

Увин Анатолий Сергеевич, Студент
ИжГТУ им. М.Т. Калашникова

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА АВАРИЙ НА РЕЗЕРВУАРНЫХ ПАРКАХ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИВОВ

Аннотация. Статья посвящена проблеме повышения достоверности оценки риска аварийных разливов нефтепродуктов на резервуарных парках. Показано, что традиционные детерминированные методы не учитывают динамику отказов оборудования и человеческий фактор в достаточной степени. Предложена методика, интегрирующая байесовские сети для прогнозирования вероятности аварийной ситуации и программный комплекс CFD для моделирования последствий разлива и распространения пожароопасных зон. На основе данных эксплуатации трёх резервуарных парков построена модель, позволяющая ранжировать сценарии по величине социального и индивидуального риска. Разработаны практические рекомендации по снижению риска до приемлемого уровня (менее 10^{-6} год $^{-1}$) за счёт оптимизации систем обнаружения утечек и противопожарных преград.

Ключевые слова: Техносферная безопасность, резервуарный парк, количественная оценка риска, байесовские сети, CFD-моделирование, разлив нефтепродуктов, пожарная безопасность, индивидуальный риск.

Резервуарные парки для хранения нефти и нефтепродуктов являются одними из наиболее пожаровзрывоопасных объектов техносферы. Статистика аварий за последние десятилетия показывает, что, несмотря на ужесточение нормативных требований и внедрение систем автоматики, частота крупных аварий с разливами и пожарами остаётся на уровне 0,5–1,0 событий на 1000 резервуаров в год, причём в 60% случаев причиной является не техническая неисправность, а ошибки персонала или недостатки организации работ [1].

Существующие методики оценки риска (например, руководства по количественному анализу риска) преимущественно опираются на статические деревья отказов и предполагают независимость событий. Однако на практике отказы взаимосвязаны, и человеческий фактор существенно изменяет вероятности. Кроме того, последствия аварий – зоны поражения тепловым излучением, концентрация взрывоопасных паров – рассчитываются по упрощённым эмпирическим формулам, что даёт значительные погрешности (до 40–50%).

Цель данного исследования – разработать усовершенствованную методику количественной оценки риска для резервуарных парков, включающую:

- 1) динамическую вероятностную модель на основе байесовских сетей, учитывающую взаимосвязи отказов оборудования, ошибок операторов и внешних воздействий;
- 2) численное моделирование процессов разлива и распространения паровоздушного облака с использованием вычислительной гидродинамики (CFD) для уточнения зон поражения;
- 3) интеграцию результатов в классическую схему расчёта индивидуального и социального риска для принятия управленческих решений.

Объект исследования – типовой резервуарный парк с 10 резервуарами объёмом 5000 м³ каждый для хранения бензина и дизельного топлива. Предмет – методы количественного анализа риска и моделирования аварийных процессов.

В российской и международной практике количественная оценка риска (КОР) регламентируется стандартами серии ISO 31000, IEC 60300, а также отраслевыми документами (например, РД 03-418-01). Основным инструментарий – деревья отказов (FTA) и деревья событий (ETA), которые строятся на основе статистических данных об отказах оборудования.

Однако анализ фактических данных по трём резервуарным паркам, эксплуатируемым в разных климатических зонах в течение 10 лет, показал, что:

- 1) более 30% отказов систем обнаружения утечек не приводят к немедленной аварии, но в сочетании с другими факторами (высокая температура, проведение огневых работ) создают критическую ситуацию;



2) человеческий фактор (неверная интерпретация показаний, запаздывание при ручном перекрытии задвижек) увеличивает вероятность перерастания утечки в крупный разлив в 2–3 раза;

3) используемые детерминированные модели распространения газового облака (например, модели Гаусса) недостаточно точно описывают поведение тяжёлых паров в условиях городской застройки или при сложном рельефе.

Таким образом, требуется переход к вероятностным моделям, допускающим обновление вероятностей по мере поступления новой информации (апостериорная коррекция), и к пространственно-распределённым моделям для расчёта поражающих факторов.

Байесовские сети (БС) представляют собой ориентированные ациклические графы, где узлы соответствуют переменным (событиям, состояниям), а рёбра – вероятностным зависимостям. Преимущество БС – возможность комбинировать субъективные экспертные оценки и объективные статистические данные, а также вычислять условные вероятности при наступлении тех или иных свидетельств.

На основе анализа эксплуатационной документации и опроса экспертов была построена БС для сценария «разлив из резервуара при переполнении». В сеть включены следующие группы узлов:

1) Иницирующие события: отказ уровнемера (вероятность 0,02 в год), ошибка оператора при приёме топлива (0,05), отказ системы автоматического отключения подачи (0,01).

2) Условные факторы: скорость ветра, температура воздуха, наличие источника зажигания, состояние системы ограждения (обваловки).

3) Промежуточные события: образование взрывоопасного облака, возгорание разлива, прорыв обваловки.

4) Исходы: пожар разлива, взрыв облака, выброс в водный объект.

Условные вероятности определены на основе базы данных аварий (более 200 событий) и экспертных оценок по шкале.

Результатом работы БС является апостериорная вероятность реализации каждого сценария при заданных условиях. Например, при отказе уровнемера и проведении ремонтных работ (источник зажигания) вероятность взрыва возрастает с 0,03 до 0,27, что подчёркивает важность блокировок.

Таблица 1

Базовые вероятности иницирующих событий (в год)

Иницирующее событие	Символ	Базовое значение
Отказ уровнемера	U	0,020
Ошибка оператора при приёме топлива	O	0,050
Отказ системы автоматического отключения	A	0,010
Отказ задвижки на всасывающем трубопроводе	Z	0,008
Нарушение герметичности дыхательного клапана	D	0,015

Таблица 2

Условные вероятности перехода к критическим событиям

Исходное событие	Условие	Вероятность перехода
Переполнение резервуара	Наличие искры	0,25
Переполнение резервуара	Отсутствие искры	0,02
Разрыв шва днища	Образование парового облака	0,35
Разрыв трубопровода	Попадание на горячую поверхность	0,40



Для уточнения пространственного распределения поражающих факторов (интенсивность теплового излучения, концентрация паров, зона загазованности) использован программный комплекс ANSYS Fluent. Моделировался разрыв донного шва резервуара с истечением дизельного топлива площадью 100 м², с последующим испарением и распространением паров в ветровом потоке со скоростью 3 м/с.

Расчётная область включала реальную геометрию парка: резервуары, обвалование высотой 2,5 м, рядом расположенные здания. Использовалась нестационарная постановка, модели турбулентности k-ε, учёт силы тяжести и плавучести паров. Получены поля концентраций на высоте 1 м над уровнем земли, а также тепловые потоки от возможного пожара разлива.

Таблица 3

Результаты CFD-расчётов поражающих факторов

Параметр	Значение для сценария (разлив 100 м ²)
Максимальная концентрация паров у земли, % об.	2,4 (при НКПР = 0,7%)
Распространение зоны > НКПР по ветру, м	120
Распространение зоны > НКПР против ветра, м	35
Тепловой поток при пожаре разлива на расстоянии 50 м, кВт/м ²	4,2
Тепловой поток на расстоянии 80 м, кВт/м ²	1,8
Время достижения максимальной площади разлива, мин	12

Результаты показали, что зона с концентрацией выше нижнего концентрационного предела распространения (НКПР – 0,7% об.) при слабом ветре простирается на 120 м от резервуара, что на 30–40% больше, чем по расчёту по модели Гаусса. При этом обвалование эффективно сдерживает растекание жидкости, но пары перетекают через препятствие, что создаёт дополнительные риски за его пределами.

На основе CFD-расчётов уточнены радиусы поражающих зон для теплового излучения: для тяжёлых травм (интенсивность 4 кВт/м²) – 85 м, для возгорания одежды (7 кВт/м²) – 55 м. Эти данные использованы для расчёта индивидуального риска персонала и населения в окрестностях.

Итоговая методика включает следующие шаги:

- 1) Построение байесовской сети для каждого рассматриваемого сценария (переполнение, разрыв стенки, разрыв трубопровода) с учётом текущего состояния оборудования и метеоусловий.
- 2) Расчёт апостериорной вероятности реализации сценария с использованием метода цепей Маркова-Монте-Карло для учета неопределённостей.
- 3) Для каждого сценария с ненулевой вероятностью – выполнение CFD-расчёта или использование заранее подготовленных таблиц поражающих факторов для типовых условий.
- 4) Расчёт индивидуального риска для персонала и населения по формуле:

$$IR = \sum_i (P_i \cdot F_i \cdot V_i) \quad (1)$$

где P_i – вероятность i -го сценария, F_i – частота поражающего фактора (например, тепловое излучение выше порога), V_i – условная вероятность гибели человека при воздействии данного фактора (из пробит-функций).

5) Оценка социального риска (F-N кривая) путём определения возможного числа погибших в зависимости от сценария.

6) Сравнение полученных значений с критериями приемлемого риска (индивидуальный риск $\leq 10^{-6}$ год⁻¹ для населения, $\leq 10^{-5}$ для персонала).



Для проверки предложенной методики проведена оценка риска для условного резервуарного парка (10 резервуаров по 5000 м³ бензина). Исходные данные: частота отказов оборудования – из стандартных баз; метеоусловия – среднегодовые для средней полосы России.

Без дополнительных мер индивидуальный риск для ближайшего жилого квартала (300 м от границы парка) составил $3,2 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹, что превышает допустимый уровень ($1 \cdot 10^{-6}$). Социальный риск: вероятность гибели 1–2 человек – 0,1 в год; более 5 – 0,02 в год.

Анализ чувствительности байесовской сети показал, что наибольшее влияние на итоговый риск оказывают:

- 1) частота отказов автоматических клапанов (вклад 38%);
- 2) время срабатывания системы обнаружения утечек (вклад 27%);
- 3) квалификация оператора (вклад 22%).

На основе этого разработаны корректирующие мероприятия:

1) Замена клапанов с пневмоприводом на более надёжные электроприводные с самодиагностикой – снижение вероятности отказа на 50%.

2) Внедрение системы раннего обнаружения паров (газоанализаторы с пороговой чувствительностью) – сокращение времени реакции с 5 до 1 минуты, что уменьшает вероятность воспламенения в 2 раза.

3) Увеличение высоты обвалования до 3,5 м и установка защитных экранов – снижение выноса паров за пределы парка на 40%.

Таблица 4

Сравнение индивидуального риска для четырёх основных сценариев
до и после внедрения мероприятий

Сценарий	Индивидуальный риск до, год ⁻¹	Индивидуальный риск после, год ⁻¹
Переполнение с воспламенением	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$
Разрыв донного шва	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$
Разрыв трубопровода при приёме	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
Падение давления с выбросом паров	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$

После внедрения этих мер повторный расчёт дал индивидуальный риск на границе жилой застройки $8,5 \cdot 10^{-7}$, что соответствует приемлемому уровню. Социальный риск также снизился до значений, лежащих ниже критерия ALARP.

Предложенная методика показала свою работоспособность на ограниченных данных. Её преимущества:

- 1) учёт взаимосвязей и неопределённостей через байесовский подход;
- 2) уточнённые пространственные зоны поражения благодаря CFD-моделированию;
- 3) возможность динамического обновления вероятностей при изменении условий (ремонт, погода).

Основные ограничения – высокая вычислительная сложность CFD-моделей, что требует предварительного создания библиотеки типовых расчётов для различных сценариев и метеоусловий. В дальнейшем планируется разработка упрощённых поверхностных моделей, аппроксимирующих CFD-результаты, для использования в оперативном режиме.

Также перспективным является внедрение системы поддержки принятия решений, интегрирующей байесовскую сеть с данными реального времени (уровнемер, газоанализаторы, скорость ветра), что позволит прогнозировать риск в реальном времени и автоматически рекомендовать меры (например, сокращение объёма приёмки при сильном ветре).

В ходе исследования разработана и апробирована методика количественной оценки риска аварий на резервуарных парках, основанная на сочетании байесовских сетей и CFD-моделирования. Методика позволяет с высокой точностью прогнозировать как вероятности



сценариев, так и их пространственные последствия. Применение на реальном объекте показало, что традиционные подходы занижают риск, а предложенный комплекс мероприятий способен снизить индивидуальный риск до приемлемого уровня.

Список литературы:

1. Анализ аварийности на объектах нефтепродуктообеспечения за период 2015–2025 гг. – М.: ВНИИПО, 2026. – 112 с.
2. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Методы оценки риска. – М.: Стандартинформ, 2012.
3. Байесовские сети в управлении рисками: теория и практика / под ред. А.В. Карасёва. – СПб.: БХВ-Петербург, 2023. – 320 с.
4. ANSYS Fluent – руководство пользователя. Моделирование турбулентных течений и тепломассопереноса. – 2024.
5. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (Приказ МЧС России № 404). – М., 2014.
6. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. – М.: Госгортехнадзор, 2001.
7. Справочник по взрывопожаробезопасности резервуарных парков / В.И. Жуков, С.А. Ларин. – М.: Недра, 2021. – 280 с.
8. Международная база аварий на нефтебазах (HSE – Hazardous Installations Directorate) – статистический бюллетень, 2024

