

УДК 621.644.8

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РИСКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

¹Павлидис В.Д., ¹Лукиных А.А., ²Жадгиров А.А.

¹ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
Оренбург, e-mail: Institut.riska@yandex.ru;

²ТОО «CAIH POWER», Алматы, e-mail: maiya@ttg.kz

Эксплуатация магистральных газопроводов сопровождается различными рисками, влияющими на безопасность, надежность и эффективность системы. Цель исследования – разработка стохастической модели оценки рисков эксплуатации магистрального газопровода с учетом физических, природных и технических факторов. В рамках работы проведена кластеризация рисков и их количественная оценка с использованием вероятностно-статистических методов. Разработана структурная схема эффективности газопровода, включающая ключевые показатели надежности и категории рисков. Физические риски (коррозия, износ труб) были исследованы с учетом климатических условий, оказывающих влияние на долговечность трубопроводов. Природные риски, такие как сейсмическое воздействие, проанализированы на основе вероятностных моделей, позволяющих оценить вероятность повреждения системы. Технические риски, включающие сбои в автоматизированных системах и ошибки операторов, рассмотрены с учетом надежности SCADA-систем и факторов человеческого влияния. Проведена расчетная оценка интегрального показателя риска, отражающего совокупную уязвимость системы к негативным воздействиям. Результаты исследования демонстрируют эффективность предложенного подхода для анализа эксплуатационных рисков газопроводов. Разработанная модель может быть использована для оптимизации технического обслуживания, снижения вероятности аварийных ситуаций и повышения общей надежности системы. Применение данной методики позволит разработать рекомендации по модернизации газотранспортной инфраструктуры и минимизации эксплуатационных рисков.

Ключевые слова: магистральный газопровод, эксплуатационные риски, стохастическая модель, техническое обслуживание, автоматизированные системы, анализ уязвимости, минимизация рисков

STOCHASTIC MODEL FOR RISK ASSESSMENT OF MAIN GAS PIPELINE OPERATION

¹Pavlidis V.D., ¹Lukinykh A.A., ²Zhadgirov A.A.

¹Orenburg State Agrarian University, Orenburg, e-mail: Institut.riska@yandex.ru;

²CAIH POWER LLP, Almaty, e-mail: maiya@ttg.kz

The operation of main gas pipelines is associated with various risks affecting the safety, reliability, and efficiency of the system. The aim of this study is to develop a stochastic model for assessing the risks of main gas pipeline operation, considering physical, natural, and technical factors. The study includes risk classification and quantitative assessment using probabilistic-statistical methods. A structural efficiency scheme for the gas pipeline has been developed, incorporating key reliability indicators and risk categories. Physical risks (corrosion, pipeline wear) were analyzed considering climatic conditions affecting pipeline durability. Natural risks, such as seismic activity, were assessed based on probabilistic models to evaluate the likelihood of system damage. Technical risks, including failures in automated systems and operator errors, were examined with regard to the reliability of SCADA systems and human factors. A calculated assessment of the integral risk indicator was conducted, reflecting the overall vulnerability of the system to adverse effects. The results demonstrate the effectiveness of the proposed approach for analyzing operational risks of gas pipelines. The developed model can be used to optimize maintenance, reduce the probability of accidents, and enhance the overall reliability of the system. Applying this methodology will help develop recommendations for modernizing gas transportation infrastructure and minimizing operational risks.

Keywords: main gas pipeline, operational risks, stochastic model, automated systems, maintenance, vulnerability analysis, risk minimization

Введение

Магистральные газопроводы играют ключевую роль в транспортировке природного газа, являясь важным элементом энергетической инфраструктуры. Тем не менее эксплуатация этих систем сопряжена с разнообразными рисками, которые могут оказывать значительное влияние на безопасность, эффективность и надежность работы.

Под рисками принято принимать потенциальную возможность наступления события, которое может иметь негативные результаты, характеризуемое как сочетание

вероятности этого события и его возможных последствий. Риск отражает неопределенность будущего и помогает оценивать угрозы для достижения целей или безопасности систем.

Эффективная эксплуатация магистральных газопроводов требует серьезного анализа всех возможных рисков. С учетом разнообразия потенциальных угроз, связанных с климатическими условиями, природными факторами, особенностями структуры магистралей и ее эксплуатации, особую значимость приобретает системный подход

к идентификации и оценке рисков, который позволяет выделить основные структурные компоненты эффективности.

Цель исследования – разработка стохастической модели оценки рисков эксплуатации магистрального газопровода с учетом физических, природных и технических факторов. В рамках работы проведена кластеризация рисков и их количественная оценка с использованием вероятностно-статистических методов.

Задачи исследования:

- определить ключевые показатели эффективности технической системы магистрального газопровода;
- методами системного анализа построить структурную схему эффективности технической системы магистрального газопровода;
- провести категорирование и кластеризацию рисков функционирования технической системы;
- на основе вероятностного подхода оценить влияние рисков по классам и в совокупности;
- на основании полученных результатов сформировать рекомендации для оценки степени уязвимости всей технической системы магистрального газопровода.

Материалы и методы исследования

Производительность магистрального газопровода напрямую связана с объемом транспортируемого газа: более высокая

производительность требует большей мощности насосных станций и может повышать износ оборудования. Если компрессорные станции не модернизированы для повышения производительности, это может привести к снижению общей эффективности системы и повышению эксплуатационных расходов на ремонт и обслуживание.

Затраты на поддержание оптимального уровня давления газа в трубопроводной системе, а также на его транспортировку по магистральным газопроводам в значительной степени зависят от мощности используемых насосных станций и компрессоров. Эти устройства играют ключевую роль в обеспечении бесперебойного движения газа по системе, и их энергопотребление напрямую определяется такими параметрами, как общая производительность магистрального газопровода, его протяженность, а также установленный уровень давления в системе. Чем выше объем транспортируемого газа в единицу времени, тем больше энергии требуется для поддержания заданного уровня давления на всем протяжении магистрали. Кроме того, дополнительное увеличение энергопотребления может быть вызвано различными факторами, такими как возможные потери газа в результате утечек, недостаточная степень теплоизоляции трубопровода или иные технические неисправности, негативно сказывающиеся на общей эффективности работы системы.



Структурная схема эффективности технической системы магистрального газопровода

Качество и эффективность функционирования сложной технической системы магистрального газопровода во многом определяется состоянием ее оборудования, регулярностью проведения профилактических мероприятий, а также степенью внедрения современных автоматизированных систем диагностики и мониторинга. Чем чаще и тщательнее проводятся технические осмотры, плановые профилактические ремонты и регламентные работы, тем ниже вероятность возникновения внештатных ситуаций, непредвиденных сбоев и аварийных ситуаций, которые могут привести к серьезным последствиям. Современные системы мониторинга и анализа данных позволяют своевременно выявлять потенциальные проблемы на ранних стадиях их развития, что существенно снижает вероятность возникновения серьезных нарушений в работе системы и повышает ее надежность. Дополнительно автоматизация процессов управления технологическими операциями не только минимизирует влияние человеческого фактора, но и способствует значительному улучшению качества функционирования всей газотранспортной системы, обеспечивая ее более стабильную, эффективную и безопасную эксплуатацию.

Структурная схема эффективности технической системы магистрального газопровода с выделением ключевых показателей эффективности и категорий рисков основных компонентов представлена на рисунке.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ всех возможных рисков, связанных с эксплуатацией магистральных газопроводов, позволил провести их кластеризацию и оценку.

К группе физических рисков, оказывающих непосредственное влияние на целостность и надежность функционирования трубопроводной системы, были отнесены такие факторы, как коррозионные процессы, механические повреждения оборудования, а также постепенный естественный износ трубопровода в процессе его длительной эксплуатации. Наиболее значимой и серьезной угрозой в данном классе является именно коррозия материала трубопроводов. Данный процесс представляет собой разрушение металла под воздействием различных внешних факторов, включая влагу, химические вещества и температурные колебания. В климатических условиях Российской Федерации, где значительные перепады температур являются типичным явлением, коррозионные процессы могут протекать ускоренно, что создает дополнительные риски

для эксплуатации газопроводных систем. Это обстоятельство требует обязательного внедрения и активного использования современных методов защиты магистралей, среди которых можно выделить нанесение антикоррозионных покрытий, включая передовые технологии с применением наноматериалов, а также осуществление регулярного технического мониторинга состояния ветвей трубопроводов.

Практика эксплуатации подтверждает высокую значимость данных рисков. Так, например, 5 февраля 2024 г. в Оренбурге была зафиксирована утечка газа на одном из участков теплотрассы, причиной которой стала наружная коррозия трубопровода, возникшая вследствие воздействия талых вод. В результате данного инцидента оказалось затронуто 32 объекта городской инфраструктуры, что привело к серьезным последствиям для населения и коммунальных служб. Аналогичная ситуация наблюдалась и ранее – 14 августа 2023 г. в Уссурийске произошла аварийная ситуация на сети газопровода, причиной которой стало наводнение и последующее интенсивное коррозионное разрушение трубопроводных элементов. Эти примеры демонстрируют необходимость постоянного контроля состояния газотранспортных систем и применения надежных средств защиты от коррозии, что позволит минимизировать риски аварий и продлить срок службы оборудования.

Для оценки совокупного риска при транспортировке газа используется вероятностно-статистический подход, рекомендованный в стандартах по анализу риска [1, с. 20], согласно которым риск определяется через произведение вероятности неблагоприятного события (P) на тяжесть его последствий (S), нормированную от 0 до 1.

Интенсивность коррозионных отказов для магистральных газопроводов, эксплуатируемых в стандартных условиях, принимается на уровне $\lambda_{\text{кор}} \approx 0,05$, что означает ожидание в среднем 0,05 отказа в год. По данным многолетних наблюдений вероятность отказа за год [2, с. 568] составляет $P_{\text{кор}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{кор}}} \approx 0,049$. Тяжесть последствий в виде снижения пропускной способности оценивается в 20%, исходя из данных о временных перерывах в работе при ремонте локальных дефектов [3, с. 752]: $S_{\text{кор}} = 0,2$. Тогда оценка физических рисков определяется следующим образом:

$$R_{\text{физ}} = P_{\text{кор}} \cdot S_{\text{кор}} = 0,049 \cdot 0,2 = 0,0098.$$

К классу рисков природного характера были отнесены преимущественно сейсмические воздействия, для оценки которых в геотехнической инженерии широко приме-

няется пуассоновская модель вероятности событий. Например, причиной аварии на газопроводе в Илекском районе Оренбургской области 14 апреля 2021 г. называют высокую сейсмическую активность в соседнем районе с последующим землетрясением.

Вероятность землетрясения такой интенсивности, которая способна повредить трубопровод, принята равной 1 % в год [4, с. 105]. Вероятность критического повреждения при наступлении расчетного события принимается за 50 % [5, с. 134]:

$$P_{\text{прир}} = 0,01 \cdot 0,5 = 0,005.$$

При серьезных повреждениях снижение пропускной способности до 50 % отражено в практических руководствах по оценке последствий сейсмических нагрузок [6, с. 57]: $S_{\text{прир}} = 0,5$. Тогда оценка природных рисков определяется следующим образом:

$$P_{\text{прир}} = P_{\text{прир}} \cdot S_{\text{прир}} = 0,005 \cdot 0,5 = 0,0025.$$

К классу технических рисков были отнесены сбои и погрешности в системах управления процессами, связанными с транспортировкой газа, сбои в системах автоматизации и ошибки операторов. Надежность систем автоматизации является критически важной для предотвращения аварий на газопроводах. Пример технических рисков, связанных со сбоями в системе автоматизации и человеческими ошибками, можно найти в аварии на магистральном газопроводе «Белосуво — Ленинград» в Ленинградской области в 2022 г. Разгерметизация газопровода, сопровождавшаяся возгоранием, привела к отключению шести газораспределительных станций. Основная причина аварии — сбой в системе автоматизации, который не позволил своевременно обнаружить и предотвратить разгерметизацию.

Для современных SCADA-систем и приборов автоматики, применяемых в газотранспортных сетях, среднее время наработки на отказ (MTBF) составляет около 10 лет, что подтверждается производителями и независимыми исследованиями [7, с. 201].

Вероятность отказа за год:

$$P_{\text{тех}} = 1 - e^{-1/10} \approx 0,095 \approx 0,1.$$

Снижение пропускной способности при сбое автоматики оценивается в 10 % согласно данным о режимах ручного управления и статистике быстрой реакции операторов [8, с. 29]: $S_{\text{тех}} = 0$, тогда оценка технических рисков определяется следующим образом:

$$R_{\text{тех}} = P_{\text{тех}} \cdot S_{\text{тех}} = 0,1 \cdot 0,1 = 0,001.$$

Суммарный интегральный риск по трем категориям составляет немногим больше 2 %:

$$R_{\text{сум}} = R_{\text{кор}} + R_{\text{прир}} + R_{\text{тех}} = \\ = 0,0098 + 0,0025 + 0,01 = 0,0223.$$

Итоговый показатель (около 2,23 %) отражает совокупную степень уязвимости технической системы к комплексному набору факторов и служит базой для принятия управленческих решений по усилению мер безопасности и повышению надежности транспортировки газа. Он является итоговым значением интегрального безразмерного показателя риска, полученного с учетом всех рассмотренных категорий угроз из соответствующих классов.

Заключение

Показатель $R_{\text{сум}}$ отражает относительную степень уязвимости системы к совокупности анализируемых факторов за определенный период и представляет собой условный индикатор, показывающий долю потенциального «рискового воздействия» на систему по сравнению с ее максимально возможной степенью негативного влияния, принятой за единицу. Он позволяет сравнивать участки газопровода, сценарии эксплуатации, варианты модернизации, оценивая риски, и принимать на этой основе управленческие решения.

Представленный подход к оценке риска, основанный на использовании вероятностно-статистических моделей, а также на анализе и обобщении данных о сейсмических, технических и физических воздействиях, полностью соответствует признанному международным методикам, разработанным в области техносферной безопасности. Эти методы широко используются в мире для повышения уровня важнейших объектов, включая газотранспортные системы, и доказали свою эффективность при прогнозировании возможной угрозы. Применение современных аналитических подходов позволяет формировать научно обоснованные и проверенные временные основы для принятия грамотных инженерных решений, направленных не только на повышение общей устойчивости газотранспортной отрасли, но и на минимизацию негативных последствий, вызванных неблагоприятными факторами, такими как аварии, утечки газа, внешние воздействия и технические неисправности. Кроме того, использование таких методов в целом обеспечивает техносферную безопасность, включая комплексный и всесторонний подход к управлению рисками в газовой отрасли.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51901.1-2002. Системы управления безопасностью. Требования к системам управления безопасностью при эксплуатации и техническом обслуживании опасных производственных объектов. М.: Стандартинформ, 2002. 20 с.
2. Li Y., Chen C., Yao L., Fan M., Zhang Y. Reliability analysis of gas pipelines under global bending and thermal loadings considering a high chloride ion environment // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 156. P. 107802. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107802.
3. Mingjiang X., Zhigang T. Risk-based pipeline re-assessment optimization considering corrosion defects // *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 38. P. 746–757. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.021
4. СП 14.13330.2018 «Свод правил. Строительство в сейсмических районах» (актуализированная редакция СНиП II-7-81). М.: Стандартинформ, 2018. 144 с.
5. Jie L., Wei L. *Lifeline Engineering Systems: Network Reliability Analysis and Aseismic Design*. Springer Singapore, 1st ed., 2021. P. 210. DOI: 10.1016/j.scs.2018.01.021.
6. Харионовский В.В. Надежность магистральных газопроводов: становление, развитие и современное состояние // *Газовая промышленность*. 2019. № 1 (779). С. 56–68.
7. Федосов А.В., Тажетдинова А.А., Сандырев К.Ю., Гимаев Р.А. Анализ требований законодательства по обеспечению безопасности эксплуатации магистральных газопроводов // *Евразийский юридический журнал*. 2022. № 3 (166). С. 421.
8. Голыжникова Д.Ю. Вопросы повышения эффективности нефтегазопроводных сетей: риск-ориентированный подход, противоаварийное оборудование, международные стандарты по безопасности // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. 2018. № 10. С. 26–32. DOI: 10.30713/1999-6942-2018-10-26-32.