероятного объема вытекшей нефти из аварийного нефтепровода, позволяющая учитывать профиль трубопровода;
- апробирование методики оптимизации количества резервуаров хранения нефтепродуктов на территории конкретного месторождения позволяет снизить ущерб от ЧС на 4356 тыс. руб., а значение риска ЧС снизить более чем в 2 раза;
- разработана методика распределения сил и средств для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, применение которой позволяет значительно снизить затраты на локализацию и ликвидацию последствий аварийных разливов;
- разработана методика оптимизации времени доставки сил и средств для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов на основе задач нелинейного программирования позволяет снизить время прибытия аварийно-спасательных формирований на рассмотренном объекте на 0,5 часа, что позволяет снизить риск ЧС примерно на 8 %.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Иванова Т.Ю. Применение методов математического программирования при решении задач управления в чрезвычайных ситуациях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 4 (110). – С. 259–262.**
2. **Иванова Т.Ю. Оценка объемов возможных аварийных разливов нефтепродуктов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 2 (112).**

3. **Иванова Т.Ю. Расчет остаточного ресурса трубопровода по минимальной вероятной толщине стенки трубы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 2 (112).**
4. Иванова Т.Ю. Сравнение методик определения давления насыщенных паров нефтепродуктов // Проблема риска в техногенной и социальных сферах. Тезисы семинара. Выпуск 7. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 48–51.
5. Иванова Т.Ю. Развитие научного знания в области безопасности // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 37–41.
6. Яковлев В.В., Иванова Т.Ю. Задачи математического программирования при решении проблем управления в чрезвычайных ситуациях // Безопасность в чрезвычайных ситуациях: сборник научных трудов II Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 235–242.
7. Иванова Т.Ю. Проблема распределения ресурсов для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Материалы международного конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов». Том 1. Научно-практическая конференция «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий», Санкт-Петербург, 12-13 ноября 2010 г. – СПб.: ООО «ПИФ.СОМ», 2010. – С. 77–79.
8. Иванова Т.Ю. Применение задач математического программирования при распределении сил и средств для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Проблемы управления безопасностью в чрезвычайных ситуациях. Тезисы научно-практической конференции.– СПб., 2010. – С. 47–49.
9. Иванова Т.Ю. Сравнительный анализ методик расчета площади разлива нефтепродуктов // XXXIX Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции. Ч. XII. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 3–4.
10. Иванова Т.Ю. Математическое программирование в решении проблем снижения риска аварийных разливов нефти // XXXIX международная научно-практическая конференция «Неделя науки СПбГПУ»: материалы докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 42–45.