

Использование байесовских сетей для выработки рекомендаций при отказах северного магистрального газопровода Мастах – Берге – Якутск

Т. А. КАПИТОНОВА, Г. П. СТРУЧКОВА*, О. И. СЛЕПЦОВ

ФИЦ “Якутский научный центр СО РАН” Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, Россия

*Контактный автор: Стручкова Галина Прокопьевна, e-mail:pandoramy@list.ru

Поступила 16 мая 2023 г., доработана 19 июня 2023 г., принята в печать 26 июня 2023 г.

Предложена модель вероятностного анализа аварий и выработки рекомендаций при отказах магистрального газопровода Мастах – Берге – Якутск с использованием сети Байеса и базы данных, полученной на основе многолетних наблюдений. Выбор байесовских сетей доверия (БСД) связан с тем, что входные факторы задачи, механизм взаимодействия которых носит случайный характер, представляют собой разнородные и неполные данные. Кроме того, модели на основе БСД могут самосовершенствоваться по мере накопления информации. Предложенная БСД позволяет определить основные факторы, приводящие к отказам и авариям, а также разработать возможные рекомендации по ремонту и своевременному реагированию на аварийные инциденты, позволяющие сократить время простоя и минимизировать причиненный ущерб, одновременно повышая уровень безопасности эксплуатации трубопроводного транспорта Севера.

Ключевые слова: магистральные газопроводы, байесовские сети, многолетняя мерзлота, ациклический граф, мониторинг, аварийные ситуации, отказы, рекомендации по ремонту.

Цитирование: Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Слепцов О.И. Использование байесовских сетей для выработки рекомендаций при отказах северного магистрального газопровода Мастах – Берге – Якутск. Вычислительные технологии. 2023; 28(4):35–44. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.004.

Введение

Трубопроводные системы, проложенные в северных регионах Российской Федерации, из-за влияния сложных географо-климатических условий, таких как значительный перепад температуры воздуха от +36 до –58 °С, наличие многолетней мерзлоты, подводных переходов, большой перепад высот, пересечение водных преград (малых и больших озер, болотистой местности, речных переходов), подвержены значительному напряжению стенок, что ведет к снижению их надежности и работоспособности.

Так, показатель надежности эксплуатации нефте- и газопроводов, проложенных по территории севера страны, в 2–3.5 раз ниже по сравнению со средней полосой России, а затраты на их восстановление — выше в 5–8 раз [1].

Для бесперебойного функционирования исследуемых магистральных газопроводов (МГ) необходимы разработка методов оценки риска, как качественного, так и количественного, и определение материального ущерба, нанесенного народному хозяйству, водным ресурсам, окружающей среде. При решении подобных задач предлагаются различные методы, основные из которых — феноменологический, вероятностный и детерминистский [2–7].

Аналізу данных и классификации причин аварий и отказов при эксплуатации магистрального газопровода Средневилюйское газоконденсатное месторождение — Мастах — Берге — Якутск посвящен ряд работ [5–7], в настоящем исследовании делается попытка построения модели вероятностного анализа аварий магистрального газопровода, проложенного в многолетнемерзлых грунтах, на основе байесовской сети с использованием анализа многолетних данных мониторинга инцидентов на МГ.

Оперативное решение задач реагирования на возникновение непредвиденных ситуаций напрямую влияет на последующее развитие событий. Разрозненная информация об аварийных происшествиях нуждается в адекватной подготовке к своевременному решению проблемы и сокращению времени восстановления последствий аварий.

Целью данной работы является построение модели анализа отказов и выработки рекомендаций по выполнению ремонтных работ на объектах магистрального газопровода, проложенного в многолетнемерзлых грунтах, на основе байесовской сети с использованием анализа многолетних данных мониторинга инцидентов на МГ.

Предложенная модель содержит данные об особенностях аварий и рекомендации по устранению новой аварии, которые определяются исходя из прошедших аналогичных случаев.

Для построения, обучения и использования байесовских сетей доверия (БСД) решались следующие задачи:

- анализ и оценка многофакторных причин, влияющих на отказы и аварии магистральных трубопроводов, проложенных в криолитозоне;
- построение байесовской сети доверия;
- обучение байесовской сети;
- анализ отказов, моделирование ситуаций и выработка рекомендаций по выполнению ремонтных работ на объектах магистрального газопровода, проложенного в многолетнемерзлых грунтах с использованием байесовской сети.

Исследование, основанное на имеющейся базе данных об аварийных ситуациях и мониторинге прошедших инцидентов, направлено на дальнейшее развитие вероятностного анализа байесовских сетей.

1. Методы и материалы

По сравнению с традиционными методами оценки риска использование БСД является надежным инструментом причинно-следственного анализа. Метод доказал свою эффективность при сборе и интеграции качественной и количественной информации по различным источникам. Более того, БСД облегчает моделирование непрерывных переменных или переменных с несколькими состояниями и может выполнять количественный анализ двумя способами с помощью прогнозного и диагностического методов, используя хорошее представление условных зависимостей между узлами. В настоящее время БСД активно развиваются и применяются российскими и зарубежными учеными [8–18].

Представленные здесь расчеты проведены согласно алгоритму, описанному в [8].

По мере накопления экспериментальной информации изменения значений входных узлов модели БСД самосовершенствуются и самообучаются, этим объясняется их нечувствительность к неполным, а иногда и ошибочным данным. Важные преимущества БСД — возможность интеграции разнородных данных и моделирование общих причинно-следственных зависимостей между параметрами поставленной задачи [2–5].

В последнее время активизировались исследования с использованием БСД по оценке рисков на нефте- и газопроводах, вызванных многофакторностью причин отказов и аварий, а также по прогнозированию возникновения аварийных состояний МГ [12–18].

Для дифференцированного определения причин и подпричин аварий и разработки ремонтных мероприятий по устранению отказов на объектах МГ необходимо установить конструктивно-технологические, природные, антропогенные, эксплуатационные факторы, влияющие на причины разгерметизации МГ.

Новизна исследования заключается в применении в БСД наиболее значимых факторов, являющихся источниками различных инцидентов на магистральных трубопроводах, которыми можно воспользоваться для разработки рекомендаций по мероприятиям аварийного ремонта для снижения риска отказов и аварий, минимизации ущерба и повышения безопасности эксплуатации трубопроводов Севера.

Байесовскую сеть доверия можно определить как графовую вероятностную модель, направленный ациклический граф, который состоит из узлов и ребер, представляющих факторы влияния и причинно-следственные связи. Для инцидента, происходящего на трубопроводе, он содержит вероятности появления нескольких факторов (узлов) и условные вероятности взаимосвязанных факторов, которые находятся в таблице вероятностей.

Модель БСД для анализа отказов и выработки рекомендаций по выполнению ремонтных работ на МГ, проложенного в многолетнемерзлых грунтах, построена с использованием литературно-справочной информации, мнения экспертов и архивной базы данных мониторинга газопровода Мастах – Берге – Якутск за 2000–2018 гг.

2. Результаты

Построение байесовской сети и расчеты проводились в программной среде NETICA. Вероятности типов отказов и аварий и их последствий на газопроводной сети рассчитывались путем внесения в программное обеспечение начальной настройки байесовских узлов и соответствующих условных вероятностей. В качестве факторов, влияющих на причины отказов, после анализа значимости выбраны давление на момент отказа, диаметр труб, геокриологические условия и возраст объекта газопроводной системы.

Типы отказов, которые могут произойти в газопроводах, распределены по следующим четырем категориям (номинальный тип).

1. Повреждение металла: неисправность, вызванная либо дефектом материала (например, металлургический дефект и несоответствующая спецификация материалов), либо дефектом конструкции (например, дефектный сварной шов), выход из строя уплотнительных устройств (прокладка, уплотнение насоса и т. д.).
2. Ошибка персонала: отказ, вызванный эксплуатационными сбоями или ошибками оператора.
3. Природная: авария в результате активизации геокриологических процессов, наводнение, лесной пожар и др.
4. Другое: коррозия, механическое повреждение в результате земляных работ и т. д.

Факторы, связанные с инцидентами на трубопроводах, и причины, их вызывающие
Factors related to pipeline incidents

Фактор	Категория
Сезон	1 — зима, 2 — весна, 3 — лето, 4 — осень
Возраст	8 — (1–5), 7 — (6–10), 6 — (11–15), 5 — (16–20), 4 — (21–25), 3 — (26–30), 2 — (31–35), 1 — (35–40)
Объект системы	1 — МГ, 2 — отвод, 3 — задвижки, 4 — ГРС, 5 — крановый узел
Часть трубы	1 — основной металл, 2 — сварной шов, 3 — другое
Дополнительный фактор	1 — трещина, 2 — свищ, 3 — разрыв, 4 — деформация, 5 — другое
Геоусловия	1 — ровная, сухая местность, 2 — низина, влажность, 3 — болото/озеро, 4 — пересеченная, 5 — лес/луг
Грунт	1 — супесь, 2 — песок, 3 — глина, 4 — суглинок, 5 — каменистый
Толщина, мм	1 — 4, 2 — 6, 3 — 7, 4 — 8, 5 — 9
Диаметр, мм	1 — 529, 2 — 273, 3 — 108, 4 — 325, 5 — 219, 6 — 720
Давление на момент инцидента	1 — (0–0.27), 2 — (0.28–0.54), 3 — (0.55–0.71), 4 — (0.72–1.08)
Марка стали	1 — 09Г2С, 2 — 14ХГС, 13Г1СУ, 3 — Ст10, 4 — импортная, 5 — 30ХГ
Причина	1 — поражение металла, 2 — ошибка персонала, 3 — природная, 4 — другое (коррозия, механическое воздействие и др.)

В таблице представлены атрибуты после предварительной обработки, которые связаны с инцидентами на трубопроводах.

С применением дисперсионного анализа исследовалось взаимодействие этих факторов с параметрами отказа трубопровода. Статистическая пошаговая процедура отбора использовалась для выбора оптимального числа независимых переменных, которые наиболее значимым образом соответствуют причине отказа по сравнению с другими имеющимися факторами. Для отбора применялся статистический пакет MINITAB. Данные в группах факторов представлены в порядковом типе (возраст, давление, диаметр, толщина) и номинальном типе (объект системы, часть трубопровода, геокриологические условия, грунты, дополнительные факторы и марка стали). Данные такого типа не могут быть распределены нормально. Поэтому для определения наиболее значимых факторов использовались непараметрическая статистика и Principal Component Analysis (анализ главных компонент), которые не требуют предположений о нормальности и равной дисперсии. В результате совместного анализа этими методами выявлены наиболее значимые факторы: давление на момент инцидента, дополнительный фактор — геокриологические условия на трассе, возраст (срок эксплуатации), часть трубы, диаметр, объект, поскольку их полученные значения вероятности были меньше 0.05. Исходя из этого можно сделать вывод, что они являются основными факторами, влияющими на частоту отказов трубопроводов. С учетом ограничений бесплатной версии NETICA количество входных факторов сократилось до 5.

На рис. 1 представлена БСД, по которой определялись возможные сценарии развития событий при отказах и авариях трубопроводного транспорта природного газа.

Основными предикторами разработанной модели являются категориальные переменные, которые необходимо преобразовать в количественные значения и нормировать, чтобы можно было использовать как входные и выходные данные байесовской сети.

Поскольку входные и выходные данные модели — категориальные, используется “горячее” кодирование для преобразования их в числовые значения. При однократном

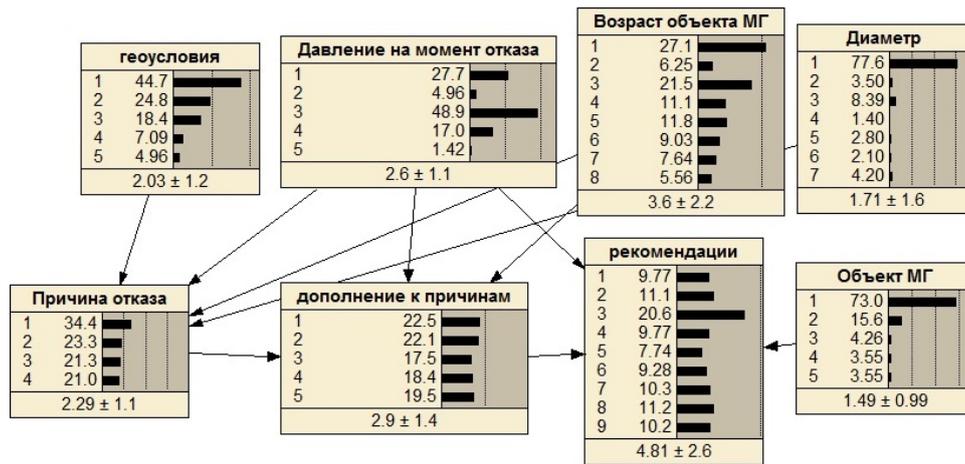


Рис. 1. Байесовская сеть отказов и аварий магистрального газопровода
 Fig. 1. Bayesian network of pipeline failures and accidents

кодировании каждое уникальное значение категориальных переменных преобразуется в новую переменную со значениями 1 и 0, обозначающими наличие и отсутствие этой новой переменной.

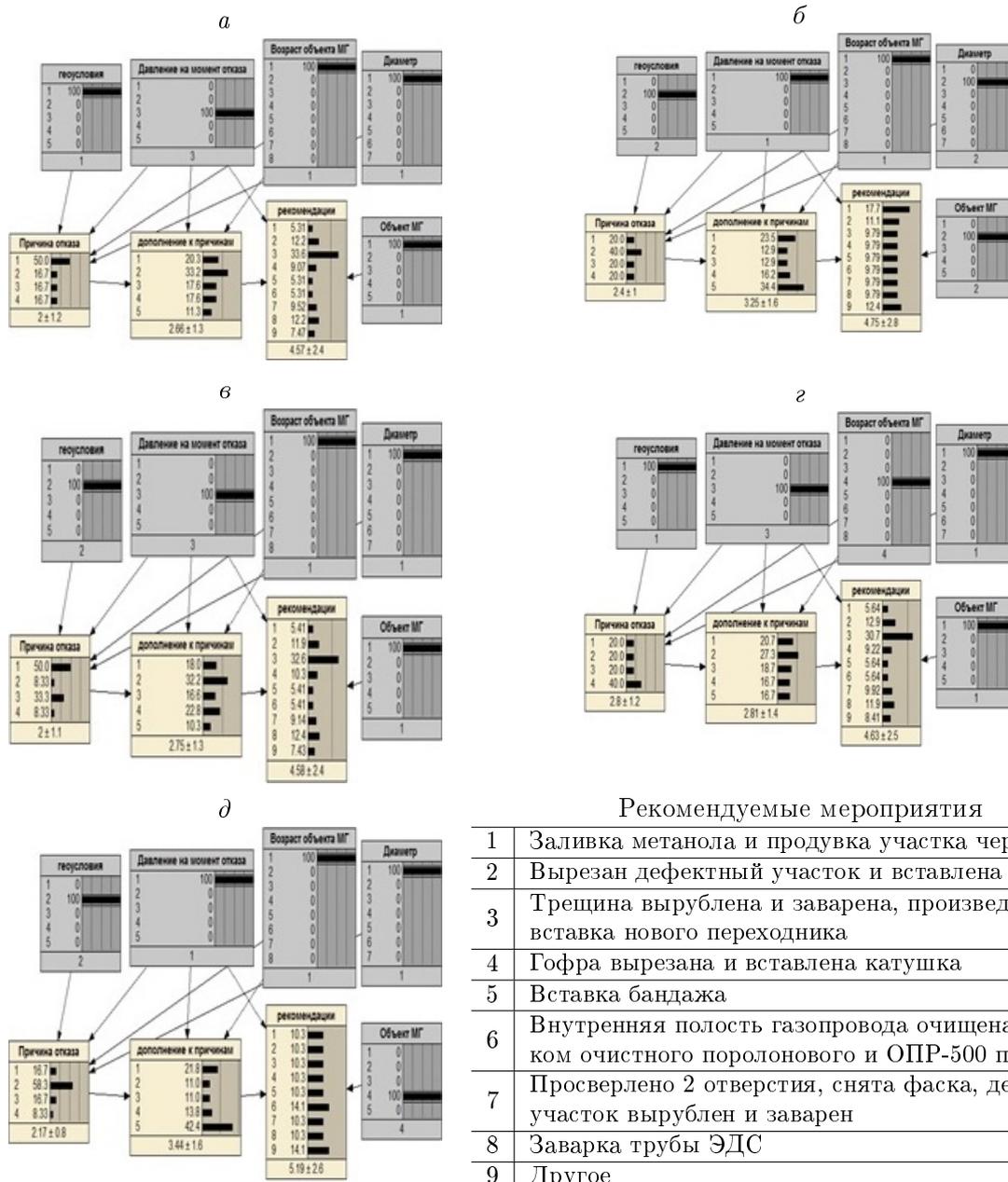
3. Аварии на газопроводах с аварийным реагированием

Эффективное реагирование во время отказа или аварии имеет большое значение для минимизации потерь. Подробное описание аварийного реагирования приведено ниже.

Поскольку принятие решений в таких случаях неизбежно связано с вероятностными оценками и множеством неопределенностей, все байесовские сети доверия чрезвычайно полезны для моделирования ситуаций и прогнозирования ожидаемых результатов. Рассмотрим несколько простых примеров с возможными ситуациями и развитием сценария отказов газопровода с использованием NETICA.

На рис. 2 представлены изображения выходных оценочных результатов, выполненных в программе NETICA для БСД с аварийным реагированием. Вероятности указаны в процентах, рабочее давление газопровода 56 кгс/см^2 .

- Первый сценарий (рис. 2, а) аварии устанавливается на определенный момент начальной утечки в трубе. Центр управления газопровода во время мониторинга обнаружил, что давление снизилось и находится в интервале (0.55–0.71) от рабочего давления, это подтвердилось технологическими службами, причина — утечка в трубопроводе; определено примерное местоположение, возраст участка 35–40 лет, геокриологические условия — скорее “ровное, сухое”.
Рекомендации по выполнению задач сценария: БСД показывает наиболее вероятную причину в указанных условиях как “повреждение металла трубопровода” (50 %), “дополнительные факторы”: наиболее вероятная причина — свищ (33.2 %), следующая возможная причина — трещина (20.3 %). Рекомендуемые мероприятия из девяти доступных — “трещина вырублена и заварена, произведена вставка нового переходника” (33.6 %) и “заварка трубы ЭДС” (12.2 %).
- Давление снизилось и находится в интервале (0–0.27) от рабочего (рис. 2, б). После подтверждения отсутствия эксплуатационных проблем в качестве причины определено образование конденсатной пробки в трубопроводе. Примерное местоположение — возраст участка в интервале 35–40 лет, геокриологические условия — скорее “низина с повышенной влажностью”.



Рекомендуемые мероприятия

1	Заливка метанола и продувка участка через свечу
2	Вырезан дефектный участок и вставлена катушка
3	Трещина вырублена и заварена, произведена вставка нового переходника
4	Гофра вырезана и вставлена катушка
5	Вставка бандажа
6	Внутренняя полость газопровода очищена пропуском очистного порошкового и ОПР-500 поршней
7	Просверлено 2 отверстия, снята фаска, дефектный участок вырублен и заварен
8	Заварка трубы ЭДС
9	Другое

Рис. 2. Байесовская сеть отказов и аварий магистрального газопровода
 Fig. 2. Bayesian network of main gas pipeline failures and accidents

Рекомендации по выполнению задач сценария: наиболее вероятная причина в данных условиях “ошибка персонала”, (40 %) — некачественное осушение газа. “Дополнительные факторы”: наиболее вероятная причина — другое (34.4 %), следующая возможная причина — трещина (23.5 %). Рекомендуемые мероприятия из девяти доступных — “заливка метанола и продувка участка через свечу” (17.7 %) и “другое” (12.4 %).

- Давление снизилось и находится в интервале (0.55–0.71) от рабочего (рис. 2, в). Примерное местоположение — возраст участка в интервале 35–40 лет, геокриологические условия — скорее “ровное, сухое”.

Рекомендации по выполнению задач сценария: наиболее вероятная причина в данных условиях “повреждение металла трубопровода” (50 %) и “природная” (33.3 %);

диаметр трубопровода 529 мм, “дополнительные факторы”: наиболее вероятная причина — свищ (50 %), следующая возможная причина — деформация (22.8 %). Рекомендуемые мероприятия из девяти доступных — “трещина вырублена и заварена, произведена вставка нового переходника” (32.6 %) и “заварка трубы ЭДС” (12.4 %).

- Давление снизилось и находится в интервале (0.55–0.71) от рабочего (рис. 2, з). Примерное местоположение — возраст участка в интервале 21–25 лет, геокриологические условия — скорее “низина с повышенной влажностью”.

Рекомендации по выполнению задач сценария: наиболее вероятная причина в данных условиях — другое (коррозия, механическое воздействие и др.) (40 %), диаметр трубопровода 529 мм, “дополнительные факторы”: наиболее вероятная причина — свищ (27.3 %), следующая возможная причина — трещина (20.7 %). Рекомендуемые мероприятия из девяти доступных — “трещина вырублена и заварена, произведена вставка нового переходника” (30.7 %) и “заварка трубы ЭДС” (11.9 %).

- Давление снизилось и находится в интервале (0–0.27) от рабочего (рис. 2, д). Примерное местоположение — возраст участка в интервале 35–40 лет, геокриологические условия — скорее “низина с повышенной влажностью”.

Рекомендации по выполнению задач сценария: наиболее вероятная причина — “ошибка персонала” (58.3 %) — некачественное осушение газа, “дополнительные факторы”: наиболее вероятная причина — “другое” (42.4 %), следующая возможная причина — трещина (21.8 %). Рекомендуемые мероприятия из девяти доступных — “внутренняя полость газопровода очищена пропуском очистного порошкового и ОПР-500 поршней” (14.1 %) и “другое” (14.1 %).

Выводы

Исследования, проведенные на магистральном газопроводе — Местах–Берге–Якутск за период эксплуатации с 2000 по 2018 г., связанные с разрушением металла труб, выявили следующее:

- Расчет значений риска из-за большого количества неопределенностей в имеющейся базе данных затруднителен. Сочетание качественных экспертных и количественных статистических методов на основе байесовских сетей доверия наиболее эффективно, а с точки зрения оценки риска дает вполне удовлетворительные результаты.
- Для более эффективной работы необходим гибридный подход с использованием мониторинга, БСД, экспертных мнений и рекомендаций, а также применение ГИС.
- В этом исследовании предлагается структура байесовской сети с узлами и взаимосвязями, полученными из отчетов о фактическом обнаружении и устранении отказов на магистральном газопроводе Местах–Берге–Якутск для создания модели рекомендаций по выполнению ремонтных работ на объектах магистрального газопровода. Модель рекомендаций позволяет обеспечить дополнительную информационную поддержку для принятия решений при разработке системы экстренного реагирования. В перспективе предусмотрено совместное использование моделей БСД и ГИС-технологий, базы геоданных магистрального газопровода, что позволит повысить эффективность прогноза причин отказов на МГ и оперативное предоставление возможных мер по устранению их последствий.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 122011100157-5, научная тема FWRS-2021-0003).

Список литературы

- [1] **Махутов Н.А., Пермяков В.Н.** Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов. Новосибирск: Наука; 2005: 516.
- [2] **Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П.** Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука; 2003: 174.
- [3] **Ревазов А.М.** Анализ чрезвычайных и аварийных ситуаций на объектах магистрального газопроводного транспорта и меры по предупреждению их возникновения и снижению последствий. Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2010; (1):68–70.
- [4] **Лисанов М.В., Сумской С.И., Савина А.В., Шанина Е.Л., Лесняк А.Е., Таран А.И., Наумович И.В.** Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности. Безопасность труда в промышленности. 2010; (3):58–66.
- [5] **Чухарева Н.В., Миронов С.А., Тихонова Т.В.** Прогнозирование аварийных ситуаций и повреждений магистральных газопроводов в условиях Крайнего Севера. Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”. 2012; (3):99–108. Адрес доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Chuhareva/Chuhareva_2.pdf.
- [6] **Большаков А.М.** Анализ разрушений и дефектов в магистральных газопроводах и резервуарах Севера. Газовая промышленность. 2010; (5):52–53.
- [7] **Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Левин А.И.** Анализ оценки риска магистрального газопровода Мастах – Берге – Якутск, проложенного в криолитозоне. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2018; (6):34–43.
- [8] **Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.** Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб.: Наука; 2006: 607.
- [9] **Литвиненко Н.Г., Литвиненко А.Г., Мамырбаев О.Ж., Шаяхметова А.С.** Байесовские сети. Теория и практика. Алматы: Институт информационных и вычислительных технологий; 2020: 198.
- [10] **Родионов В.В.** Элементы теории вероятностей и математической статистики: учебное пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ; 2003: 80.
- [11] **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. Изд 9-е, стер. М.: Высшая школа; 2003: 479.
- [12] **Zhang C., Wu J., Hu X., Ni S.** A probabilistic analysis model of oil pipeline accidents based on an integrated Event-Evolution-Bayesian (EEB) model. Process Safety and Environmental Protection. 2018; 117(7):694–703. DOI:10.1016/j.psep.2018.06.017. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582018303380>.
- [13] **Wu J., Zhou R., Xu S., Wu Z.** Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017; (46):126–136. DOI:10.1016/j.jlp.2017.01.025.
- [14] **Guo X., Zhang L., Liang W., Haugen S.** Risk identification of third-party damage on oil and gas pipelines through the Bayesian network. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018; 54(7):163–178.
- [15] **Li X., Zhang Y., Abbassi R., Khan F., Chen G.** Probabilistic fatigue failure assessment of free spanning subsea pipeline using dynamic Bayesian network. Ocean Engineering. 2021; 234(15):109323. DOI:10.1016/j.oceaneng.2021.109323.

- [16] Liu C., Wang Y., Li X., Li Y., Khan F., Cai B. Quantitative assessment of leakage orifices within gas pipelines using a Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021; 209(5):107438. DOI:10.1016/j.res.2021.107438.
- [17] Hassan S., Wang J., Kontovas C., Bashir M. An assessment of causes and failure likelihood of cross-country pipelines under uncertainty using bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022; 218(A,2):108171. DOI:10.1016/j.res.2021.108171.
- [18] Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Слепцов О.И. Использование байесовский сетей для анализа риска газопровода в условиях криолитозоны. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2022; (2):43–52. DOI:10.36535/0869-4176-2022-02-5.

Вычислительные технологии, 2023, том 28, № 4, с. 35–44. © ФИЦ ИВТ, 2023
Computational Technologies, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 35–44. © FRC ICT, 2023

ISSN 1560-7534
eISSN 2313-691X

MATHEMATICAL MODELLING

DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.004

Using bayesian networks to establish recommendations for the case of failure of the northern main gas pipeline

T. A. KAPITONOVA, G. P. STRUCHKOVA*, O. I. SLEPTSOV

FRC “The Yakut Scientific Centre of SB RAS” Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 677980, Yakutsk, Russia

*Corresponding author: Galina P. Struchkova, e-mail: pandoramy@list.ru

Received May 16, 2023, revised June 19, 2023, accepted June 26, 2023.

Abstract

The paper proposes a model for probabilistic analysis of accidents and proposing recommendations for failures of the main gas pipeline Mastakh–Berge–Yakutsk using the bayesian network and a database obtained on the basis of long-term observations. The choice using bayesian trust networks (BTN) relies on the random mechanism of the input factors of the problem along with the heterogeneous and incomplete data collection. In addition, models based on the BTN have the ability to self-improve as information is accumulated. The proposed BTN allows identifying the main factors leading to failures and accidents, leading to possible recommendations for repair and timely response to emergency incidents, reducing downtime and minimize the damage caused, while increasing the safety operation level of pipeline transport in the North.

Keywords: main gas pipelines, bayesian networks, permafrost, acyclic graph, monitoring, emergencies, failures, recommendations for repair.

Citation: Kapitonova T.A., Struchkova G.P., Sleptsov O.I. Using bayesian networks to establish recommendations for the case of failure of the northern main gas pipeline. *Computational Technologies*. 2023; 28(4):35–44. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.004. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was supported financially within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Reg. No. 122011100157-5, research theme FWRS-2021-0003).

References

1. Makhutov N.A., Permyakov V.N. *Resurs bezopasnoy ekspluatatsii sosudov i truboprovodov [Resource for the safe operation of vessels and pipelines]*. Novosibirsk: Nauka; 2005: 516. (In Russ.)

2. **Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Chernyaev A.P.** Veroyatnostnyy risk-analiz konstruktsiy tekhnicheskikh system. [Probabilistic risk analysis for the design of technical systems]. Novosibirsk: Nauka; 2003: 174. (In Russ.)
3. **Revazov A.M.** Analysis of emergencies and hazards at the facilities of the main gas pipeline transport and measures to prevent their occurrence and reduce the consequences. *Upravleniye Kachestvom v Neftegazovom Komplekse*. 2010; (1):68–70. (In Russ.)
4. **Lisanov M.V., Sumskoy S.I., Savina A.V., Shanina E.L., Lesnyak A.E., Taran A.I., Naumovich I.V.** Risk analysis for main oil pipelines in justification of design solutions that compensate deviations from current safety requirements. *Journal of Research and Production*. 2010; (3):58–66. (In Russ.)
5. **Chukhareva N.V., Mironov S.A., Tikhonova T.V.** Prediction of accidents and damage to gas pipelines in Far North conditions. *Electronic Scientific Journal “Oil and Gas Business”*. 2012; (3):99–108. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Chuhareva/Chuhareva_2.pdf. (In Russ.)
6. **Bolshakov A.M.** Analysis of failures and defects in the main gas pipelines and reservoirs of the North. *Gas Industry Journal*. 2010; (5):52–53. (In Russ.)
7. **Kapitonova T.A., Struchkova G.P., Levin A.I.** Analysis and assessment of the risk of the main gas pipeline Mastah–Berge–Yakutsk laid in the permafrost zone. *Safety and Emergencies Problems*. 2018; (6):34–43. (In Russ.)
8. **Tulup’ev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V.** Bayesovskie seti: logiko-veroyatnostnyy podkhod [Bayesian networks: a logical and probabilistic approach]. St. Petersburg: Nauka; 2006: 607. (In Russ.)
9. **Litvinenko N.G., Litvinenko A.G., Mamyrbayev O.Zh., Shayakhmetova A.S.** Bayesovskie seti. *Teoriya i praktika [Bayesian networks. Theory and practice]*. Almaty: Institut Informatsionnykh i Vychislitel’nykh Tekhnologiy; 2020: 198. (In Russ.)
10. **Rodionov V.V.** Elementy teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki: uchebnoe posobie. [Elements of probability theory and mathematical statistics: textbook]. Chelyabinsk: Izdatel’sтво Yuzhnoural’skogo Gosudarstvennogo Universiteta; 2003: 80. (In Russ.)
11. **Gmurman V.E.** *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika*. [Theory of probability and mathematical statistics]. Izd 9-ye, ster. Moscow: Vysshaya Shkola; 2003: 479. (In Russ.)
12. **Zhang C., Wu J., Hu X., Ni S.** A probabilistic analysis model of oil pipeline accidents based on an integrated Event-Evolution-Bayesian (EEB) model. *Process Safety and Environmental Protection*. 2018; 117(7):694–703. DOI:10.1016/j.psep.2018.06.017. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582018303380>.
13. **Wu J., Zhou R., Xu S., Wu Z.** Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; (46):126–136. DOI:10.1016/j.jlp.2017.01.025.
14. **Guo X., Zhang L., Liang W., Haugen S.** Risk identification of third-party damage on oil and gas pipelines through the Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2018; 54(7):163–178.
15. **Li X., Zhang Y., Abbassi R., Khan F., Chen G.** Probabilistic fatigue failure assessment of free spanning subsea pipeline using dynamic Bayesian network. *Ocean Engineering*. 2021; 234(15):109323. DOI:10.1016/j.oceaneng.2021.109323.
16. **Liu C., Wang Y., Li X., Li Y., Khan F., Cai B.** Quantitative assessment of leakage orifices within gas pipelines using a Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021; 209(5):107438. DOI:10.1016/j.res.2021.107438.
17. **Hassan S., Wang J., Kontovas C., Bashir M.** An assessment of causes and failure likelihood of cross-country pipelines under uncertainty using bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022; 218(A,2):108171. DOI:10.1016/j.res.2021.108171.
18. **Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Sleptsov O.I.** Using bayesian networks to analyze the risk of a gas pipeline in permafrost. *Problemy Bezopasnosti i Chrezvychaynykh Situatsiy*. 2022; (2):43–52. DOI:10.36535/0869-4176-2022-02-5. (In Russ.)