

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 80–92.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 80–92.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 622.692.4: 539.43

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92

EDN: ENTBLM

ОЦЕНКА ЗАДАННОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ ПРИЕМЛЕМОСТИ РИСКА

Олег Александрович Курасов¹, Петр Владимирович Бурков^{1,2}

¹Национальный исследовательский

Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Оценка надежности системы газопроводов – одна из наиболее важных задач, поскольку безопасность поставок газа неразрывно связана с надежной работой всей системы в целом.

С целью обеспечения заданного уровня надежности газопроводных систем в настоящем исследовании описана методика оценки приемлемого уровня риска, которая устанавливается в соответствии с действующими нормами и стандартами.

Методы исследования. Применяется трехкомпонентная методика оценки заданного уровня надежности газопроводных систем. Она реализуется путем создания модели последствий отказа, которая учитывает условия окружающей среды и характеристики газопроводов. Далее определяются приемлемые вероятности отказа трубопровода с помощью теории риска. На основе этих данных создается модель для оценки надежности транспортировки газа в системе газопроводов с учетом вероятности отказа и гидравлических характеристик.

Результаты. Определяется заданный уровень надежности системы на основе допустимой вероятности отказа. Полученное значение надежности сравнивается с фактическим уровнем надежности реальной системы газопроводов. Определен оптимальный вариант действий для обеспечения и повышения надежности системы на основе сделанных выводов.

Ключевые слова: риск, надежность, моделирование отказов, газопровод, безопасность

Для цитирования: Курасов О.А., Бурков П.В. Оценка заданного уровня надежности сложных технических систем на основе критериев приемлемости риска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 80–92. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92. EDN: ENTBLM

ORIGINAL ARTICLE

EVALUATION OF RELIABILITY OF COMPLEX ENGINEERING SYSTEMS USING RISK ACCEPTANCE CRITERIA**Oleg A. Kurasov¹, Petr V. Burkov^{1,2}**¹*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*²*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The reliability evaluation of gas pipeline systems is one of the most important tasks, since the safety of gas supplies determines the reliable operation of the whole system.

Purpose: This paper presents the evaluation methodology based on the risk acceptance criteria established in accordance with the current rules and standards.

Methodology: A three-component methodology is used to evaluate the reliability level of gas pipeline systems. It is implemented by creating a model of failure consequences, which accounts for environmental conditions and pipeline properties. Acceptable probabilities of the pipeline failure are determined using the risk theory. Based on these data, the model is designed to assess the gas transport reliability in the pipeline system with regard to failure probabilities and hydraulic characteristics.

Research findings: The reliability level of the system is determined using the acceptable failure probability. The obtained reliability is compared with that of the real pipeline system. The best procedure is proposed to maintain and improve the system reliability.

Keywords: risk, reliability, failure modelling, pipeline, safety

For citation: Kurasov O.A., Burkov P.V. Evaluation of reliability of complex engineering systems using risk acceptance criteria. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 80–92. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-80-92. EDN: EHTBLM

Введение

В современной промышленности вопрос обеспечения надежности газопроводов приобретает особую актуальность. Эффективность эксплуатации магистральных газопроводов напрямую зависит от их надежности и безопасности, что в значительной степени предопределяет экономическую стабильность и экологическую безопасность регионов. В этой связи научное исследование, направленное на разработку методики определения заданного уровня надежности газопроводов на основе критериев приемлемости риска, становится особенно значимым.

Цель настоящей статьи – представить комплексный подход к оценке надежности газопроводов, который позволит с учетом специфических условий эксплуатации определять оптимальные параметры их работы. Методика, разработанная в рамках исследования, базируется на современных принципах управления рисками и предусматривает комплексный анализ потенциальных опасностей и уязвимостей газопроводных систем.

Акцент делается на критериях приемлемости риска, которые являются ключевым элементом в процессе обеспечения надежности. Эти критерии позволяют не только оценивать вероятность возникновения нежелательных событий, но и эффективно управлять рисками, минимизируя потенциальные последствия аварийных ситуаций.

Достаточно быстро развивающаяся «зеленая» низкоуглеродная экономическая политика газодобывающих компаний резко повысила значение газа как посредника между новыми источниками энергии и сильно загрязняющим окружающую среду ископаемым топливом [1, 2, 3]. Безопасная и стабильная транспортировка углеводородов тесно связана с эффективным функционированием системы газопроводов, которые служат важнейшим связующим звеном между поставками газа и рынками [4, 5]. В последнее время отечественные и международные эксперты уделяют особое внимание изучению надежности систем транспорта углеводородов. Результатом стала разработка большого количества методик, внедрение системы измерения надежности и создание протоколов оценки надежности [6–13]. Тем не менее недостаточная изученность заданного уровня надежности является существенным препятствием для практического использования теории надежности в системе транспорта газа. Поэтому для оценки надежности газовых магистралей необходимо понимать заданный уровень надежности при проектировании.

Исчерпывающий и актуальный обзор литературы позволяет выявить области, в которых отсутствует информация или, наоборот, присутствуют некие пробелы в понимании проблемы безопасности транспортировки углеводородов, а также определить современное состояние исследований, имеющих непосредственное отношение к проблематике рисков отказов в сложных технических системах, которыми являются газопроводы.

В настоящее время существует два утвержденных метода оценки надежности: статистический подход, основанный на исторических данных, и подход, основанный на оценке риска. Первый метод предполагает использование данных об отказах, полученных из баз данных об инцидентах. Статистические подходы, несмотря на их гибкость, обрабатывают большие объемы информации и должны оперировать актуальными данными своей постоянно обновляемой информационной базы. Например, в части трубопроводного транспорта природного газа это Управление по безопасности трубопроводов и опасным материалам (PHMSA), Европейская группа по расследованию аварий на газопроводах (EGIG) и др. Такие данные применяются для определения средней исторической вероятности отказов. Для их эффективного использования на практике необходимо скорректировать среднюю историческую вероятность отказа с учетом изменений в классификации безопасности, условиях эксплуатации и параметрах конструкции трубопровода. Заданный уровень надежности определяется путем вычитания единицы из максимально допустимой вероятности отказа после учета средней исторической вероятности отказа [14].

В табл. 1 представлена методология DNV-RP-F101, в которой учитывается исключительно влияние коррозии на наземные и морские трубопроводы при определении максимально допустимой вероятности отказа для четырех категорий безопасности (DNV, 2009). В табл. 2 показано, как стандарт ISO 16708 устанавливает желаемый уровень надежности трубопроводов для нескольких сценариев отказа, включая разрыв и утечку крупномасштабных наземных газопроводов (EGIG, 2020; ISO, 2006). Так, в стандарте ISO 16708 используются два конкретных набора исторических данных об интенсивности отказов: данные Европейской группы данных об инцидентах на трубопроводах (EGIG)

и данные Министерства транспорта (DOT). В 2016 г. Хассаньен [15] представил методику определения заданного уровня надежности. Метод предполагает вычисление вероятности отказа непосредственно в момент отказа и корректировку предыдущих случаев отказа. Тем не менее такой статистический подход может оказаться слишком консервативным и привести к увеличению экономических расходов.

Таблица 1

Класс безопасности и годовая целевая надежность трубопровода для конечного предельного состояния в DNV-RP-F101

Table 1

Safety class and annual pipeline reliability for limiting state according to DNV-RP-F101

Класс безопасности	Годовая максимально допустимая вероятность отказа
Очень высокий	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Высокий	$< 1 \cdot 10^{-5}$
Средний	$< 1 \cdot 10^{-4}$
Низкий	$< 1 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

Целевая надежность трубопровода в стандарте ISO 16708

Table 2

Pipeline reliability according to ISO 16708

Причина отказа	Отчетность DOT		EGIG:2001	
	Количество отказов на км/г.	% от общего количества	Количество отказов на км/г.	% от общего количества
Внешняя коррозия	$0,16 \cdot 10^{-4}$	15	$0,03 \cdot 10^{-4}$	1
Влияние оборудования	$0,51 \cdot 10^{-4}$	49	$1,16 \cdot 10^{-4}$	75
Другие	$0,37 \cdot 10^{-4}$	36	$0,52 \cdot 10^{-4}$	24
Всего	$1,04 \cdot 10^{-4}$	100	$2,16 \cdot 10^{-4}$	100

Предлагаемые во втором методе стратегии учитывают безопасность жизнедеятельности при определении надежности сложной технической системы. Т. Циммерман [16] представил первоначальный подход к оценке надежности наземных трубопроводов, основанный на теории риска. В основе этой стратегии лежит степень готовности общества к принятию риска и влияние аварий на близлежащие районы. Автор разработал кривые надежности для трубопроводов, включая как социальные, так и индивидуальные риски. Включение показателей антипатии риска и класса местоположения еще больше подчеркнуло необходимость учета как общественных, так и индивидуальных критериев приемлемости риска. Кроме того, были собраны данные о трубопроводах и разработаны модели для анализа последствий различных аварий и сбоев. В стандарте CSA Z662 был реализован подход, предложенный Т. Циммерманом и М. Нес-

символ. В работе [17] Чжан использовал подход, основанный на оценке рисков, для исследования 37 000 км трубопроводов и разработал 148 эксплуатационных критериев, чтобы предложить заданный уровень надежности исследуемых объектов транспорта углеводородов. Кроме того, Ли [18, 19] представил специальную функцию заданной надежности, разработанную для трубопроводов. Тем не менее важно отметить, что второй подход не учитывает экономический риск.

Опубликованные ранее работы демонстрируют два ограничения. Во-первых, учет экологических и экономических рисков не осуществляется. Во-вторых, эти методики относятся исключительно к оценке заданного уровня надежности трубопроводов и неприменимы к системе газопроводов.

В настоящей статье описан метод оценки заданного уровня надежности сложной технической системы на примере конкретного газопровода с использованием заранее определенных критериев приемлемости риска, призванный устранить эти проблемы. Кроме того, ниже приводится полный перечень всех разработок, представленных в данном исследовании:

1. Описано предложение по установлению меры надежности для трубопроводных систем, транспортирующих газ.
2. Рассмотрена методология оценки заданной надежности для наземных газопроводов с учетом потенциальных рисков для экономики, общества и населения. Кроме того, в связи с возможными финансовыми последствиями экологический аспект также относится к категории экономических рисков.
3. Предложена методика определения заданного уровня надежности инфраструктуры газопроводов.

Постановка задачи, методы исследования

Заданный уровень надежности сложных технических систем – это способность успешно выполнять плановые задачи по транспортировке газа в установленные сроки и при заданных условиях. В статье описывается методология определения уровня надежности путем интеграции критериев приемлемости риска с моделью оценки надежности.

Подход состоит из трех основных компонентов. Критерии приемлемости риска устанавливаются в соответствии с существующими стандартами, нормативно-правовыми актами, а также данными, полученными в ходе экспериментальных исследований и практического применения различных методов оценки надежности газопроводов. Затем строится модель последствий отказов с учетом характеристик и условий эксплуатации трубопровода. Далее рассчитывается допустимое количество отказа с использованием принципов теории риска. В итоге создается оценочная модель для анализа надежности транспорта газа. Модель использует максимально допустимую вероятность отказа для обеспечения заданного уровня надежности, принимая во внимание гидравлические и отказоустойчивые свойства трубопроводной системы.

Ниже рассматривается порог приемлемости риска, который включает в себя общественные, индивидуальные и экономические факторы. Соотношение между вероятностью инцидента на сети трубопроводов и масштабом его воздействия на близлежащие населенные районы определяет уровень общественного риска. Индивидуальный риск определяет уровень воздействия ин-

цидентов на трубопровод, которому подвергаются лица, находящиеся в непосредственной зоне риска. Финансовые последствия, с которыми могут столкнуться операторы трубопроводов в результате инцидентов на трубопроводах, известны как экономический риск (EGIG, 2020) [20].

Кривая $F-N$ обычно используется для изображения критериев приемлемости как индивидуального, так и общественного риска, в то время как фиксированное ожидание представляет собой установленный уровень ожидания риска аварии на трубопроводе. Взаимосвязь между числом погибших (N) и частотой (F) событий, приводящих к гибели N или более человек, отображается кривой $F-N$, построенной в логарифмическом масштабе. М. Нессим дает точное объяснение кривой $F-N$ в своей публикации 2009 г. [21].

$$P_{fN}(x) = 1 - F_N(x) < \frac{C}{x^a}. \tag{1}$$

Здесь $P_{fN}(x)$ обозначает вероятность отказа в конкретной ситуации; $F_N(x)$ – кумулятивная функция распределения (на км/г.) происшествий, которые приводят к предполагаемому количеству смертей, равному x ; C и a – константы, соответствующие коэффициенту антипатии риска (предусматривающему подготовку к риску или потенциальной угрозе) и допустимому уровню риска соответственно.

Как и кривая $F-N$, кривая $P-L$ учитывает неприятие крупных событий и используется в качестве стандарта для оценки экономического риска.

$$P_{fL}(e) = 1 - F_L(e) < \frac{B}{(3\log_{10} e - 14)^n}. \tag{2}$$

В данном контексте переменная e представляет собой годовой экономический ущерб, руб., вызванный отказом системы или отдельных ее элементов. Константы B и n отражают коэффициент антипатии риска и допустимый уровень риска соответственно. $P_{fL}(e)$ обозначает вероятность отказа. $F_L(e)$ представляет собой кумулятивную функцию распределения экономических потерь на км/г. Учитывая, что экономическая приемлемость риска снижается по мере увеличения тяжести повреждений трубопровода, необходимо увеличить значение n . В табл. 3 представлены значения параметров n и B с учетом стандарта категоризации аварийных событий и уровня экономического развития.

Таблица 3

Параметры кривой $P-L$

Table 3

$P-L$ curve parameters

Классификация инцидентов	Экономический ущерб (руб.)	n	B
Общий инцидент	$e \leq 1 \cdot 10^5$	0	10^{-4}
Общий инцидент	$1 \cdot 10^5 < e \leq 1 \cdot 10^6$	1	10^{-4}
Существенный инцидент	$1 \cdot 10^6 < e \leq 5 \cdot 10^6$	1,5	10^{-4}
Крупный инцидент	$5 \cdot 10^6 < e \leq 1 \cdot 10^7$	2	10^{-4}
Особо значимый инцидент	$1 \cdot 10^7 < e$	2	10^{-4}

Разрушение газопровода может привести к образованию взрывоопасных паров, способных вызвать пожар или взрыв. Это, в свою очередь, незамедлительно приведет к гибели людей в соседних населенных пунктах или операторов, а также к значительным экономическим потерям. При оценке заданного уровня надежности крайне важно учитывать последствия социальных, личных и экономических рисков.

Многие модели рисков учитывают влияние незапланированных выбросов на прилегающие населенные пункты. Для оценки количества погибших в этих моделях используются такие факторы, как опасная зона, плотность населения, объемы утекшего газа, вероятность воспламенения и риск летального исхода [22].

Экономические последствия катастроф на трубопроводах включают в себя снижение прибыли от производства и расходы, связанные с ремонтом поврежденного участка трубы. Кроме того, выброс углеводородов потенциально может привести к гибели людей, уничтожению имущества и экологическим последствиям, решение которых требует финансовых затрат. При оценке экономических последствий аварий на трубопроводах учитываются четыре различных фактора: материальный ущерб, компенсационные издержки, экологический ущерб и дополнительные прочие расходы. Кроме того, размер экономического ущерба значительно варьируется в зависимости от серьезности аварии.

Под системой газопроводов понимается совокупность трубопроводных сетей, опасных производственных объектов, промышленной инфраструктуры и оборудования, используемых для транспортировки углеводородов от места добычи до конечного пункта потребления.

Надежность транспорта углеводородов – это способность трубопроводной системы удовлетворять потребности клиентов в газе в соответствии с заранее установленными целями и критериями. Уравнение (3) является исходным предложением показателя надежности сложных технических систем, обозначаемого в данном разделе как R_{system} , который определяется размерностью количества.

$$R_{system} = \frac{\sum_{i=1}^T I_i}{T}, I_i = \begin{cases} 1, \sum_{k=1}^n X_{ik} \geq \sum_{k=1}^n D_{ik} \\ \frac{\sum_{k=1}^n X_{ik}}{\sum_{k=1}^n D_{ik}} \end{cases}, \quad (3)$$

где T – время выполнения задания, день; X_{ik} – количество природного газа, поставленного в i -й день через систему газопроводов k -му потребителю; D_{ik} – потребность в природном газе k -го потребителя в i -й день; подстрочный индекс i обозначает момент, день; подстрочный индекс k – конкретного потребителя.

Моделирование процесса перехода системы из одного состояния в другое основывается на последовательном методе Монте-Карло, использующем расчетные значения заданного уровня надежности. Для оценки изменения фактического расхода проводится гидравлический анализ турбулентного потока при

переходе системы из одного состояния в другое с помощью программного обеспечения. Показатели надежности получены путем объединения гидравлического анализа с моделированием процессов перехода из одного состояния в другое. Кроме того, надежность системы газопроводов определяется с учетом целей обеспечения надежности поставок газа. Чтобы определить заданный уровень надежности, необходимо выполнить следующие действия:

1. Обеспечить критерий оценки надежности.
2. Получить основные сведения о газопроводах.
3. Выявить последствия отказа.
4. Определить заданный уровень надежности газопроводов.
5. Выполнить моделирование стохастического процесса перехода состояний для системы газопроводов.
6. Определить объемы газа, поставляемого по газопроводной магистрали.
7. Определить заданную степень надежности газопроводных систем.

Обсуждение результатов исследования

Исследуемый прототип газопроводной системы включает в себя одну терминальную станцию, 32 станции блочной арматуры, 4 станции отбора и 4 компрессорные станции. Трубопроводная система состоит из 40 отдельных сегментов, каждый из которых обладает отличительными характеристиками, представленными в табл. 4. Трубопроводная система присваивает пяти распределительным узлам целочисленные идентификаторы от 1 до 5. Соответствующие данные приведены в табл. 5, 6.

Таблица 4

Информация о пяти распределительных узлах

Table 4

Parameters of five distributive pipeline nodes

Распределительный узел	Расположение, км	Q_{dist} , Нм ³ /ч	V_{dist} , млрд м ³	P_{min} , МПа
1	291,96	6164,21	0,053	4
2	404,22	38 638,58	0,368	3,5
3	849,58	22 387,5	0,226	3,5
4	905,6	25 630,18	0,224	3,5
5	928,6	329 196,7	2,869	3
Итого	–	422 017,14	3,74	–

Таблица 5

Характеристики трубопроводов

Table 5

Pipeline parameters

Параметр	Значение
Диаметр, мм	660
Толщина, мм	7,1
Проектное давление, МПа	6,5

Таблица 6

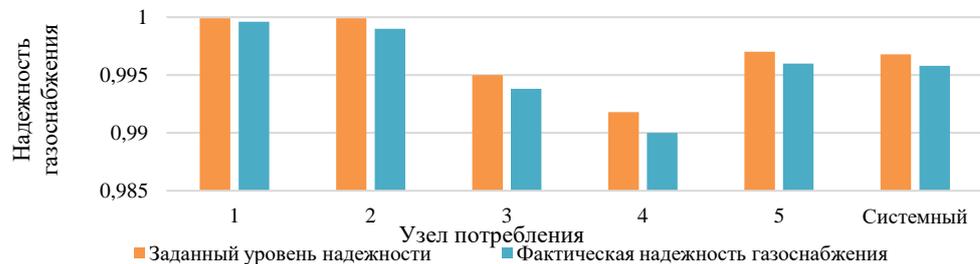
Длина и класс участков трубопроводов

Table 6

Length and class of pipeline sections

Участок	Длина, км	Класс	Участок	Длина, км	Класс	Участок	Длина, км	Класс
1	30,8	1	15	26,8	1	29	24,5	2
2	29,2	1	16	31,8	1	30	25,8	2
3	28,9	1	17	27,8	1	31	27,5	2
4	24,9	2	18	20,6	1	32	25,2	2
5	3,1	2	19	22,5	1	33	25,1	2
6	19,7	2	20	3,5	1	34	26,1	2
7	19,1	2	21	27,8	1	35	20,0	3
8	20,4	2	22	29,6	1	36	14,9	3
9	30,9	1	23	30,8	1	37	15,8	3
10	27,9	1	24	29,5	1	38	16,9	3
11	32,8	1	25	32,6	1	39	4,4	3
12	31,7	1	26	31,6	1	40	23,5	3
13	4,1	1	27	34,8	1	–	–	–
14	27,8	1	28	34,8	1	–	–	–

Заданный уровень надежности оценивается с помощью реальной трубопроводной системы, а полученное значение сравнивается с фактическим значением надежности. Трубопроводы и компрессорные станции являются составными частями модели оценки надежности, при этом вероятность отказа каждого отдельного компонента системы вводится в расчетную модель. Таким образом, исследуемая трубопроводная система подвергается моделированию стохастического процесса перехода состояний, чтобы определить состояние и срок службы каждого блока в течение годового периода. Перекачка газа из системы определяется с помощью программного обеспечения и гидравлического анализа нестационарного потока, который учитывает переходы системы в различные состояния. Из данных рисунка следует, что расчет показателей надежности осуществляется путем интеграции моделирования переходного процесса в состояние с анализом гидравлических характеристик. Кроме того, показано сравнение между заданным и фактическим уровнями надежности транспортировки газа.



Заданный уровень надежности исследуемой трубопроводной системы
Specified reliability level of the pipeline system

Независимо от того, рассматривается ли надежность для отдельных узлов потребителей или для всей системы, на основании анализа данных рисунка фактическая надежность трубопроводной системы ниже запланированного значения надежности транспорта газа. Поэтому исследуемая сеть газопроводной магистрали должна внедрить необходимые протоколы безопасности для снижения риска и повышения способности выполнять свою функцию по транспорту углеводородов.

Наиболее подходящим дальнейшим планом действий для повышения надежности является тот, который соответствует выводам, сделанным в результате сравнения. Во-первых, необходимо увеличить экономические ресурсы, выделяемые на содержание и обслуживание газопроводов, чтобы обеспечить оперативный ремонт и замену всех поврежденных участков труб. Во-вторых, оптимизировать стратегию эксплуатации системы газопроводов. Одной из дополнительных мер также является увеличение количества запасных частей для отдельных элементов сети газопроводов.

Заключение

Таким образом, представлен метод оценки надежности системы газопроводов, а также подтверждения соблюдения стандартов приемлемости риска. Подход базируется на трех составляющих: оценка надежности, расчет приемлемой вероятности и последствий отказов, а также установление критериев приемлемости рисков.

Кроме того, адекватность и целесообразность данного подхода оценивается путем сравнения заданных и фактических значений надежности на действующей системе трубопроводного транспорта газа. Предлагаются рекомендации по повышению надежности газоснабжения, основанные на сравнении фактического и предполагаемого уровня надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gong J., Kang Q., Wu H., Li X., Shi B., Song S. Application and prospects of multi-phase pipeline simulation technology in empowering the intelligent oil and gas fields // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2023. V. 3 (3). P. 100127. Doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100127
2. Huang W., Li Y., Yu W., Yu H., Shan X., Wang H., Gong J. An evaluation index system of the user satisfaction for the natural gas pipeline network // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021. V. 1 (4) P. 452–458.
3. Zhu Y.Q., Wang P., Wang Y., Tong R.K., Yu B., Qu Z.G. Assessment method for gas supply reliability of natural gas pipeline networks considering failure and repair // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. V. 88 (2). P. 103817. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103817
4. Liu Y., Zhou W. Uncertainties in internal pressure of oil transmission pipelines and implications for the reliability analysis // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2022. V. 2 (2). P. 100055. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100055>
5. Yu W.C., Gong J., Huang W.H., Liu H.F., Dang F.H., Luo J.L., Sun Y.H. A systematic methodology to assess hydraulic reliability and gas supply reliability of the natural gas pipeline network // *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021. V. 143 (4). DOI: 10.1115/1.4049711
6. Chen Q., Zuo L.L., Wu C.C., Cao Y.K., Bu Y.R., Chen F., Sadiq R. Supply reliability assessment of a gas pipeline network under stochastic demands // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. V. 209. P. 107482. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107482

7. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management // *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021. V. 143 (4). DOI:10.1115/1.4049743
8. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management // *Proceedings of the ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP 2020)*. 2020. V. 8. DOI: 10.1115/PVP2020-21218
9. Safipour H., Abdollahi A., Hajmohammadi M., Alizadeh M.I. Optimal demand response strategies to mitigate wind power variability and gas-supply uncertainty in a multi-resolution robust security constrained unit commitment // *Iet Generation Transmission & Distribution*. 2020. V. 14 (14). P. 2740–2750.
10. Su H., Zio E., Zhang J., Li X., Chi L., Fan L., Zhang Z. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency // *Computers & Chemical Engineering*. 2019. V. 131. P. 106584. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106584
11. Yu W. Study on the gas supply reliability of natural gas pipeline networks based on demand side analysis. Beijing : China University of Petroleum, 2019.
12. Yu W.C., Huang W.H., Wen Y.H., Li Y.C., Liu H.F., Wen K., Gong J., Lu Y.A. An integrated gas supply reliability evaluation method of the large-scale and complex natural gas pipeline network based on demand-side analysis // *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. V. 212. P. 212:107651. DOI: 10.1016/j.res.2021.107651
13. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines // *Energies*. 2023. V. 16 (20). P. 7067.
14. Gong C., Frangopol D.M. Time-variant hull girder reliability considering spatial dependence of corrosion growth, geometric and material properties // *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. V. 193. P. 106612.
15. Hassanien S., Leblanc L., Nemeth A. Towards an acceptable pipeline integrity target reliability // 11th International Pipeline Conference. IPC 2016. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2016.
16. Zimmerman T., Nessim M., McLamb M., Rothwell B., Zhou J., Glover A. Target reliability levels for onshore gas pipelines // *Proceedings of the 4th International Pipeline Conference*. Calgary, Alta, 2002. P. 845–854.
17. Zhang J., Zhang Z., Yu Z., Wu W., Chen Y. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline // 10th International Pipeline Conference, IPC 2014. American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2014.
18. Lee J.-H., Kim J.-H., Young-Do J., Hyun K.L. Application of target reliability levels for maintenance of domestic natural gas pipelines // *Journal of The Korean Institute of Gas*. 2018. V. 22 (3). P. 1–6.
19. Lee J.-H., Young-Do J., Moon J.-S. A study on establishing target reliability levels for flammable gas transmission pipelines // *Journal of The Korean Institute of Gas*. 2018. V. 22 (6). P. 52–58.
20. Gong C., Frangopol D.M., Cheng M. Risk-based life-cycle optimal dry-docking inspection of corroding ship hull tankers // *Engineering Structures*. 2019. V. 195. P. 559–567.
21. Nessim M., Zhou W., Zhou J., Rothwell B., McLamb M. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines // *International Pipeline Conference : proceedings of the 5th Biennial International Pipeline Conference : presented at the International Pipeline Conference (IPC 2004) : Calgary, Alberta, Canada, October 4–8, 2004*. P. 2501–2512.
22. Kurasov O.A., Burkov P.V. Substantiation of methods of improving safety of pipeline gas transportation // *E3S Web of Conferences : 2021 Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, TI 2021, Saint Petersburg*. EDP Sciences. 2021. V. 266. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601012. EDN: VJQECF

REFERENCES

1. Gong J., Kang Q., Wu H., Li X., Shi B., Song S. Application and prospects of multi-phase pipeline simulation technology in empowering the intelligent oil and gas fields. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2023; 3 (3): 100127. Doi.org/10.1016/j.jpse.2023.100127

2. Huang W., Li Y., Yu W., Yu H., Shan X., Wang H., Gong J. An evaluation index system of the user satisfaction for the natural gas pipeline network. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2021; 1 (4): 452–458.
3. Zhu Y.Q., Wang P., Wang Y., Tong R.K., Yu B., Qu Z.G. Assessment method for gas supply reliability of natural gas pipeline networks considering failure and repair. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021; 88: 103817. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103817
4. Liu Y., Zhou W. Uncertainties in internal pressure of oil transmission pipelines and implications for the reliability analysis. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2022; 2 (2): 100055. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100055>
5. Yu W.C., Gong J., Huang W.H., Liu H.F., Dang F.H., Luo J.L., Sun Y.H. A Systematic Methodology to Assess Hydraulic Reliability and Gas Supply Reliability of the Natural Gas Pipeline Network. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021; 143 (4). DOI: 10.1115/1.4049711
6. Chen Q., Zuo L.L., Wu C.C., Cao Y.K., Bu Y.R., Chen F., Sadiq R. Supply reliability assessment of a gas pipeline network under stochastic demands. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021; 209: 107482. DOI: 10.1016/j.res.2021.107482
7. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions of the ASME*. 2021; 143 (4): 107482. DOI: 10.1016/j.res.2021.107482
8. Li Y.C., Gong J., Yu W.C., Huang W.H., Wen K. Gas supply reliability analysis of a natural gas pipeline system considering the effects of demand side management. In: *Proc. ASME 'Pressure Vessels & Piping Conference'*. 2020; 8. DOI: 10.1115/PVP2020-21218
9. Safipour H., Abdollahi A., Hajmohammadi M., Alizadeh M.I. Optimal demand response strategies to mitigate wind power variability and gas-supply uncertainty in a multi-resolution robust security constrained unit commitment. *IET Generation Transmission & Distribution*. 2020; 14 (14): 2740–2750.
10. Su H., Zio E., Zhang J., Li X., Chi L., Fan L., Zhang Z. A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency. *Computers & Chemical Engineering*. 2019; 131: 106584. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2019.106584
11. Yu W. Study on the gas supply reliability of natural gas pipeline networks based on demand side analysis. China University of Petroleum, Beijing, 2019.
12. Yu W.C., Huang W.H., Wen Y.H., Li Y.C., Liu H.F., Wen K., Gong J., Lu Y.A. An integrated gas supply reliability evaluation method of the large-scale and complex natural gas pipeline network based on demand-side analysis. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021; 212: 107651. DOI: 10.1016/j.res.2021.107651
13. Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the kinetic equation of the groove corrosion process for predicting the residual life of oil-field pipelines. *Energies*. 2023, 16 (20): 7067.
14. Gong C., Frangopol D.M. Time-variant hull girder reliability considering spatial dependence of corrosion growth, geometric and material properties. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020; 193: 106612.
15. Hassani S., Leblanc L., Nemeth A. Towards an acceptable pipeline integrity target reliability. In: *Proc. 11th Int. Pipeline Conference, American Society of Mechanical Engineers*, 2016.
16. Zimmerman T., Nessim M., McLamb M., Rothwell B., Zhou J., Glover A. Target reliability levels for onshore gas pipelines. In: *Proc. 4th Int. Pipeline Conference*. Calgary, Alta, 2002. Pp. 845–854.
17. Zhang J., Zhang Z., Yu Z., Wu W., Chen Y. Building a target reliability adaptive to China onshore natural gas pipeline. In: *Proc. 10th Int. Pipeline Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2014.
18. Lee J.-H., Kim J.-H., Young-Do J., Hyun K.L. Application of target reliability levels for maintenance of domestic natural gas pipelines. *Journal of The Korean Institute of Gas*. 2018; 22 (3): 1–6.
19. Lee J.-H., Young-Do J., Moon J.-S. A Study on establishing target reliability levels for flammable gas transmission pipelines. *Journal of the Korean Institute of Gas*. 2018; 22 (6), 52–58.

20. Gong C., Frangopol D.M., Cheng M. Risk-based life-cycle optimal dry-docking inspection of corroding ship hull tankers. *Engineering Structures*. 2019; 195, 559–567.
21. Nessim M., Zhou W., Zhou J., Rothwell B., McLamb M. Target reliability levels for design and assessment of onshore natural gas pipelines. In: *Proc. 5th Biennial Int. Pipeline Conference: Compression and Pump Technologies; Corrosion; Design and Construction; Environmental Issues; GIS/Database Development; Innovative Projects and Emerging Issues*. American Society of Mechanical Engineers, Calgary, Alberta, Canada, 2004. Pp. 2501–2512.
22. Kurason O.A. Substantiation of methods of improving safety of pipeline gas transportation. *E3S Web of Conferences: Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. Vol. 266, Saint-Petersburg, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601012. EDN: VJQECF

Сведения об авторах

Курасов Олег Александрович, аспирант, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, oak18@tpu.ru

Бурков Пётр Владимирович, докт. техн. наук, ст. научный сотрудник, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2; профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, burkovpv@mail.ru

Authors Details

Oleg A. Kurason, Research Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, oak18@tpu.ru

Petr V. Burkov, DSc, Professor, Senior Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia; National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, burkovpv@tpu.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

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

Статья поступила в редакцию 11.02.2024
Одобрена после рецензирования 21.02.2024
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 11.02.2024
Approved after review 21.02.2024
Accepted for publication 01.03.2024