

Научная статья

УДК 614.84

doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.79.016

Оценка рисков и разработка способа их снижения на магистральном нефтепроводе и прилегающих территориях

Виталий Вячеславович Крымский¹

Григорий Константинович Ивахнюк²

Руслан Рифович Гарифулин³

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0001-8289-691X>

²<https://orcid.org/0000-0003-2556-303X>

³<https://orcid.org/0000-0001-9081-2106>

Автор, ответственный за переписку: Виталий Вячеславович Крымский, kvv-1982@yandex.ru

Аннотация. В данной статье проведён комплексный анализ рисков эксплуатации магистрального нефтепровода «Куйбышев–Тихорецк», предназначенного для транспортировки товарной нефти в порт Новороссийск.

Для анализа использовано специализированное программное обеспечение PromRisk, которое позволило смоделировать различные сценарии аварийных ситуаций, определить зоны повышенного риска с учетом рельефа местности, розы ветров и плотности населения. Полученные результаты не только количественно оценивают вероятность аварий, но и учитывают влияние внешних факторов, таких как стихийные бедствия и несанкционированные действия третьих лиц, в том числе атаки беспилотных авиационных систем. Это отличает данное исследование от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на технические аспекты эксплуатации, позволяя комплексно оценить угрозы и разработать соответствующие меры безопасности.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные рекомендации могут быть использованы для формирования планов тушения пожаров, предотвращения аварий, обучения персонала и принятия оперативных управленческих решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций, что в конечном итоге способствует повышению безопасности транспортировки нефти. Результаты исследования могут быть применены при модернизации и постройке новых магистральных нефтепроводов в нашей стране.

Ключевые слова: пожарная безопасность, пожарный риск, чрезвычайная ситуация, авария, нефтепровод, нефть, газ, разгерметизация, разлив, коррозия

Для цитирования: Крымский В.В., Ивахнюк Г.К., Гарифулин Р.Р. Оценка рисков и разработка способа их снижения на магистральном нефтепроводе и прилегающих территориях // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 2 (37). С. 177-189. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.79.016>.

Original article.

Risk assessment and development of a way to reduce them on the main oil pipeline and adjacent territories

Vitaly V. Krymsky¹

Grigory K. Ivakhnyuk²

Ruslan R. Garifullin³

Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Saint Petersburg, Russia

¹<https://orcid.org/0000-0001-8289-691X>

²<https://orcid.org/0000-0003-2556-303X>

³<https://orcid.org/0000-0001-9081-2106>

Corresponding author: Vitaly V. Krymsky, kvv-1982@yandex.ru

Abstract. This article provides a comprehensive analysis of the risks of operating the Kuibyshev–Tikhoretsk main oil pipeline, designed to transport commercial oil to the port of Novorossiysk.

For the analysis, PromRisk specialized software was used, which made it possible to simulate various emergency scenarios, identify high-risk areas, taking into account the terrain, wind patterns and population density. The results obtained not only quantify the probability of accidents, but also take into account the influence of external factors such as natural disasters and unauthorized actions by third parties, including attacks by unmanned aircraft systems. This distinguishes this study from traditional approaches focused primarily on the technical aspects of operation, allowing a comprehensive assessment of threats and the development of appropriate security measures.

The practical significance of the work lies in the fact that the recommendations developed can be used to form fire extinguishing plans, prevent accidents, train personnel and make operational management decisions in case of emergencies, which ultimately contributes to improving the safety of oil transportation. The results of the study can be applied in the modernization and construction of new main oil pipelines in our country.

Keywords: fire safety, fire risk, emergency, accident, oil pipeline, oil, gas, depressurization, spillage, corrosion

For citation: Krymsky V.V., Ivakhnyuk G.K., Garifullin R.R. Risk assessment and development of a way to reduce them on the main oil pipeline and adjacent territories // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 2 (37). С. 177-189. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.95.79.016>.

Введение

С развитием промышленного производства и попутно связанных с этим отраслей экономики потребность в нефти и нефтепродуктах становится всё больше, несмотря на незначительный спад транспортировки по трубопроводам, и увеличение количества перевозимого груза нефтяными танкерами. В ближайшие годы нефтепроводы будут также широко использоваться, и скорее всего основная их часть будет переориентирована на Азиатское направление. Доставка нефти по трубопроводам - один из самых безопасных и эффективных способов транспортировки нефти, нефтепродуктов и других химических веществ. Однако существует угроза разгерметизации нефтепроводов во время транспортировки, так как трубопроводы могут быть повреждены внутренними или внешними факторами, такими как старение или низкое качество материала, коррозия и так далее. За последнее десятилетие в России произошло более 1000 пожаров на нефте- и газопроводах [1-3]. При пожарах или взрывах на магистральных нефтепроводах, возможна гибель людей, а также повреждение оборудования, зданий, жилых домов и сооружений. В июле-августе 1994 года в Усинском районе Республики Коми на нефтепроводе «Возей – головные сооружения» произошла серьезная авария, вызванная коррозией. В результате этого инцидента, по оценкам экспертов, около 94 тысяч тонн сырой нефти вылились на грунт. Это событие стало

крупнейшей экологической катастрофой за последние 30 лет в истории нефтедобычи на территории СССР и РФ. Загрязненная территория охватила восемь населенных пунктов с общим населением в 63,5 тысячи человек, а общая площадь загрязнения достигла 270 гектаров.

Более того, нефть, проникшая в почву, добралась до реки Печоры и, соответственно, Баренцева моря. Распространение нефтяного загрязнения на водных ресурсах привело к образованию нефтяного пятна, которое простирается на протяжении 18 километров. В очищении участков разливов и рекультивации местности удалось достичь значительного прогресса только к первой половине 2000-х годов.

Эта авария стала серьезным напоминанием о нарушении экологической безопасности в нефтедобывающей промышленности и привлекла значительное внимание аудитории. Не только население района и окружающих территорий было подвержено негативным последствиям, но и животный мир, а также экосистема реки и морского побережья. Эта катастрофа напомнила нам обязательность предпринимать все возможные меры для предотвращения подобных инцидентов и сохранения окружающей среды.

Ещё один масштабный инцидент произошел 18 января 2018 года в селе Красноармейское Саратовской области, когда нефть разлилась в результате разгерметизации магистрального нефтепровода Куйбышевск-Тихорецк (Рис.1а). Нефть текла по трём улицам и возникло возгорание, которое охватило площадь до 7,5 тысяч м². В результате горения два дома были полностью уничтожены, а 30 домов пострадали. Объем разлива нефти составил 2000 м³ (Рис.1б)

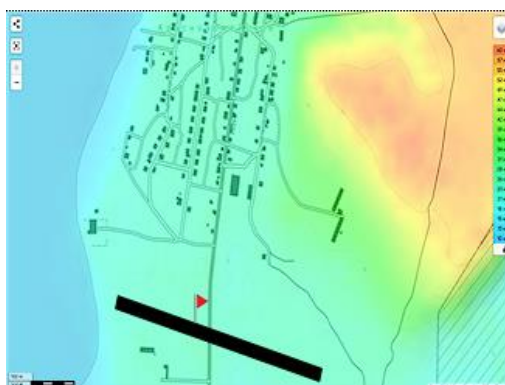


Рис.1а. Карта села Красноармейское с учетом рельефа местности



Рис.1б. Пожар в селе Красносамарское Саратовской области, возникший из-за разгерметизации нефтепровода в 2018 году

Исследование рисков, связанных с транспортировкой нефти по трубопроводам, имеет важное практическое значение, так как позволяет обеспечить безопасность пожарных, персонала, населения, проживающего вблизи нефтепроводов. Изучение риска, связанного с прокладкой нефтепровода на большие расстояния, является особенно важным для предотвращения человеческих жертв, материальных потерь и экологических катастроф.

Оценка индивидуального риска несчастного случая, связанного с пожарами или авариями на нефтепроводах, играет ключевую роль в управлении рисками. Исходя из анализа рисков, связанных с разгерметизацией и пожарами на магистральных нефтепроводах, была предложена математическая модель для оценки последствий аварий с пожарами на нефтепроводах. Зоны воздействия и индивидуальные риски были отображены на карте с помощью программного обеспечения PromRisk [2], которое широко используется в промышленности для оценки пожарных рисков, что подтверждается ссылками на нормативные документы, обеспечивает методологическую достоверность.

Цель исследования – разработать эффективный способ снижения риска возникновения пожароопасных ситуаций, а также повысить уровень безопасности транспортировки нефти посредством интеграции современных методов моделирования и управления рисками.

В данной статье представлены основные элементы расчета рисков на примере пожара на магистральном нефтепроводе в Саратовской области 18 января 2018 года, а также методы снижения рисков и опасности пожаров на нефтепроводах в целом. Полученные результаты могут быть полезными для оценки рисков и управления безопасностью нефтепроводов.

Методы исследования

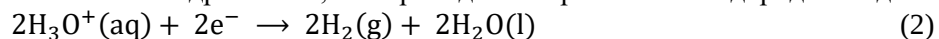
Электрофизический метод защиты (ЭФМ) был предложен в качестве эффективного способа снижения риска возникновения пожаров на магистральных нефтепроводах. Суть данного метода заключается в применении переменного частотно-модулированного потенциала определенной частоты на объект защиты, каким является нефтепровод. Этот потенциал способствует возникновению электрохимических процессов, приводящих к образованию защитного слоя на поверхности трубы. Этот слой играет важную роль в предотвращении коррозии, а, следовательно, снижении риска возгорания на нефтепроводах. Основная задача данного метода заключается в стимуляции поляризации металлических частиц, что приводит к активации процессов, обеспечивающих пассивную защиту от коррозии. Таким образом, ЭФМ является инновационной и эффективной техникой, способной существенно уменьшить риск пожаров на магистральных нефтепроводах:

ЭФМ основан на создании переменного потенциала, который стимулирует электрохимические реакции на поверхности металлических конструкций, что ведёт к образованию защитного слоя, препятствующего коррозии и снижению риска пожаров. Ниже приведены основные реакции, иллюстрирующие этот процесс.

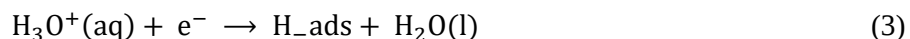
1. Анодная реакция (окисление железа). При приложении переменного потенциала металл подвергается окислению, что приводит к выделению электронов и образованию ионов железа:



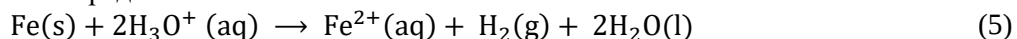
2. Катодная реакция в кислой среде. В кислой среде основной процесс на катоде связан с восстановлением ионов гидроксония. Электроны, выделенные в анодной реакции, используются для восстановления гидроксония, что приводит к образованию водорода и воды:



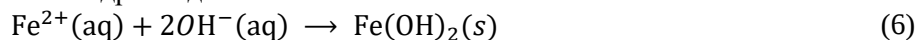
Альтернативно, можно рассматривать процесс через стадию адсорбированных водородных атомов:



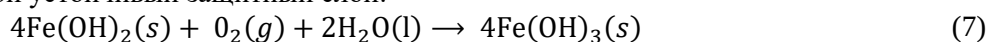
3. Общее уравнение электрохимического цикла. Объединяя анодную и катодную реакции, получаем общее уравнение процесса, которое иллюстрирует превращение железа под воздействием кислой среды:



4. Формирование защитного слоя. Для защиты от дальнейшей коррозии и, как следствие, снижения риска возникновения пожара, ионы железа, выделяющиеся в ходе анодной реакции, вступают в реакцию с гидроксид-анионами, присутствующими в воде, что приводит к образованию гидроксида железа:



5. Окисление гидроксида железа. При дальнейшем воздействии кислорода из окружающей среды гидроксид железа может окисляться до гидроксида железа (III), который представляет собой устойчивый защитный слой:



Данные реакции объясняют, каким образом ЭФМ способствует формированию защитного слоя на поверхности металлических трубопроводов. Постепенное образование слоя гидроксида железа препятствует дальнейшему коррозионному процессу и уменьшает риск утечек и пожаров, что является ключевым фактором повышения пожарной безопасности магистральных нефтепроводов.

Исследования показали, что применение ЭФМ значительно снижает скорость коррозии металлов на магистральных нефтепроводах. ЭФМ основывается на воздействии переменного электрического поля на поверхность металла, что способствует диффузии ионов металла в окружающую среду и повышает эффективность процесса растворения.

Анализ зоны влияния аварий и пожаров на магистральных трубопроводах включает в себя определение радиусов поражения человека и повреждения. Радиус поражения указывает на расстояние, на котором авария и разлив нефти в трубопроводе могут представлять угрозу для жизни и здоровья персонала, населения и окружающей среды, а также приводить к потере имущества и т.д.

Обычно магистральные нефтепроводы строятся на определенном расстоянии от населенных пунктов. Однако, учитывая, что аварии на нефтепроводах могут происходить в любом их месте, можно считать, что они являются потенциальными источниками опасности. При возникновении аварии все опасные точки, находящиеся по обе стороны от нефтепровода, могут быть представлены в виде окружностей или аппроксимированы прямоугольными областями вдоль трубопровода.

Таким образом, чем ближе находятся объекты к магистральному нефтепроводу, тем выше риск возможных последствий аварии. На Рис.2 показаны возможные последствия аварии на нефтепроводе [2].

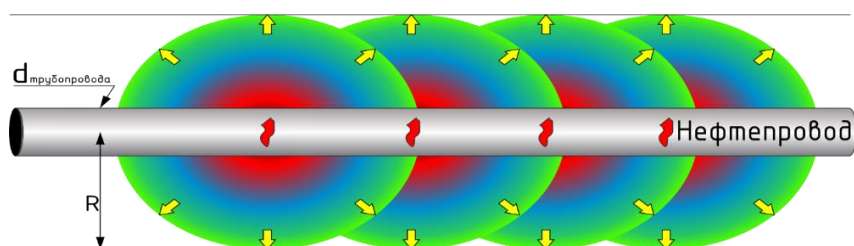


Рис.2. Схема зоны разлива при аварии на магистральном нефтепроводе

Этот анализ зоны влияния аварий и пожаров на магистральных трубопроводах является важным для определения риска и разработки мер по предотвращению или минимизации возможных последствий таких аварий.

В случае возникновения пожара, взрыва или утечки опасного вещества, индивидуальный риск определяется как вероятность смерти конкретного индивида. Этот риск измеряется величиной, равной количеству смертей на одного человека в течение определенного периода времени. Допустимый индивидуальный пожарный риск для зданий, сооружений и производственных территорий составляет не более 1×10^{-6} смерти в год. Это означает, что за год на каждого человека [4] в этих местах приходится не более 1 случая смерти

от пожара. Для жилых зон, общественно-деловых зон и зон отдыха возле производственных объектов допустимый индивидуальный пожарный риск составляет не более 1×10^{-8} смерти в год (Рис.3). Это значит, что на каждого человека в этих зонах не должно приходиться более 1 случая смерти от пожара, вызванного опасными факторами с объекта. Величина индивидуального риска используется для оценки безопасности и принятия мер по предотвращению возможных аварийных ситуаций и защите людей от них.

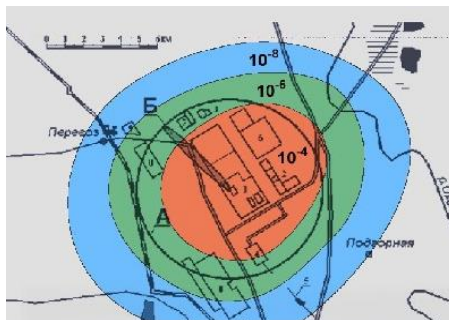


Рис.3. Планкарта местности с зонами индивидуального пожарного риска

Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, индивидуальный пожарный риск принимается равным величинам потенциального риска в этой зоне с учетом доли времени присутствия людей в зданиях, сооружениях и строениях вблизи производственного объекта:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i)$$

где, $P(i)$ – интегрированная по площади величина потенциального риска в i -ой области территории в селитебной зоне, год^{-1} ;

q_{im} – доли времени присутствия людей m в i -ой области территории (здании) в селитебной зоне.

То есть, для зданий класса Ф1 присутствие людей предполагается на протяжении всего времени функционирования здания. Для зданий классов Ф2, Ф3, Ф4 и Ф5, которые работают круглосуточно, доля времени присутствия людей также принимается равной 1. Однако, если здание классов Ф2, Ф3, Ф4 и Ф5 работает в некруглосуточном режиме, то доля времени присутствия людей определяется организационно-распорядительными документами для данного здания [2].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчетов индивидуального пожарного риска в селитебной зоне вблизи объекта приведены в Табл.1:

Табл.1. Расчет индивидуального пожарного риска в селитебной зоне вблизи объекта

Здание, область территории	q_{im}	$P(i)$ (мин....макс.), год^{-1}	$R_m(i)$, год^{-1}
Группа людей_01			
Область территории в селитебной зоне_01	0,9	$4,501 \cdot 10^{-7} \dots 3,619 \cdot 10^{-6}$	$1,513 \cdot 10^{-6}$
Автомобильная дорога_01	0,1	$3,645 \cdot 10^{-6} \dots 3,929 \cdot 10^{-6}$	$3,818 \cdot 10^{-7}$
Итого: $R_m =$			$1,895 \cdot 10^{-6}$

Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, социальный пожарный риск принимается равным частоте возникновения событий, ведущих к гибели 10 и более человек [2]:

$$S = \sum_{j=1}^L Q_j,$$

где, L – число сценариев развития пожароопасных ситуаций (пожаров), для которых среднее число погибших людей в селитебной зоне вблизи объекта в результате воздействия опасных факторов пожара, взрыва превышает 10 человек;

Q_j – частота возникновения пожароопасной ситуации (пожара), год^{-1} .

В представленных графиках отображены два нефтепровода, каждый со следующими характеристиками:

1. Первый нефтепровод имеет внутренний диаметр 1200 мм и является стандартным, то есть лишен электрофизического способа защиты.

2. Второй нефтепровод также имеет внутренний диаметр 1200 мм, но в отличие от первого снабжен электрофизической системой защиты.

Обращаясь к [7], мы обнаруживаем, что среднестатистическая относительная доля аварий, связанных с проколами (трещинами) и точечными отверстиями из-за коррозии, с площадью дефектного отверстия, равной $0,0072 \times S_0$, составляет 15,2%. Исходя из графиков (Рис.4-6), мы можем наблюдать, что реализация сценариев, приводящих к гибели 10 и более человек, имеет различную частоту возникновения на обоих нефтепроводах. Однако важно отметить, что график второго нефтепровода, оборудованного электрофизической системой защиты, демонстрирует более низкую частоту возникновения таких сценариев по сравнению с графиком стандартного нефтепровода.

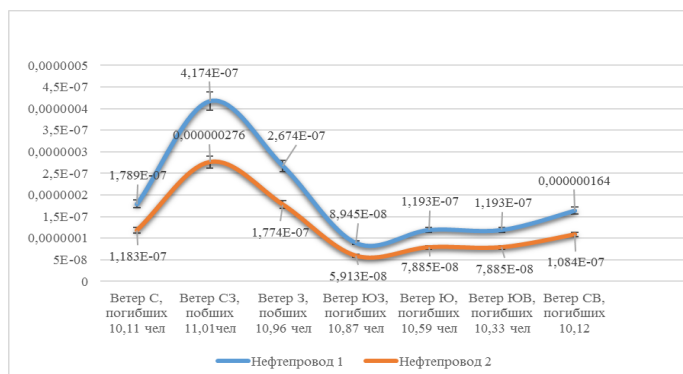


Рис.4. Сравнение сценария разгерметизации нефтепроводов с площадью дефектного отверстия $0,0072 \times S_0$ («свищ»)

На графике приведено сравнение двух вариантов нефтепровода (обозначенных как «Нефтепровод 1» и «Нефтепровод 2») в сценарии разгерметизации с площадью дефектного отверстия $0,0072 \times S_0$. По оси абсцисс (горизонтальной) отложены различные сценарии, учитывающие направление ветра (например, «Ветер С», «Ветер СЗ» и т. д.) и условное количество пострадавших («погибших 10,11 чел.» или «10,12 чел.»). По оси ординат (вертикальной) показана частота возникновения пожароопасной ситуации (вероятность событий, ведущих к пожару) в год^{-1} .

Дефектное отверстие площадью $0,0072 \times S_0$ характеризует небольшую утечку нефти, которая может образовываться в результате коррозии или мелкого повреждения трубопровода. Несмотря на то, что отверстие невелико, в случае разгерметизации может возникнуть пожар или другая аварийная ситуация в случае воспламенения нефти.

На графике видно, что для Нефтепровода 1 (синяя кривая) частота пожароопасной ситуации в большинстве сценариев выше. Для Нефтепровода 2 (оранжевая кривая) частота ниже, и в целом кривая лежит ниже синей на протяжении всех рассматриваемых вариантов ветра и условных количеств погибших. На Нефтепроводе 2 произошло уменьшение на 33,88% частоты возникновения пожароопасной ситуации по сравнению с Нефтепроводом 1. Проще говоря, при одинаковых условиях (то есть одинаковом направлении ветра, количестве потенциально погибающих людей и площади «свища») вероятность возникновения крупного пожара или аварии у трубопровода с электрофизической защитой оказывается существенно

ниже. На оси абсцисс в каждой точке отражена комбинация направления ветра (например, «С», «ЮЗ» и т. д.) и предполагаемого числа погибших (10,11; 10,12 и т. п.). Это моделирование показывает, как конкретные условия (в том числе роза ветров и плотность населения) влияют на вероятность тяжёлых последствий при разгерметизации. В каждом таком сценарии Нефтепровод 2 демонстрирует лучшие показатели.

Причина снижения: ЭФМ снижает коррозию, следовательно, вероятность появления и развития дефектов на стенках трубы (в частности, небольших отверстий типа «свищ») уменьшается. Это автоматически сокращает вероятность утечки нефти и последующего пожара.

Практический эффект: чем ниже частота пожароопасных событий, тем реже возникают аварии с возможным возгоранием, что повышает общую безопасность объекта и прилегающих территорий.

Вывод из графика: сокращение риска на треть (почти 34%) – это заметное достижение с точки зрения безопасности. Оно подчёркивает эффективность внедрения электрофизической защиты трубопровода и доказывает, что подобные меры действительно способны снизить вероятность возникновения пожаров и аварий при небольших повреждениях типа «свищ». Таким образом, представленный график иллюстрирует, что ЭФМ трубопровода существенно уменьшает вероятность (частоту) пожароопасных событий при небольших дефектах. Сценарии с различными направлениями ветра и условным количеством пострадавших демонстрируют явное преимущество Нефтепровода 2 по сравнению со стандартным Нефтепроводом 1

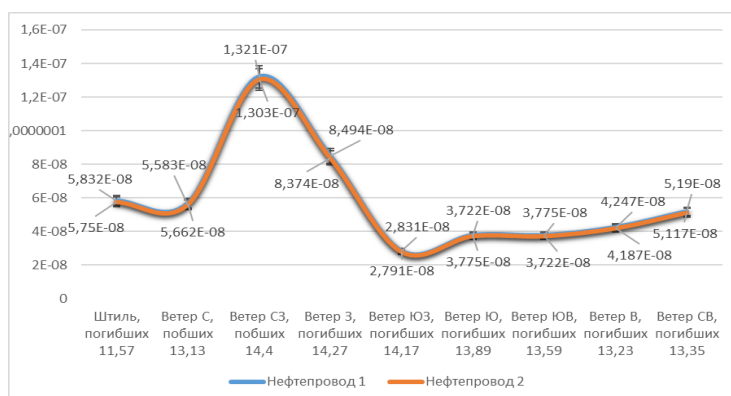


Рис. 5. Сравнение сценария разгерметизации нефтепроводов с площадью дефектного отверстия $0,0448 \times S_0$ (трещина)

На представленном графике сравниваются два варианта нефтепровода (обозначенные «Нефтепровод 1» и «Нефтепровод 2») в условиях сценария разгерметизации с площадью дефектного отверстия $0,0448 \times S_0$, который описывается как «трещина» (то есть более крупный дефект по сравнению со «свищем»). По горизонтальной оси отложены различные сценарии, учитывающие разные направления ветра (например, «Штиль», «Ветер С», «Ветер СЗ» и т. д.) и количество потенциально погибших (например, «погибших 11,57»). По вертикальной оси показана частота (вероятность) возникновения пожароопасной ситуации в год⁻¹. Ниже — более подробное описание особенностей этого графика и причин, по которым на Нефтепроводе 2 наблюдается лишь незначительное уменьшение риска (около 2%): площадь дефектного отверстия $0,0448 \times S_0$ значительно больше, чем при «свищах» ($0,0072 \times S_0$). Подобный свищ может приводить к более существенной утечке нефти, что повышает вероятность быстрого распространения горючих паров и возникновению крупного пожара. Нефтепровод 1 (стандартный) не имеет дополнительной электрофизической защиты, подвержен коррозии и другим факторам, которые со временем повышают вероятность возникновения дефектов. Нефтепровод 2 (с электрофизической защитой) предусматривает снижение коррозии благодаря переменному потенциалу, что сокращает вероятность образования дефектов.

В случае «свища» (небольшого отверстия) электрофизическая защита более эффективно снижает риск (на 30% и более), так как такие мелкие дефекты напрямую зависят от скорости коррозии.

При более крупном отверстии («трещина») в моменте аварии уже играет роль не только коррозия, но и внешние факторы (гидродинамическая нагрузка, возможные механические повреждения и т. п.). В результате общее преимущество электрофизической защиты оказывается менее выраженным — всего около 2%.

Горизонтальная ось: каждая точка соответствует сценарию с определённым направлением ветра и предполагаемым числом потенциальных жертв (например, «Ветер С, погибших 13,57»). Это позволяет увидеть, как конкретные условия (направление ветра, роза ветров, плотность застройки и т. д.) влияют на частоту пожароопасной ситуации. Вертикальная ось показывает, насколько часто (вероятность в год) может происходить событие с тяжёлыми последствиями (пожар, взрыв) при данной «трещине» на нефтепроводе.

Результаты показывают, что электрофизическая защита более эффективно снижает риск при небольших повреждениях (свищах), но при крупных дефектах эффект сокращения вероятности аварии значительно меньше. Это подчёркивает необходимость комплексных мер, включающих не только методы защиты от коррозии, но и мониторинг состояния трубопровода, применение надёжных систем обнаружения утечек, а также организационные мероприятия для минимизации последствий крупных разрывов.

Даже небольшое снижение (2%) в сценарии «трещина» может оказаться существенным при оценке социального или экономического ущерба на больших магистральных трубопроводах. В сочетании с другими мерами (мониторинг, своевременный ремонт, контроль качества металла) электрофизическая защита способна повысить общую надёжность нефтепровода.

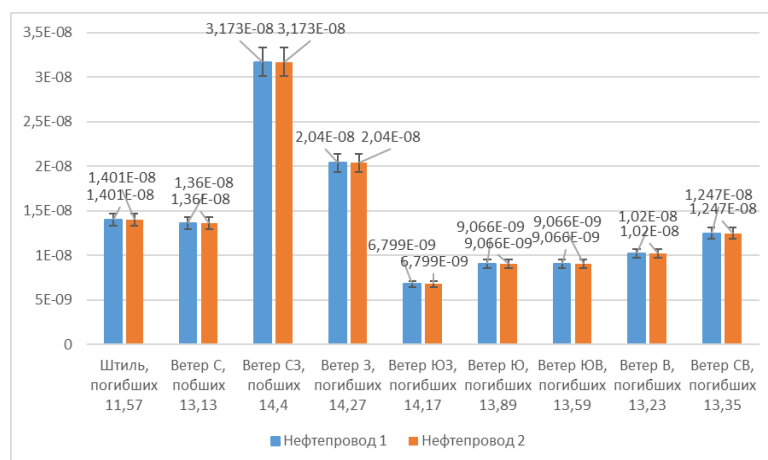


Рис.6. Сравнение сценария разгерметизации нефтепроводов с площадью дефектного отверстия 0,179xSo, («гильотинный» разрыв). Нефтепроводы имеют идентичные значения частоты возникновения числа пожароопасной ситуации (пожара)

Для обоих нефтепроводов показатели совпадают, что указывает на неэффективность мер защиты при гильотинном разрыве. Гильотинный разрыв приводит к масштабной утечке нефти, что делает локальные меры защиты (например, электрофизические методы) неэффективными. Скорость утечки превышает возможности систем аварийного отключения. Программное обеспечение PromRisk не учитывает экстремальные сценарии в полной мере, такие как одновременный разрыв нескольких секций. Упрощённые допущения о равномерном распределении нефти после разрыва. Оба нефтепровода имеют схожую конструкцию стенок (толщина, материал), что не позволяет снизить риск при катастрофических повреждениях. Требуется решение для локализации гильотинных разрывов. Например, установка клапанов-разделителей с автоматическим срабатыванием, использование самовосстанавливающихся

материалов, разработка планов эвакуации для зон с высокой плотностью населения, внедрение дронов для оперативной оценки масштабов аварии.

При гильотинном разрыве нефтепроводов стандартные меры защиты не обеспечивают снижение риска. Для таких сценариев критически важно: разрабатывать превентивные технологии (например, сегментирование трубопроводов), усиливать системы мониторинга для раннего обнаружения дефектов, проводить регулярные учения по ликвидации масштабных аварий.

Таким образом, на основании данной информации, можно сделать вывод о важности применения электрофизического способа защиты на нефтепроводах, применение которого способствует снижению риска гибели людей при возникновении аварийных ситуаций.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности использования ЭФМ в качестве эффективного средства защиты металлических конструкций от коррозии, а следовательно, увеличения пожарной безопасности технологических процессов и производств, связанных с нефтепереработкой и перевозкой нефти через магистральные нефтепроводы. Дальнейшее исследование влияния частоты переменного тока на скорость растворения металла может привести к усовершенствованию и оптимизации существующих методов ЭФМ, а также созданию новых эффективных технологий защиты металлов от коррозии.

Заключение

Проведённое исследование позволило комплексно оценить риски эксплуатации магистрального нефтепровода «Куйбышев-Тихорецк» и разработать меры по их снижению, сосредоточившись на анализе пожарной опасности, вызванной утечками нефти. Использование программного обеспечения PromRisk для моделирования сценариев аварийных ситуаций обеспечило методологическую достоверность и позволило визуализировать зоны риска с учётом рельефа местности, направлений ветра и плотности населения.

Эффективность электрофизического метода защиты. При небольших дефектах типа «свищ» (площадь $0,0072 \times S_0$) применение ЭФМ снижает частоту пожароопасных ситуаций на 33,88%. Это достигается за счёт формирования защитного слоя, препятствующего коррозии и микротрещинам. Для дефектов типа «трещина» ($0,0448 \times S_0$) эффективность ЭФМ снижается до 2%, что обусловлено преобладанием механических и гидродинамических факторов над коррозией. При гильотинных разрывах ($0,179 \times S_0$) ЭФМ не демонстрирует значимого эффекта, так как катастрофические повреждения требуют принципиально иных подходов к локализации утечек.

Превышение допустимых рисков. Социальный пожарный риск для модернизированного нефтепровода составил $1,547 \times 10^{-1}$ год⁻¹, что превышает установленный норматив 10^{-7} год⁻¹. Это подчёркивает необходимость дополнения ЭФМ другими мерами: установка клапанов-разделителей с автоматическим срабатыванием, внедрение систем мониторинга в реальном времени (датчики давления, дроны), разработка планов эвакуации для населённых пунктов в зоне риска.

Роль внешних факторов. Направление ветра и рельеф местности критически влияют на распространение нефти и токсичных паров. Например, при западном ветре число потенциальных жертв достигает 14,4 чел., что требует учёта розы ветров при проектировании защитных барьеров.

Для операторов нефтепроводов необходимо внедрить ЭФМ в сочетании с регулярным аудитом состояния трубопроводов, использовать барьерные технологии (например, сорбенты и боновые заграждения) вдоль уязвимых участков. Необходимо актуализировать нормативы с учётом современных угроз (дроны, кибератаки), ввести обязательные учения по ликвидации масштабных разливов нефти. Исследовать комбинированные методы защиты

(ЭФМ + полимерные покрытия), разработать модели, учитывающие взаимодействие нефтепроводов с другими объектами инфраструктуры.

В дальнейшем, необходимо провести анализ экономической эффективности внедрения ЭФМ с учётом затрат на обслуживание и потенциального ущерба от аварий, изучить применение искусственного интеллекта для прогнозирования дефектов на основе данных сенсоров разработать материалы с памятью формы для самовосстановления трубопроводов после механических повреждений.

Исследование подтвердило, что ЭФМ является перспективным инструментом для снижения рисков, связанных с коррозией, однако его эффективность ограничена в условиях катастрофических повреждений. Для достижения соответствия нормам безопасности и минимизации экологического ущерба необходим комплексный подход, объединяющий технологические инновации, усиленный мониторинг и адаптацию нормативной базы к современным вызовам [8-19].

Список источников

1. Пожарная безопасность организаций нефтегазового комплекса. Часть 3 / под ред. доктора технических наук, профессора С. В. Собуря. – М.: Пожнбига, – 2023. – 352 с.
2. Нолан Д. П. Справочник по принципам техники безопасности при пожарах и воздействиях: для обеспечения безопасности при работе с огнем, газом, химикатами и связанными с ними объектами. – М., – 2014. – 672 с.
3. Ченг Й. Фрэнк. Коррозионное растрескивание трубопроводов под напряжением. - 2013Международной научно-практической конференции. СПб.: ИПТ РАН. – Санкт-Петербург. – 2023. – С. 208-212.
4. Херати М., Арельяно А., Ван Вейк Л. Аварии, связанные с коррозией на нефтеперерабатывающих заводах // Безопасность в нефтегазовой отрасли. — 2013. — № 1(2). — С. 45–50. — EDN VYWRYO.
5. Мохамед Эльхельв, Адель Эль-Шобаки, Абдельхамид Аттия, Ваэль М. Эль-Маглани. Усовершенствованное динамическое моделирование пожара и задымления в резервуарах для хранения сырой нефти // Журнал пожарной безопасности. — 2020.
6. Захматов В.Д., Турсенев С.А., Онов В.А. Патент № 2777378 С2 Российская Федерация, МПК А62D 3/00, В09С 1/08, В09С 1/10. Способ локализации и ликвидации последствий розливов нефти и нефтепродуктов: № 2020121628: заявл. 25.06.2020: опубл. 02.08.2022 /– EDN TCFPEQ.
7. Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (с изменениями и дополнениями 500 // Гарант.ру: информационный интернет-портал. URL: <https://base.garant.ru/196118/>.
8. PromRisk 2.35.0 [Электронная программа]: программа для расчет индивидуального и социального пожарного риска на производственных объектах, Расчет пожарного риска, <https://pyrosim.ru/promrisk>.
9. Турсенев С.А., Сокольский А.А., Климентьев А.В. Способ локализации и ликвидации последствий розливов нефти и нефтепродуктов в сложных климатических условиях Арктического региона // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика - регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе: материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 октября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России. – 2022. – С. 152-154. – EDN QYYAHN.
10. Баженова Л.М., Егоров В.Ю. Комментарий к Федеральному закону от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" (под ред. Л.М. Баженовой) // Гарант.ру: информационный интернет-портал. URL: <https://base.garant.ru/77484824/>.
11. Иванов А.В., Ивахнюк Г.К., Гарифулин Р.Р. Применение метода сканирующей зондовой микроскопии для исследования процессов коррозии в условиях воздействия

переменного частотно-модулируемого потенциала. Природные и техногенные риски. – 2013, – Т2013 № 4 (8). – С. 65-72.

12. Гарифулин Р.Р., Марченко М.А., Приймак В.В. Экспериментальная оценка влияния переменного частотно-моделируемого потенциала на коррозионную устойчивость трубопроводных сталей. Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России». – 2022. – № 1. – С. 45–50. – EDN NTZGGK.

13. Тумановский А.А., Квашнин А.В., Смирнов А.С. Проблемы аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, способы их ликвидации и оценка их опасности при проведении экспертиз // Безопасность жизнедеятельности. – 2018. – № 1 (205). – С. 11-18. – EDN YLVGFX.

14. Актерский Ю.Е., Смирнов А.С. Повышение эффективности снижения рисков чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2022. – № 1. – С. 1-10. – EDN TDKZJK.

15. Кузьмина Т.А., Романов Н.Н., Смирнов А.С. О повышении уровня взрывопожаробезопасности технологических трубопроводов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2023. – № 4(68). – С. 23-31. – EDN AYXLGD.

16. Крымский В.В. Оценка ущерба специалистами в области техногенных и природных чрезвычайных ситуаций // Аудит и финансовый анализ. – 2016. – № 5. – С. 408-411. – EDN XIELCL.

17. Алехин М.Ю., Янченко А.Ю., Крымский В.В. О прогнозировании экономического ущерба от чрезвычайных ситуаций // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2012. – № 2. – С. 84-88. – EDN PGEXBP.

18. Крымский В.В., Панков А.Е. Система риск-контроллинга промышленного предприятия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2014. – № 2(192). – С. 114-122. – EDN SCHRRD.

19. Крымский В.В., Родичев А.А. Экономия времени обращения капитала за счет более раннего освоения средств на ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2009. – № 3(11). – С. 96-101. – EDN LBDCX.

References

1. Fire safety of oil and gas complex organizations. Part 3 / edited by Doctor of Technical Sciences, Professor S.V. Soburya. - Moscow: Pozhkniga, – 2023. – 352 p.
2. Nolan D. P. Handbook on the principles of fire and impact safety: for safety when working with fire, gas, chemicals and related objects. – M., – 2014. – 672 p.
3. Cheng Y. Frank. Corrosion cracking of pipelines under stress. – 2013 International scientific and practical conference. SPb.: IPT RAS. - St. Petersburg. – 2023. – Pp. 208-212.
4. Herati M., Arellano A., Van Wijk L. Accidents associated with corrosion at oil refineries // Safety in the oil and gas industry. – 2013. – № 1 (2). – Pp. 45-50. - EDN VYWRYO.
5. Mohamed Elhelw, Adel El-Shobaki, Abdelhamid Attia, Wael M. El-Maghlani. Advanced dynamic modeling of fire and smoke in crude oil storage tanks // Journal of Fire Safety. – 2020.
6. Zakhmatov V.D., Tursenev S.A., Onov V.A. Patent No. 2777378 C2 Russian Federation, MPK A62D 3/00, B09C 1/08, B09C 1/10. Method of localization and liquidation of consequences of oil and oil products spills: № 2020121628: avv. 25.06.2020: published 02.08.2022 / – EDN TCFPEQ.
7. Order of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation of July 10, 2009, No. 404 “On Approval of the Methodology for Determination of Estimated Fire Risk Values at Production Facilities” (as amended and supplemented 500 // Garant.ru: informational internet-portal. URL: <https://base.garant.ru/196118/>.
8. PromRisk 2.35.0 [Electronic program]: program for calculation of individual and social fire risk at production facilities, Calculation of fire risk, <https://pyrosim.ru/promrisk>.
9. Tursenev S.A., Sokolskiy A.A., Klimentyev A.V. Method of localization and liquidation of consequences of oil and oil products spills in difficult climatic conditions of the Arctic region // Security Service in Russia: experience, problems, prospects. Arctic - a region of strategic interests: legal policy and modern technologies to ensure safety in the Arctic region: materials of the

International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, October 27, 2022. - St. Petersburg: St. Petersburg University of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2022. – Pp. 152-154. – EDN QYYAHH.

10. Bazhenova L.M., Egorov V.Y. Commentary to the Federal Law of July 22, 2008 N 123-FZ “Technical Regulations on Fire Safety Requirements” (ed. L.M. Bazhenova) // Garant.ru: information Internet-portal. URL: <https://base.garant.ru/77484824/>.

11. Ivanov A.V.; Ivakhnyuk G.K.; Garifulin R.R. Application of the Scanning Probe Microscopy Method for Investigation of Corrosion Processes under the Influence of Variable Frequency-Modulated Potential. Natural and technogenic risks. – 2013, – T2013 № 4 (8). – Pp. 65-72.

12. Garifulin R.R., Marchenko M.A., Priymak V.V. Experimental assessment of the influence of variable frequency-modulated potential on corrosion resistance of pipeline steels. Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Emergency Situations Ministry of Emergency Situations of Russia”. – 2022. – № 1. – Pp. 45-50. – EDN NTZGGK.

13. Tumanovsky A.A.; Kvashnin A.V.; Smirnov A.S. Problems of emergency spills of oil and oil products, ways of their liquidation and assessment of their danger in the examination // Life Safety. – 2018. – № 1 (205). – Pp. 11-18. – EDN YLVGFX.

14. Aktersky Y.E., Smirnov A.S. Increasing the efficiency of emergency risk reduction at hazardous production facilities of oil and gas complex // Scientific and analytical journal “Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”. – 2022. – № 1. – Pp. 1-10. – EDN TDKZJK.

15. Kuzmina T.A., Romanov N.N., Smirnov A.S. On increasing the explosion and fire safety level of technological pipelines (in Russian) // Problems of Risk Management in Technosphere. – 2023. – № 4 (68). – Pp. 23-31. – EDN AYYLGD.

16. Krymskiy V.V. Estimation of damage by specialists in the field of technogenic and natural emergencies // Audit and financial analysis. – 2016. – № 5. – Pp. 408-411. - EDN XIELCL.

17. Alekhin M.Yu., Yanchenko A.Yu., Krymskiy V.V. On the forecasting of economic damage from emergency situations // Scientific and analytical journal “Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Fighting Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”. – 2012. – № 2. – Pp. 84-88. – EDN PGEXBP.

18. Krymskiy V.V., Pankov A.E. Risk-controlling system of an industrial enterprise (in Russian) // Scientific and Technical Bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences. – 2014. – № 2 (192). – Pp. 114-122. – EDN SCHRRD.

19. Krymskiy V.V., Rodichev A.A. Savings of capital circulation time due to the earlier development of funds for liquidation of emergency situations // Problems of risk management in technosphere. – 2009. – № 3 (11). – Pp. 96-101. – EDN LBDTCX.

Информация об авторах

В.В. Крымский – кандидат экономических наук, доцент

Г.К. Ивахнюк – доктор химических наук, профессор

Information about the author

V.V. Krymsky – Candidate of Economic Sciences, docent

G.K. Ivakhnyuk – Doctor of Chemical Sciences, Professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.03.2025, одобрена после рецензирования 17.06.2025, принята к публикации 20.06.2025.

The article was submitted 01.03.2025, approved after reviewing 17.06.2025, accepted for publication 20.06.2025.