

Научная статья

УДК 614:841; DOI: 10.61260/2304-0130-2025-4-63-69

ПОВЫШЕНИЕ ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ В АРКТИКЕ: ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ОРГАНИЗАЦИОННЫХ МЕР

✉Шалыгина Софья Сергеевна;

Булгакова Елена Викторовна.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

✉shalyginasofi@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы обеспечения надёжности и пожаровзрывобезопасности магистральных газопроводов в Арктической зоне Российской Федерации. Проанализированы риск-факторы: деградация многолетнемерзлых пород, экстремальные климатические воздействия и технологические особенности транспортировки газа. Предложен комплекс инженерно-технических и организационных мер, включающий адаптивные решения по мониторингу, проектированию и эксплуатации. Предложенные решения основаны на требованиях нормативных документов и подтверждают практическую значимость для развития топливно-энергетического комплекса в Арктике.

Ключевые слова: магистральный газопровод, Арктика, пожаровзрывобезопасность, эксплуатационная надёжность, чрезвычайные ситуации, риск-ориентированный подход, мониторинг

Для цитирования: Шалыгина С.С., Булгакова Е.В. Повышение пожаровзрывобезопасности линейной части магистральных газопроводов в Арктике: интегрированный комплекс инженерно-технических и организационных мер // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2025. № 4 (56). С. 63–69. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-4-63-69.

Scientific article

IMPROVING FIRE AND EXPLOSION SAFETY OF THE LINEAR PART OF THE MAIN GAS PIPELINES IN THE ARCTIC: INTEGRATED COMPLEX OF ENGINEERING, TECHNICAL AND ORGANIZATIONAL MEASURES

✉Shalygina Sofia S.;

Bulgakova Elena V.

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

✉shalyginasofi@yandex.ru

Abstract. The article discusses the issues of ensuring the reliability and fire and explosion safety of main gas pipelines in the Arctic zone of the Russian Federation. Risk factors are analyzed: the degradation of permafrost rocks, extreme climatic effects and technological features of gas transportation. A set of engineering, technical and organizational measures is proposed, including adaptive solutions for monitoring, design and operation. The proposed solutions are based on the requirements of regulatory documents and confirm their practical importance for the development of the fuel and energy complex in the Arctic.

Keywords: main gas pipeline, Arctic, fire and explosion safety, operational reliability, emergencies, risk-based approach, monitoring

For citation: Shalygina S.S., Bulgakova E.V. Improving fire and explosion safety of the linear part of the main gas pipelines in the arctic: integrated complex of engineering, technical and organizational measures // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2025. № 4 (56). P. 63–69. DOI: 10.61260/2307-7476-2025-4-63-69.

Введение

Освоение арктических месторождений природного газа является стратегическим направлением развития топливно-энергетического комплекса России. Однако эксплуатация магистральных газопроводов в арктических регионах сопряжена с комплексом вызовов, обусловленных криогенными геологическими процессами, значительными динамическими нагрузками и повышенной вероятностью возникновения аварийных ситуаций с тяжёлыми последствиями [1].

Линейная часть как наиболее протяжённый элемент трубопроводной системы подвержена специфическим рискам, связанным с нарушением целостности из-за неравномерных просадок, термокарстовых явлений и механических повреждений. В условиях интенсификации хозяйственного освоения Арктического региона, вопросы интеграции инженерно-технических решений и организационных мер в области гражданской обороны и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) приобретают критическое значение [2].

Результаты исследования и их обсуждение

На основании анализа данных, представленных в научных публикациях, и официальной отчётности ПАО «Газпром» 42 % аварий возникает из-за прямых или косвенных воздействий на линейную часть магистрального газопровода [3]. При этом 16 % проблем связаны с внешней общей коррозией, 12 % – с экзогенными процессами, 3 % возникают в результате изменения геокриологических условий, 1 % – другими естественными факторами.

Статистический анализ показывает, что на всех этапах технологического цикла использования углеводородов происходит их эмиссия в окружающую среду. Доминирующей причиной утечек газа служат дефекты технологического оборудования и трубопроводных систем [3], формирующиеся в результате коррозионных процессов при нарушении изоляционного покрытия и воздействии агрессивных окислительных сред.

В 2018 г. на 239-м километре первой нитки магистрального газопровода «Таас–Тумус–Якутск», находящегося в эксплуатации с 1967 г., была зафиксирована серьезная авария. Произошёл выброс природного газа с последующим воспламенением, результатом чего стало образование котлована размером 17 × 6 м и глубиной 2,5 м. Газопровод имел диаметр 530 мм при толщине стенки 8 мм [3].

Как показал визуально-измерительный контроль, разрушение конструкции произошло по нижней образующей трубе на сегменте, состоящем из трёх последовательно соединённых труб длиной 6 м каждая. Суммарная протяжённость раскрытия и трещины достигла 13430 мм. При осмотре места происхождения разрушения в котловане были идентифицированы элементы строительной арматуры.

Согласно данным фактографического анализа, иницирующими очагами разрушения выступили коррозионные язвы. Эти дефекты, выполняя роль острых концентраторов механических напряжений, способствовали зарождению множественных усталостных микротрещин. Последующий процесс коалесценции (слияния) микротрещин привёл к формированию трещины критических размеров. Под воздействием рабочего давления транспортируемого продукта данная трещина вызвала неконтролируемое распространение магистрального разрыва по основному металлу в направлении смежных труб.

Возникновение коррозионных повреждений связывают с механизмом гальванической коррозии, активизировавшимся вследствие непосредственного соседства или контакта металла трубы с элементами строительной арматуры.

На Мастахском газоконденсатном месторождении в ноябре 2005 г. была зафиксирована авария, связанная с разрушением коренной задвижки ЗМС 65х35 фонтанной арматуры. Отказ оборудования произошёл в процессе эксплуатации при следующих условиях: давление на устье составляло 10,5 МПа, температура окружающего воздуха – 34 °С, а общий срок службы задвижки достигал 25 лет.

Проведённый металлографический анализ показал, что поверхность излома полностью покрыта продуктами окисления, а на отдельных участках дополнительно присутствует слой нефтепродуктов. Данный факт указывает на стадийный характер разрушения. В зоне излома идентифицированы два смежных очага разрушения, зона ускоренного роста трещины и зона долома. Внутренний очаг разрушения образован множественными слившимися усталостными микротрещинами, имеющими характерную для малоциклового усталости форму «язычков».

Результаты исследований позволили установить механизм разрушения. Под воздействием рабочего давления в зоне стыковки внутренних цилиндров, где присутствует технологическое изменение толщины, создался концентратор напряжений. В этой области зародились множественные очаги малоциклового усталости. Дальнейшее развитие усталостных микротрещин привело к объединению двух соседних зон усталостного разрушения, образованию раскрытой трещины и последующему катастрофическому хрупкому разрушению детали по всему поперечному сечению [3].

Подобные случаи, когда материалы и конструкции не выдерживают комплексного воздействия эксплуатационных нагрузок и времени, наглядно демонстрируют системные вызовы, стоящие перед отраслью.

Приоритетным направлением в решении задач снижения аварийности на объектах газотранспортной инфраструктуры является модернизация систем мониторинга и управления техническим состоянием. Современные подходы к диагностике должны базироваться на принципах обеспечения надёжности и безопасности эксплуатации с учётом актуального состояния объектов.

Ключевые аспекты совершенствования включают: внедрение предиктивных моделей оценки технического состояния, разработку адаптивных систем диагностики коррозионных повреждений, создание интегрированных платформ управления эксплуатационными рисками.

Формирование эффективной системы безопасности магистральных газопроводов требует учёта взаимовлияния различных факторов: коррозионной агрессивности транспортируемой среды, деградации защитных покрытий в процессе эксплуатации, изменения механических свойств материалов под воздействием рабочих нагрузок, кумулятивного эффекта от совместного действия технологических и природных факторов.

Реализация новых трубопроводных систем в Арктике, Восточной Сибири и других перспективных регионах столкнулась с ограниченной применимостью традиционных сталей в экстремальных климатических условиях. Это актуализирует необходимость разработки принципиально новых научно-технических подходов для обеспечения долговременной надёжности.

Ключевыми эксплуатационными вызовами становятся:

- повышение рабочих давлений свыше 12.0 МПа;
- экстремально низкие температуры (ниже -60 °С);
- интенсивные ветровые и снеговые воздействия;
- постоянное влияние отрицательных температур водной среды и динамичной ледовой обстановки.

В качестве ответа на эти вызовы перспективным направлением является переход от стандартных решений к применению инновационных материалов. Помимо высокопрочных сталей классов K65 и K80, целесообразно внедрение композитных и аддитивных технологий [4]. К ним относятся биметаллические и триметаллические конструкции, наноструктурированные сплавы, а также гибридные композиции металлов

и полимеров. Использование 3D-печати для создания готовых элементов с повышенной коррозионной стойкостью и прочностью открывает новые возможности для строительства как магистральных, так и распределительных газовых сетей.

Интегрированный комплекс инженерно-технических и организационных мер представляет собой системный подход к повышению устойчивости и пожаробезопасности линейной части магистральных газопроводов в Арктике. Он включает современные технологии мониторинга, конструктивные решения и организационные мероприятия, направленные на предупреждение аварий и минимизацию рисков, связанных с суровыми климатическими условиями и деградацией вечномёрзлых грунтов [4]. Такой комплекс обеспечивает надёжность эксплуатации трубопроводов с учётом специфики арктического региона и преобладающих факторов воздействия.

Внедрение волоконно-оптических систем мониторинга представляет собой современный подход к обеспечению промышленной безопасности объектов трубопроводного транспорта. Особую актуальность данная технология приобретает при эксплуатации газопроводов в сложных инженерно-геологических условиях, где традиционные методы контроля демонстрируют ограниченную эффективность.

Основу системы составляют волоконно-оптические сенсоры, которые крепятся непосредственно на трубу и позволяют осуществлять непрерывный мониторинг деформаций на протяжённых участках до 50 км. Это принципиальное отличие от точечных методов контроля, таких как интеллектуальные вставки, которые обеспечивают мониторинг только на сегментах магистрали длиной несколько десятков метров. Технология обеспечивает постоянный контроль технического состояния трубопровода без необходимости регулярных выездов на трассу, что особенно важно для труднодоступных регионов.

Практическая реализация метода была успешно осуществлена специалистами АО «Гипрогазцентр» на магистральном газопроводе «Сахалин–Хабаровск–Владивосток», общая протяжённость составляет 1 800 км. Применение волоконно-оптической системы мониторинга позволило не только повысить уровень безопасности объекта, но и оптимизировать трассу прокладки газопровода.

Важным преимуществом технологии является возможность её установки как на строящиеся, так и на действующие газопроводы. Система работает по принципу непрерывного считывания информации о состоянии трубы с последующей расшифровкой данных и передачей на пульт оператора. Это позволяет выявлять такие опасные явления, как непроектные радиусы изгиба трубопровода, на ранней стадии их развития и своевременно принимать меры по предотвращению аварийных ситуаций.

В настоящее время ведётся активная работа по дальнейшему развитию метода, включающая разработку методических рекомендаций и стандартов применения подобных систем. Накопленный опыт позволяет рассматривать волоконно-оптический мониторинг как перспективное направление для обеспечения пожаровзрывобезопасности магистральных газопроводов, особенно в регионах со сложными природно-климатическими условиями.

Применение технологии радиолокационной интерферометрии (InSAR) [5] обеспечивает комплексное повышение безопасности и эффективности эксплуатации магистральных газопроводов в Арктическом регионе. Внедрение данного метода способствует значительному снижению рисков аварийных ситуаций за счет раннего обнаружения опасных геодинамических процессов. Технология обеспечивает повышение достоверности прогнозирования развития таких явлений, как термокарст, солифлюкция и эрозия мерзлых грунтов.

Получаемые в результате мониторинга данные служат качественной основой для оптимизации проектных решений на стадии разработки и эксплуатации трубопроводных систем. Интеграция результатов InSAR-мониторинга с геотехническими моделями позволяет осуществлять обоснованное планирование превентивных мероприятий и рациональное распределение ресурсов на обслуживание трасс [5]. Таким образом, использование перспективной технологии способствует переходу от реагирующего обслуживания к предиктивной модели управления рисками, что в конечном итоге повышает

Мероприятия гражданской обороны при эксплуатации магистральных газопроводов в Арктике должны быть ориентированы на комплексную защиту персонала и территорий в условиях особых рисков. В соответствии с требованиями Федерального закона Российской Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и Федерального закона Российской Федерации от 21 дек. 1994 г. [6] № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера» [7], для магистральных газопроводов в Арктике разрабатывается комплекс организационных мер.

В целях минимизации количественных показателей потенциального ущерба от ЧС при проектировании и строительстве объектов магистральных трубопроводов, в соответствии с п. 14 приказа Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2020 г. № 532 «Об утверждении Правил безопасности магистральных трубопроводов» [8], объекты линейной части и площадочные сооружения опасных производственных магистральных трубопроводов (ОПО МТ) следует размещать на безопасных расстояниях до других промышленных и сельскохозяйственных объектов, отдельных зданий и сооружений, жилых, общественно-деловых зон и зон рекреационного назначения, установленных в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации.

Объекты линейной части и площадочные сооружения ОПО МТ следует размещать с учётом опасности распространения транспортируемых жидких опасных веществ и токсичного облака, образующегося при возможных авариях, по рельефу местности и преобладающего направления ветра (по годовой розе ветров) относительно рядом расположенных населённых пунктов, объектов и мест массового скопления людей, результатов анализа опасностей технологических процессов и анализа риска аварий, проведённых в соответствии с главой XI настоящих Правил.

Заключение

Представленные решения создают основу для формирования новой парадигмы безопасности трубопроводов России, основанной на принципах предиктивного управления и цифровизации. В качестве ключевых направлений дальнейшего развития следует выделить:

1. Создание интегрированных систем поддержки принятия решений, объединяющих данные мониторинга, прогнозные модели и сценарное планирование;
2. Разработку адаптивных нормативных требований, учитывающих специфику климатических изменений и геоэкологических условий;
3. Внедрение технологий цифровых двойников для моделирования поведения трубопроводных систем в экстремальных условиях.

Реализация указанных мер позволит не только существенно повысить уровень промышленной безопасности, но и минимизировать операционные расходы при сохранении высочайших стандартов экологической защиты в арктическом регионе. Достижение синергетического эффекта от сочетания инженерно-технических и организационных решений открывает новые возможности для устойчивого развития газотранспортной инфраструктуры в условиях Арктики.

Список источников

1. Алексеев А.А., Иванов А.Р. Разрушение трубопроводов в условиях Арктики // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. № 1. С. 54–57.
2. Железняк М.Н., Шац М.М. Геоэкологические и геотехнические условия магистрального газопровода «Сила Сибири» на современном этапе завершения строительства // Газовая промышленность. 2018. № 8 (772). С. 86–91.

3. Большаков А.М., Сыромятникова А.С. Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2015. № 4 (80). С. 94–99.

4. Русакова В.В., Лобанова Т.П. Перспективы применения высокопрочных труб категории прочности K65 (X80) для проектов дальнего транспорта газа // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. № 1 (36). С. 4–7.

5. Ботиров Ш.С., Номдоров Р.У. Применение технологии InSAR для геомеханического мониторинга деформаций земной поверхности, вызванных горными работами, на Хандизинском полиметаллическом месторождении // Universum: технические науки. 2025. № 8 (137). С. 50–52.

6. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федер. закон Рос. Федерации от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ. Доступ из информ.-правовой системы «Гарант».

7. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: Федер. закон Рос. от 21 дек. 1994 г. № 68-ФЗ. Доступ из информ.-правовой системы «Гарант».

8. Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов: приказ Ростехнадзора от 11 дек. 2020 г. № 517. Доступ из информ.-правовой системы «Гарант».

References

1. Alekseev A.A., Ivanov A.R. Razrushenie truboprovodov v usloviyah Arktiki // Celostnost' i resursy v ekstremal'nykh usloviyah. 2024. № 1. S. 54–57.

2. ZHeleznyak M.N., SHac M.M. Geokriologicheskie i geotekhnicheskie usloviya magistral'nogo gazoprovoda «Sila Sibiri» na sovremennom etape zaversheniya stroitel'stva // Gazovaya promyshlennost'. 2018. № 8 (772). S. 86–91.

3. Bol'shakov A.M., Syromyatnikova A.S. Razrusheniya i povrezhdeniya ob"ektov magistral'nogo gazoprovoda pri dlitel'noy ekspluatatsii v usloviyah Arktiki // Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики. 2015. № 4 (80). S. 94–99.

4. Rusakova V.V., Lobanova T.P. Perspektivy primeneniya vysokoprochnykh trub kategorii prochnosti K65 (H80) dlya proektov dal'nego transporta gaza // Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti. 2009. № 1 (36). S. 4–7.

5. Botirov SH.S., Nomdorov R.U. Primenenie tekhnologii InSAR dlya geomekhanicheskogo monitoringa deformatsiy zemnoy poverhnosti, vyzvannykh gornymi rabotami, na Handizinskom polimetallicheskom mestorozhdenii // Universum: tekhnicheskie nauki. 2025. № 8 (137). S. 50–52.

6. O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov: Feder. zakon Ros. Federatsii ot 21 iyulya 1997 g. № 116-FZ. Dostup iz inform.-pravovoy sistemy «Garant».

7. O zashchite naseleniya i territorij ot chrezvychajnykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo haraktera: Feder. zakon Ros. ot 21 dek. 1994 g. № 68-FZ. Dostup iz inform.-pravovoy sistemy «Garant».

8. Ob utverzhdenii federal'nykh norm i pravil v oblasti promyshlennoy bezopasnosti Pravila bezopasnosti dlya opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov magistral'nykh truboprovodov: prikaz Rostekhnadzora ot 11 dek. 2020 g. № 517. Dostup iz inform.-pravovoy sistemy «Garant».

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 15.09.2025; одобрена после рецензирования: 10.12.2025;
принята к публикации: 19.12.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 15.09.2025; approved after review: 10.12.2025;
accepted for publication: 19.12.2025

Сведения об авторах:

Шалыгина София Сергеевна, магистрант кафедры техносферной безопасности Тюменского индустриального университета (625001, Тюмень, ул. Луначарского, д. 2), ведущий специалист по промышленной безопасности, e-mail: shalyginasofi@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4699-8214>, SPIN-код: 2286-6229

Булгакова Елена Викторовна, доцент кафедры кафедры техносферной безопасности Тюменского индустриального университета (625001, Тюмень, ул. Луначарского, д. 2), кандидат биологических наук, e-mail: bulgakovaev@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6993-9554>, SPIN-код: 5050-4309

Information about the authors:

Shalygina Sofia S., master's student at the department of technosphere security Tyumen industrial university (2 Lunacharsky st., Tyumen, 625001), leading specialist in industrial safety, e-mail: shalyginasofi@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4699-8214>, SPIN: 2286-6229

Bulgakova Elena V., associate professor of the department of technosphere security Tyumen industrial university (2 Lunacharsky st., Tyumen, 625001), candidate of biological sciences, e-mail: bulgakovaev@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6993-9554>, SPIN: 5050-4309