

НАДЕЖНОСТЬ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ: СТАНОВЛЕНИЕ, РАЗВИТИЕ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

УДК 622.691

В.В. Харионовский, д.т.н., проф., акад. РАН,
ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (Москва, РФ), v_kharionovsky@mail.ru

В статье представлен краткий анализ работ по надежности магистральных газопроводов в начальный период создания газовой промышленности и показаны отдельные задачи в области прочностных расчетов, разработки технических условий на трубы и сварные соединения. Дан обзор развития газотранспортной системы за счет освоения Западной Сибири, Крайнего Севера, Средней Азии, южных регионов и экспортных коридоров, обоснованы новые проблемы исследования надежности эксплуатации газопроводов в сложных природно-климатических условиях. Сформулированы задачи оценки устойчивости газопроводов в болотах, мерзлых грунтах, защиты от коррозии в агрессивных почвах, работоспособности подводных, автомобильных и железнодорожных переходов, перемычек, вибраций надземных газопроводов. Выдвинута концепция конструкционной надежности магистральных газопроводов и представлены основные направления исследований, включающие разработку теоретических основ и методов надежности в эксплуатации, в том числе проблемы ресурса, экспериментальные и натурные обследования, анализ работоспособности газопроводов при наличии дефектов, формирование методов и средств диагностики как инженерной составляющей надежности, постановку задач надежности морских газопроводов и создание комплекса нормативных документов.

Показано решение ряда основных задач, например устойчивости газопроводов в непроектном положении, разработки внутритрубных дефектоскопов, создания опытно-промышленных полигонов. Рассмотрена проблема оценки ресурса газопроводов и их работоспособности при больших сроках эксплуатации. Специальное внимание уделено исследованиям труб как основным элементам анализа надежности и приведены результаты испытаний высокопрочных труб и труб, стойких к стресс-коррозии. Рассмотрена концепция надежности газопровода в целом как составная часть системы управления техническим состоянием и целостностью магистральных газопроводов. Подчеркнуто, что за последние 40 лет в отрасли создано новое направление надежности магистральных газопроводов, разработки которого способствуют устойчивому функционированию газотранспортной системы ПАО «Газпром» на уровне высоких международных требований по безопасной эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МАГИСТРАЛЬНЫЙ ГАЗОПРОВОД, НАДЕЖНОСТЬ, РАБОТОСПОСОБНОСТЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ, СТАНОВЛЕНИЕ, РАЗВИТИЕ.

Магистральные газопроводы (МГ) представляют собой разветвленные линейные сооружения, как правило, большого диаметра, транспортирующие природный газ с высокими давлениями 7,5–11,8 МПа в различных природно-климатических условиях и относящиеся к опасным производственным объектам. В начальный период газопроводы функционировали в Европейской части России и для их проектирования и строительства Всесоюзным научно-исследовательским

институтом по строительству и эксплуатации трубопроводов, объектов ТЭК были разработаны необходимые требования. Специальными под руководством профессоров М.П. Анучкина и А.Г. Мазеля были сформулированы технические условия на трубы и сварные соединения; основы прочностных расчетов и методики были разработаны А.Г. Камерштейном, В.В. Рождественским и А.Б. Айнбиндером; расчеты многопролетных надземных трубопроводов были выполнены

И.П. Петровым, В.В. Спиридоновым, а динамические расчеты – А.С. Гехманом и М.С. Герштейном [1–4]; обобщение материалов по трубопроводам показано в работах профессора П.П. Бородавкина [5].

В 1970–1980-е гг. география газовой отрасли значительно расширилась за счет освоения территорий Западной Сибири и Средней Азии и строительства мощных транзитных газопроводов диаметром 1020–1420 мм («Бухара – Урал», «Средняя Азия – Центр», «Уренгой – Помары – Ужгород»,

V.V. Kharionovskiy, Doctor of Sciences (Engineering), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Gazprom VNIIGAZ LLC (Moscow, Russian Federation), v_kharionovskiy@mail.ru

Reliability of main gas pipelines: formation, development and modern situation

The article presents a brief summary of works considering main gas pipelines' reliability in the beginning period of gas industry's formation and also the separated purposes in area of strength calculations, technical conditions for pipes and welding joints. The brief of gas-transport system's development due to reclamation of the Western Siberia, Far North, Middle Asia, south regions and export corridors is presented hereby and also new problems of research of pipeline's operation period's reliability in difficult natural and climatic conditions are also proved. The estimation's problems of the stability of the gas pipelines in swamps and frozen grounds, of the corrosion protection in the aggressive grounds, the efficiency of underwater, automotive and railway crossings, jumpers, vibrations of overhead gas pipelines are presented in the article. The conception of construction reliability of gas pipelines and the main research's directions, including theoretical basis and reliability's methods, and also problem of resource, experimental and full-scale examination, analysis of gas pipeline efficiency with the presence of defects, forming of methods and diagnostic instruments as engineering part of reliability, problem statement of reliability of the sea gas pipelines and creation of base of regulatory documents are formed hereby.

Solving a number of the main tasks, for example, the stability of the gas pipelines in non-project conditions, development of in-tube defectoscopes, creation of industrial landfills, is considered. The problem of the estimation of gas pipeline's source and its efficiency during long lasting exploitation periods is discussed. Special attention is paid for pipe's research as the main elements of analysis of reliability and the testing results of high-strength and pipes which are stable for stress-corrosion. The concept of gas pipeline reliability is considered as a component part of technical control system and wholeness of main gas pipelines. It is mentioned, that during the last 40 years in the gas industry the new direction of reliability of main gas pipelines has been created and its development supports a stable operation of gas transportation system of Gazprom PJSC at the level of international requirements of safe exploitation.

KEYWORDS: MAIN GAS PIPELINE, RELIABILITY, EFFICIENCY, DIAGNOSTICS, FORMATION, DEVELOPMENT.

«Ямбург – Западная граница» и др.), протяженность которых достигала 3–4,5 тыс. км. При этом трассы газопроводов проходили в агрессивных почвенных условиях, например в солончаках плато Устюрт, многолетнемерзлых грунтах, болотах, пересекали водные преграды большой протяженности (р. Волга, Кама, Обь) и горные участки в Краснодарском крае.

Перед службами эксплуатации встали новые задачи обеспечения надежности газопроводов в сложных условиях, включая защиту от коррозии, устойчивость в слабонесущих и мерзлых грунтах, решение вопросов прочности и защиты от вибраций надземных газопроводов на Крайнем Севере и подводных переходов, обеспечение работоспособности перемычек, крановых узлов, соединительных деталей при значительных перепадах температур. С увеличением возраста газопроводов происходило накопление различных дефектов в трубах и сварных соединениях, что приводило к росту аварий. В 1989–1990 гг. интенсивность аварий на 1000 км в год состав-

ляла 0,30–0,36 (при среднем европейском показателе 0,14), из которых большая часть приходилась на коррозионные отказы газопроводов Средней Азии. После 1991 г. интенсивность отказов российских газопроводов составила 0,22–0,25, что было значительно выше показателей для газопроводов Европы, США и Канады.

Анализируя данную проблему, необходимо отметить, что газопроводы проходят через различные геолого-климатические зоны, при этом остается единство требований к объектам – надежная поставка газа потребителю. Нагрузки и воздействия на газопроводы имеют широкий спектр и включают, с одной стороны, поддающиеся аналитическому описанию (давление и температуры газа, вибрационные нагрузки на трубопроводы компрессорных станций, ветровые нагрузки на надземные трубопроводы, гидродинамические воздействия на подводные переходы), а с другой, специальные нагрузки от мерзлых и просадочных грунтов, оползней, карстов и других природных и техногенных явлений. Газопро-

воды являются металлоемкими сооружениями, поскольку имеют огромное число труб, сварных соединений и соединительных деталей. В зависимости от категорий на участках трасс используются трубы с различной толщиной, разными механическими свойствами, и оценка их работоспособности основывается на статистических законах [6]. При строительстве и в процессе эксплуатации газопроводов наблюдается присутствие и развитие различного рода дефектов, возможное изменение механических свойств, осуществляется ремонт различных участков, что выдвигает задачу оценки срока службы и ресурса.

Что касается газотранспортной системы (ГТС), то следует отметить ее активное развитие и большие масштабы. Так, к настоящему времени число газопроводов большого диаметра приближается к 180 тыс. км. Построены и успешно эксплуатируются морские газопроводы, в том числе не имеющий аналогов двухниточный газопровод «Голубой поток» и наибольший по протяженности «Северный поток». При этом от-

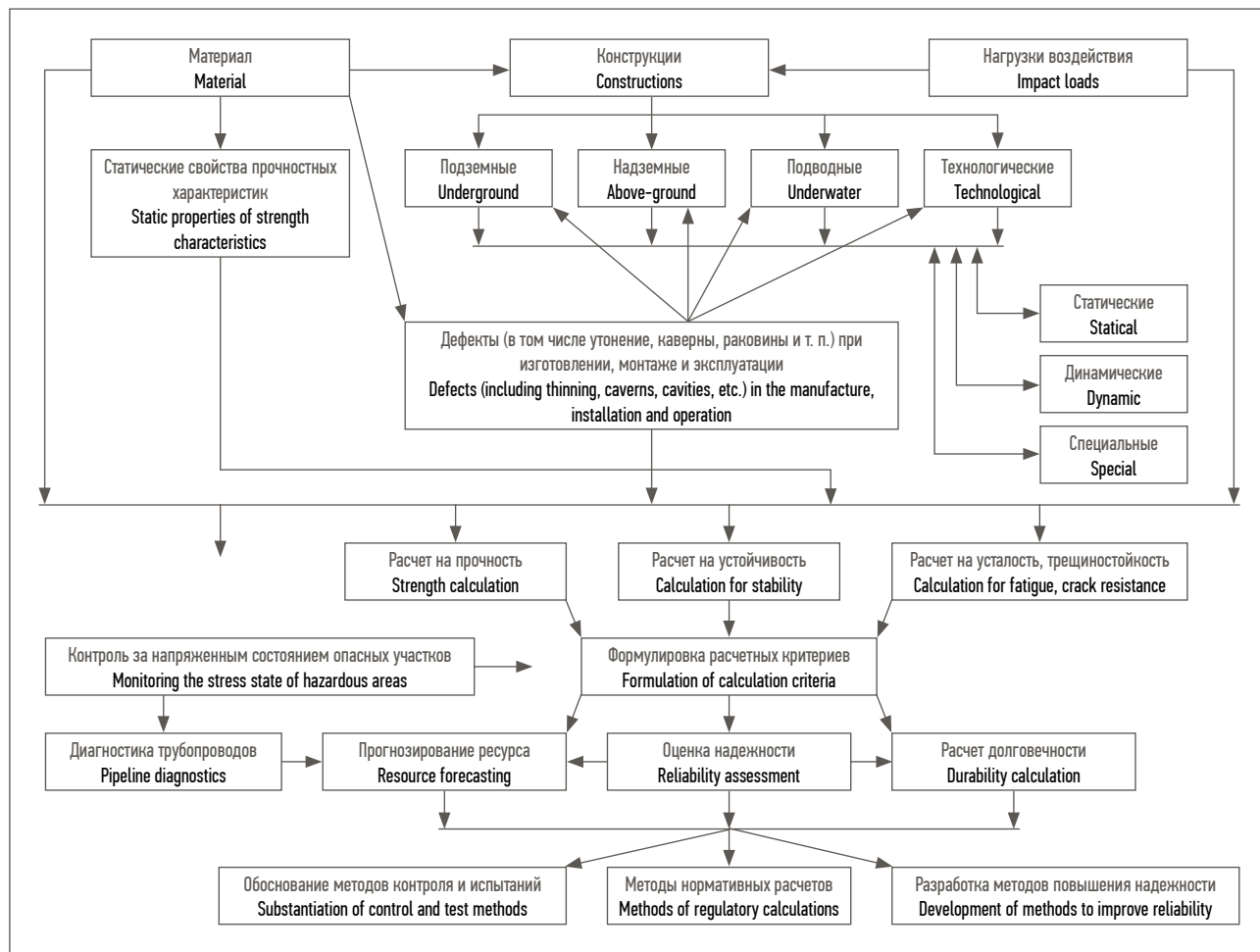


Рис. 1. Концепция конструкционной надежности МГ
Fig. 1. Concept of structural reliability of main gas pipelines

личительной особенностью ГТС является ее функционирование в едином технологическом режиме. Для обеспечения успешной эксплуатации масштабной, не имеющей мировых аналогов системы МГ потребовалось разработать новое научное направление, а именно, конструкционную надежность, и такая работа была проведена в отрасли с использованием потенциала специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ» начиная с 1975 г. [7].

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ МГ

На первом этапе разработана концепция надежности (рис. 1), в которой представлены основные типы газопроводов с учетом статистических свойств металла труб, сварных соединений, соединитель-

ных деталей, наличия дефектов и комплексом нагрузок и воздействий. В зависимости от конструкции и условий эксплуатации выполняются расчеты на прочность, устойчивость, усталость, на основе которых производятся оценки надежности и прогнозирование ресурса, разрабатываются нормативно-технические документы по обеспечению надежности. Особое место в концепции занимает диагностика как составляющая надежности, для проведения которой разработаны соответствующие методы [8].

При исследовании надежности в методическом плане разрабатывают конструктивную и системную надежность (рис. 2).

В сферу системной надежности входят поставки газа, стратегия развития и реконструкция, тогда

как в задачи конструкционной надежности входят снижение аварийности, оценка срока службы, анализ отказов с применением методов диагностики и ремонта. В принципе конструкционная и системная надежность взаимосвязаны (см. рис. 2). Так, решая задачу конструкционной надежности по оценке работоспособности участков газопроводов (разрешенное давление и срок службы), можно определять пропускную способность и технически возможную производительность, а планируя объемы диагностических и ремонтных работ, можно оценить недоподачу газа и соответствующие финансовые затраты.

В аналитическом плане задачи конструкционной и системной (технологической) надежности обычно изучаются автономно,

поскольку для решения используются различные модели и методы. Например, для технологических задач в качестве основных рассматриваются модели надежности систем с восстановлением и резервированием и модели расхода газа. Из методов надежности, как правило, применяются методы теории марковских процессов, методы теории восстановления и системного анализа, а также графоаналитические методы теории надежности больших систем. В то же время для анализа конструкционной надежности используются физические и статистические модели механических отказов, модели деформирования и разрушения, физико-механические и вероятностные модели нагрузок и воздействий, а также методы случайных процессов, кумулятивные оценки отказов и т. п. [6]. По-видимому, на современном этапе требуется создать единую теорию надежности ГТС, исходя из главной цели обеспечения поставок газа потребителю.

Исследования конструкционной надежности проводились в рамках отраслевых программ «Диагностическое обслуживание и повышение надежности МГ, объектов добычи и переработки газа», «Обеспечение надежности газопроводов в условиях слабонесущих грунтов Севера и Западной Сибири», «Повышение технологической безопасности и устойчивости функционирования объектов РАО «Газпром» и в плановых работах ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [9–16].

Основные направления исследований включали: разработку теоретических основ и методов обеспечения надежности газопроводов в эксплуатации, в том числе проблемы ресурса и управления техническим состоянием; экспериментальные и натурные обследования потенциально-опасных участков газопроводов; прикладные исследования трубопроводов с дефектами, в том числе в условиях стресс-корро-

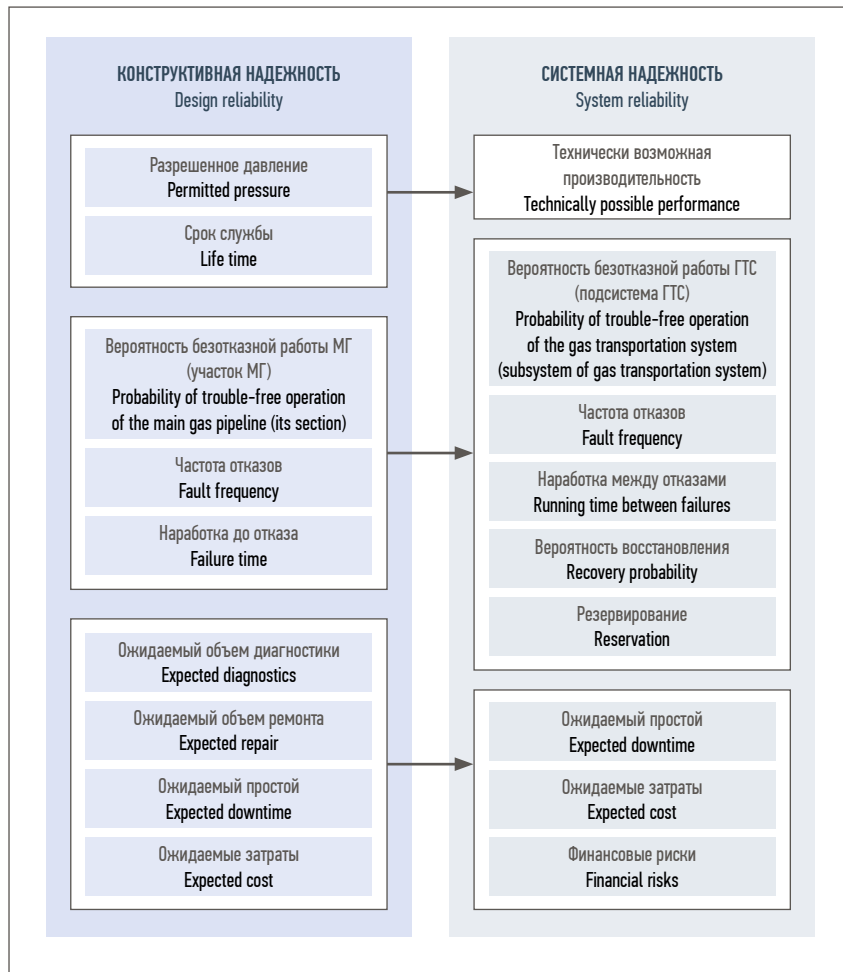


Рис. 2. Взаимодействие конструктивной и системной надежности
Fig. 2. Interaction of design and system reliability

зии; разработку методов и средств диагностики технического состояния; исследование надежности морских газопроводов; масштабные испытания высокопрочных труб; разработку нормативно-технической документации в области надежности эксплуатируемых газопроводов.

Особое внимание было уделено созданию специальных исследовательских полигонов и проведению натурных обследований. Например, для анализа работоспособности различных способов прокладки трубопроводов в мерзлых грунтах в 1987 г. в Норильском промышленном регионе был сооружен опытно-промышленный участок газопровода диаметром 1420 мм протяженностью 5 км с четырьмя видами конструкций (рис. 3).

Показаны надземный участок на свайных опорах, наземный участок на поверхностных опорах, подземный и участок в обваловании (см. рис. 3). В течение восьми лет на опытно-промышленном участке, устроенном в виде лупинга, проводились измерения деформаций, колебаний, пучения и просадок грунтов, давлений и температур газа, что позволило разработать рекомендации для строительства газопроводов на п-ове Ямал, Ямбургском и Заполярном месторождениях и др. [9, 12–14, 17]. Натурные полигоны были созданы и для исследования конструкций свайных опор (Норильский регион), измерений напряженно-деформированного состояния (коллектор диаметром 1420 мм на Уренгойском газоконденсатном месторождении),

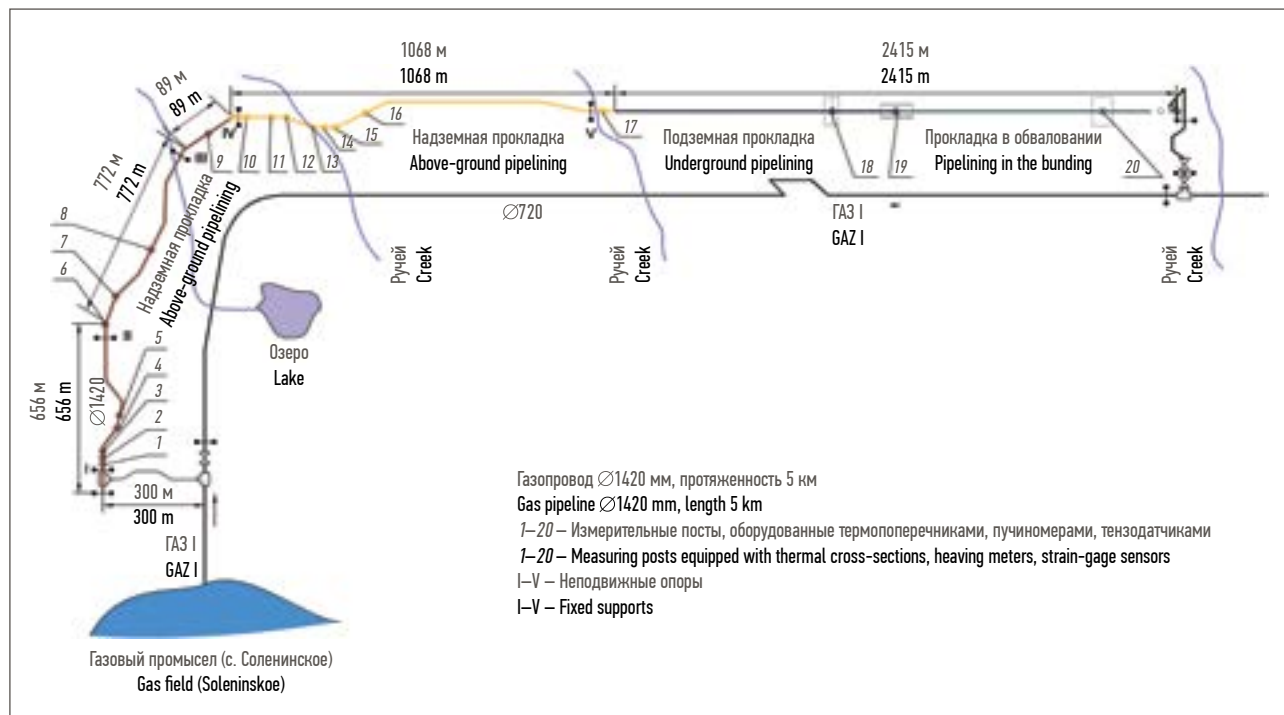


Рис. 3. Принципиальная схема опытно-промышленного участка
Fig. 3. Schematic diagram of the pilot area

анализа нагрузок от трубопроводов на газоперекачивающие агрегаты опытно-промышленной компрессорной станции (КС) «Грязовец», оценки работоспособности трубопроводов с дефектами технологической обвязки КС «Юбилейная», анализа безопасной эксплуатации 9-ниточных подводных переходов через р. Кама в условиях оползней и карста [10, 18–21].

Рассмотрим отдельные задачи более подробно. Большое значение получила проблема устойчивости газопроводов в условиях болот Западной Сибири и севера Европейской части России.

УСТОЙЧИВОСТЬ ГАЗОПРОВОДОВ В НЕПРОЕКТНОМ ПОЛОЖЕНИИ

Основные МГ проложены от месторождений севера Тюменской области и Европейской части России и пересекают на значительной территории заболоченные участки. В сложных условиях строительства, с одной стороны, затруднительно выполнить все нормативные требования, а с другой, как показал анализ, су-

ществующие нормативные руководства недостаточно отражали реальное взаимодействие газопроводов с обводненными грунтами, что приводило к потере устойчивости и возникновению всплывших участков и арочных выбросов при эксплуатации [7].

Перед исследователями появились две основные задачи, одна из которых связана с разработкой усовершенствованных методов расчета устойчивости для вновь проектируемых газопроводов, а решение второй задачи должно дать ответ на вопрос о возможности эксплуатации всплывших участков и разработке критериев, определяющих вывод участка в ремонт, или контроль за его состоянием. Специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» выполнен комплекс натуральных исследований на участках в непроектном положении с применением тензометрических и геодезических измерений в течение нескольких летне-зимних сезонов и разработаны методы расчетов прочности и устойчивости таких участков [7, 22].

Схема оценки работоспособности участков газопроводов с арками приведена на рис. 4, где указаны допускаемые напряжения в наиболее опасных сечениях арок и даны рекомендации по безопасной эксплуатации таких участков.

На основе этих исследований в отрасли была разработана программа по обеспечению устойчивости всплывших участков газопроводов Западной Сибири, реализация которой позволила повысить надежность эксплуатации северных газопроводов.

ДИАГНОСТИКА ГАЗОПРОВОДОВ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ НАДЕЖНОСТИ

Система МГ, насчитывающая свыше 170 тыс. км, требует современного контроля технического состояния. С увеличением возраста газопроводов и из-за эксплуатации в сложных природно-климатических условиях происходит образование и развитие дефектов: общая, локальная и подпленочная коррозия; коррозийное растрескивание под напряжением (КРН); ухудшение

25-я Юбилейная международная выставка
технических средств охраны
и оборудования для обеспечения
безопасности и противопожарной защиты



Москва

19–22
марта
2019г.

ЦВК «Экспоцентр»



Видеонаблюдение



Контроль
доступа



Охрана
периметра



Противопожарная
защита



Сигнализация
и оповещение



Автоматизация
зданий



Организатор
Группа компаний ITE
+7 (499) 750-08-28
security@ite-expo.ru



Получите бесплатный электронный
билет, указав промокод **sec19iAGFZ**
securika-moscow.ru

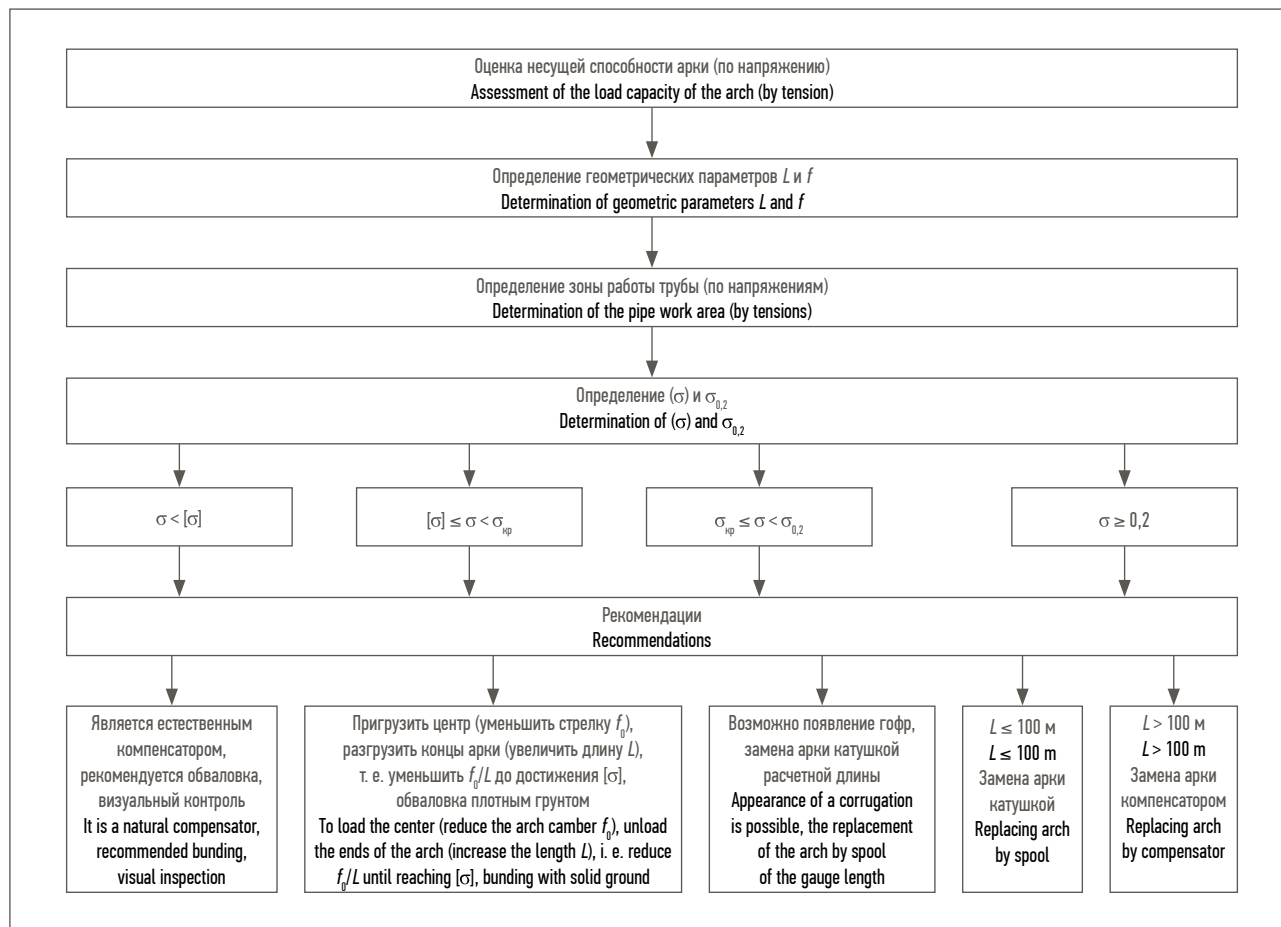


Рис. 4. Схема оценки прочности и контроля участков газопроводов с арками: σ – напряжение, МПа; $[\sigma]$ – допускаемое нормативное напряжение, МПа; $\sigma_{кр}$ – критическое напряжение из расчета на устойчивость, МПа; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести, МПа; L – длина арки, м; f – высота арки, м

Fig. 4. Scheme of strength assessment and control of gas pipeline sections with arches: σ – voltage, MPa; $[\sigma]$ – allowable standard voltage, MPa; $\sigma_{кр}$ – critical stress based on stability, MPa; $\sigma_{0,2}$ – yield point, MPa; L – arch length, m; f – arch height, m

служебных характеристик металла труб (снижение предельной деформации на 20–50 %, снижение показателей трещиностойкости до 50 %); накопление усталостных повреждений, зарождение и рост дефектов; разрушение изоляционного покрытия; изменение внешних условий вдоль трассы и нарушение проектного положения.

Среди них видны дефекты коррозионного и стресс-коррозионного характера, а также механические повреждения, разрушение пленочного покрытия и изменение положения отдельных участков газопроводов.

Необходимо отметить значительное развитие диагностических средств и создание централизованной инспекции ГТС

ПАО «Газпром» за сравнительно короткий период. Если в 1980–е гг. диагностические работы носили эпизодический характер, то уже в 1994 г. начала действовать Программа «Комплексная система диагностики и технической инспекции магистральных газопроводов России», разработанная на основе аналитических и натурных исследований и анализа международного и отечественного опыта. Большая роль в развитии диагностики отведена работам специалистов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», которые впервые в отрасли применили эффективный метод тензометрирования, позволяющий определять напряженно-деформированное состояние в потенциально-опасных участках газопроводов [23].

С применением этого метода были обследованы участки северных газопроводов в Норильске, Уренгое, на трассах «Ухта – Торжок», всплывших участках газопроводов Западной Сибири, технологических трубопроводах дожимной компрессорной станции «Газли», КС «Хива», «Юбилейная», «Грязовец» и т. д. На основе этих работ специалистами АО «Газпром оргэнергогаз» метод был автоматизирован, разработаны интеллектуальные вставки, поставляющие непрерывную информацию о техническом состоянии участков газопроводов в различных регионах, в том числе на сухопутном участке газопровода «Голубой поток» и на 9-ниточном переходе газопроводов через р. Кама.

Основным методом обследования подземных газопроводов выступает внутритрубная диагностика. Первые разработки в этой области, начиная с 1976 г., выполнили специалисты Свердловского отдела ВНИИГАЗ, что позволило к настоящему времени получить современные отечественные внутритрубные дефектоскопы высокого разрешения, которые применяют российские компании «Спецнефтегаз», АО «Газприбор-автоматика сервис» и др. [8].

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ОЦЕНКА РЕСУРСА МГ

Наряду с развитием инструментальных средств большое значение имеет оценка опасности выявленных дефектов, что потребовало разработки специальных аналитических методов и нормативных документов. В этом направлении специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» был выполнен ряд научно-исследовательских работ, включающих расчетные и натурные исследования, которые опубликованы в серии трудов [9–16] и по результатам которых были разработаны нормативно-методические документы по оценке работоспособности газопроводов с дефектами овализации, утонения, гофр, трещин и т. п. [17–20, 23]. В качестве одного из примеров можно привести работу по исследованию работоспособности обвязки трубопроводов КС «Юбилейная», где на одном из участков имелись цепочки поверхностных дефектов [8]. Для анализа работоспособности данный участок был вырезан из обвязки и испытан на циклические гидравлические нагрузки на различных уровнях давления с проведением тензоизмерений. По результатам испытаний были выполнены прочностные расчеты и определены фактические механические свойства металла труб. Комплексный анализ позволил выявить реальную работоспособность технологических трубопроводов КС при наличии групповых

дефектов и разработать соответствующую методику [19].

С увеличением возраста газопроводов с учетом имеющихся дефектов стала актуальной проблема оценки сроков их безопасной эксплуатации и анализа ресурса, в том числе после ремонта. При исследовании этой проблемы учтены следующие особенности: газопроводы являются масштабными, протяженными системами и для оценки ресурса нужно уметь выявлять потенциально опасные участки; это системы с восстановлением, т. е. после проведения ремонта необходимо применять специальные методы оценки ресурса; при оценке ресурса следует учитывать нерасчетные (в проектах) нагрузки и воздействия, возникающие в процессе эксплуатации, а также анализировать возможные изменения механических свойств металла труб и сварных соединений, например определенную потерю пластичности.

Проведен комплекс исследований, опубликованных в научных трудах [11, 15, 16], по результатам которых были разработаны нормативные документы, определяющие порядок продления ресурса и сроков безопасной эксплуатации на этапах проектирования и эксплуатации [25–29].

Отдельной задачей в исследовании газопроводов выступает оценка их работоспособности при больших сроках эксплуатации. Здесь необходимо учитывать изменения механических свойств металла и анализировать традиционные методы расчетов прочности, которые базируются на применении строительных норм и правил, использующих ряд условных расчетных коэффициентов. Было показано [30], что корректную оценку работоспособности нужно производить, исходя из уточненного критерия прочности в эксплуатации, в котором фактические максимальные напряжения сравниваются с конкретными механическими

характеристиками труб, получаемыми путем натуральных измерений.

ТРУБЫ КАК ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

При анализе конструкционной надежности основными элементами являются трубы, и обеспечение их работоспособности в газопроводах для различных регионов, с разными способами прокладки и высокими давлениями газа представляет собой актуальную проблему. При выборе труб исследователи сталкиваются с ситуацией, когда, с одной стороны, нужно создать безопасную ГТС, т. е. получить достаточный запас прочности и живучести, а с другой, сооружение протяженных газопроводов должно быть экономичным проектом, поэтому трубы, составляющие 35–45 % затрат, не могут быть очень дорогими. При этом технологически выгодно повысить давление газа для увеличения пропускной способности, но для этого необходимо применять высокопрочные трубы более высокой стоимости.

В процессе длительной эксплуатации газопроводов преобладающими стали дефекты коррозионного и стресс-коррозионного характера, и для анализа их происхождения и развития потребовалось проведение аналитических и экспериментальных исследований [7]. Считается, что стресс-коррозия, или КРН, возникает, когда взаимодействуют несколько факторов: технология производства труб; уровень напряженно-деформированного состояния газопровода (как правило, не ниже 0,4 от предела текучести); окружающая грунтовая среда. Ввиду масштабности проблемы в ПАО «Газпром» и ведущих компаниях Канады и США начиная с 1990 г. были сформированы специальные программы, которые охватывали исследования металла труб, их склонность

к образованию и развитию трещин, натурные обследования газопроводов и разработку диагностических средств по обнаружению стресс-коррозии. Специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и трубной компанией JFE Steel Corporation (Япония) были выполнены исследования стойкости трубных сталей к стресс-коррозии с применением различных методов испытаний, выявлены необходимые марки сталей и на этой основе разработан отраслевой нормативный документ [31].

При переходе газопроводов на большие диаметры и высокие давления газа (11,8 МПа) в сложных природных условиях (газопроводы «Бованенково – Ухта», «Сила Сибири») потребовалось проведение комплексных исследований новых видов высокопрочных труб, включающих полномасштабные натурные испытания протяженных секций труб (>200 м) для оценки протяженности их разрыва. Были разработаны специальные требования к трубам класса прочности K65 и программа испытаний, в которую входили стандартные заводские испытания на образцах, гидравлические испытания трубы с поверхностным надрезом на разрушение для оценки трещиностойкости и полигонные испытания трубных секций для оценки распространения трещины в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

На полигоне, созданном специалистами ПАО «Газпром» и ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» [32], были организованы режимы охлаждения труб до -20°C



Рис. 5. Испытания высокопрочных труб
Fig. 5. High-strength pipes testing

(требования проекта), система сбора и обработки информации от датчиков температур, давления, скорости движения трещины. В качестве одного из примеров на рис. 5 представлены испытания труб производства Ижорского трубного завода и JFE Steel Corporation. В результате была показана высокая надежность высокопрочных труб и обосновано их применение в современных газопроводах.

Особые требования в области надежности предъявляются к морским газопроводам [34]. Сооружение газопровода «Голубой поток» стало уникальным событием для мировой практики морских газопроводов. Российским специалистам потребовалось решить комплекс новых научно-технических задач. В ПАО «Газпром» разработана трехлетняя программа научного обоснования проекта, в которой под руководством ООО «Газпром ВНИИГАЗ» были задействованы десятки институтов Российской академии наук, вузов и специализированных организаций. Рассмотрены новые аналитические задачи по смятию глубоководных трубопроводов, коррозионной стойкости, устойчивости при наличии свободных пролетов на дне, расчетам напряженно-деформированного состояния при укладке на большие глубины (>2000 м), гидравлических и температурных режимов газопровода при бескомпрессорной транспортировке газа на большие расстояния (~400 км), оценке надежности и безопасности, а также технологий диагностики и ремонта на больших глубинах. Одной из задач стало изучение работоспособности труб в условиях сероводорода в Черном море, больших давлений воды и высокого давления (25,4 МПа) газа. С этой целью проведены натурные испытания элементов труб и фитингов в характерных участках Черного моря.

Кроме того, организованы комплексные испытания труб нового



Рис. 6. Испытание на изгиб обетонированной трубной секции
Fig. 6. Bending test of a section of concrete weight coated pipe

класса на заводах-изготовителях России, Японии, Германии. По результатам исследований и после рецензирования проекта ведущей компанией Det Norske Veritas (Норвегия) было осуществлено строительство газопровода, начиная с 2003 г. газ по «Голубому потоку» поставляется без перебоев в Турцию. На мелководных участках морских газопроводов, на переходах через реки и в болотистой местности эффективным мероприятием оказалось применение обетонированных труб. Для обоснования их надежности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и Московского трубозаготовительного комбината проведен комплекс натурных исследований, в который вошли испытания труб на изгиб и удар для оценки целостности бетонной оболочки, на сдвиг для анализа отсутствия смещения бетона относительно металлической трубы. Для определения напряженно-деформированного состояния газопровода при укладке в море и величины допустимого радиуса упругого изгиба выполнены испытания на изгиб трубной секции длиной 60 м и диаметром 1020 мм (рис. 6).

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ МГ

Задачи управления техническим состоянием МГ активно обсуждаются последние 15 лет, и их решения, основанные на различных методах теории надежности и риска, оптимизационных оценках и процессах управления,

16-я Международная выставка
нефтегазового оборудования и технологий

НЕФТЬ И ГАЗ / MIOGE

23–26 апреля 2019
Москва · Крокус Экспо

РОССИЙСКИЙ
НЕФТЕГАЗОВЫЙ
КОНГРЕСС / RPGC

mioge.ru

564

участника

36

стран

17 575

посетителей

55

мероприятий
деловой
программы

Организатор

ITE Москва
+7 (499) 750 0828
oil-gas@ite-expo.ru



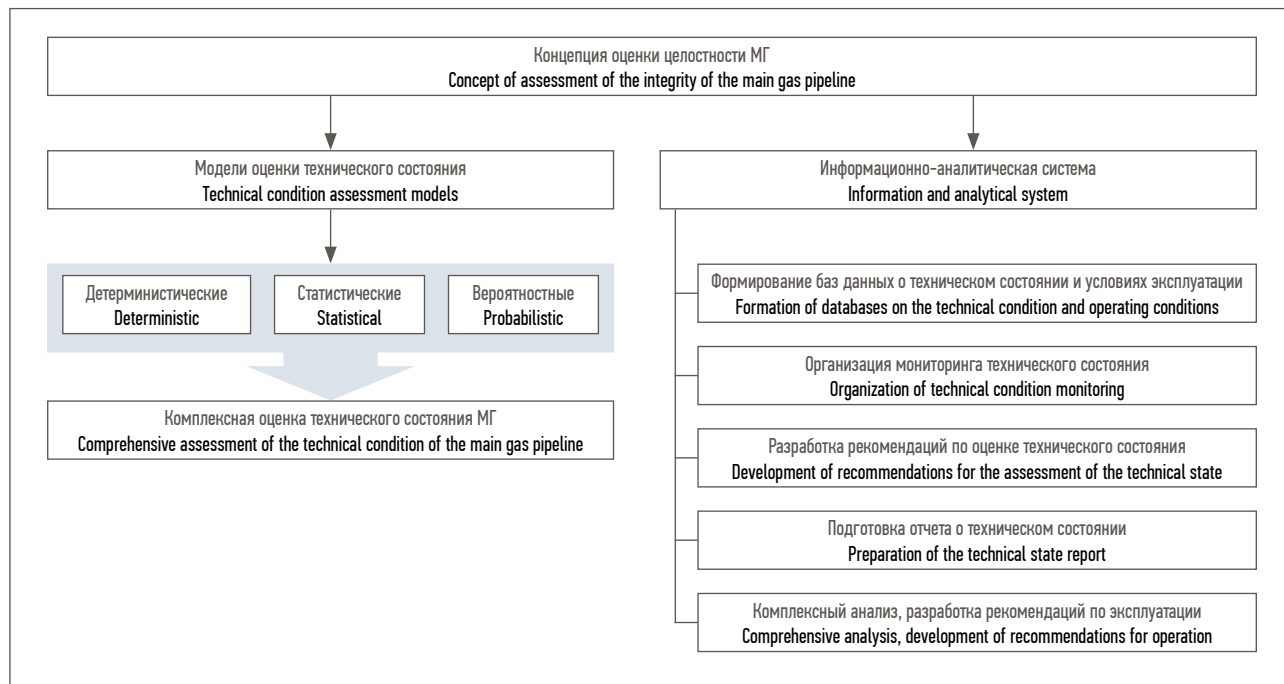


Рис. 7. Схема концепции целостности МГ
Fig. 7. Diagram of the concept of integrity of the main gas pipeline

направлены на эффективность и безопасность функционирования ГТС на базе принципа эксплуатации по назначению, т. е. исходя из технико-экономической целесообразности работы какого-либо газопровода или его отдельных участков. В концепции управления техническим состоянием, разработанной специалистами ПАО «Газпром» и ООО «Газпром ВНИИГАЗ» с привлечением специализированных организаций, сформированы главные цели, среди которых отмечено обеспечение надежности процесса транспортировки и хранения газа, структурной целостности и заданного уровня технического состояния объектов Единой системы газоснабжения [8, 33]. Принципиальная схема концепции целостности и управления техническим состоянием представлена на рис. 7, где обозначены подходы к оценке технического состояния, в том числе вероятностные, а также сведения о формировании информационно-аналитической системы текущего и прогнозируемого технического состояния.

Необходимо отметить, что для отечественной ГТС, не имеющей аналогов по масштабу и сложности трасс и работающей в едином технологическом режиме, потребовалось разработать оригинальную концепцию, принципиально отличающуюся от систем управления сравнительно небольшими ГТС, например в ФРГ, Голландии, Великобритании.

Важное значение с позиции надежности имеет задача о надежности газопровода в целом. Для планирования работ по обеспечению надежности эксплуатации ГТС сформирована концепция, приведенная на рис. 8. Основная цель концепции состоит в следующем. При централизованном планировании вывод на требуемый уровень надежности должен осуществляться для всего газопровода, независимо от числа предприятий, эксплуатирующих его отдельные участки или участки в коридоре газопроводов. На рис. 8 показаны сценарии по надежности в зависимости от того, находится ли газопровод в обслуживании одного или нескольких трансгазов. Видно, что

в одном случае на первое место выходят задачи конструкционной надежности (сценарий 1), а в другом – совместные задачи технологической и конструкционной надежности (сценарий 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В газовой промышленности за последние 40 лет сформировано новое направление конструкционной надежности, включающее задачи системного анализа работоспособности газопроводов, инженерные разработки по обеспечению их безопасной эксплуатации и создание нормативно-методической документации.

Для обеспечения надежности эксплуатации газопроводов в сложных природно-климатических условиях были проведены специальные аналитические, экспериментальные и полигонные исследования прочности, устойчивости, несущей способности и оценки ресурса, разработаны методы и средства диагностики и создана централизованная система инспекции МГ.

Комплексные работы по надежности эксплуатации МГ позволили

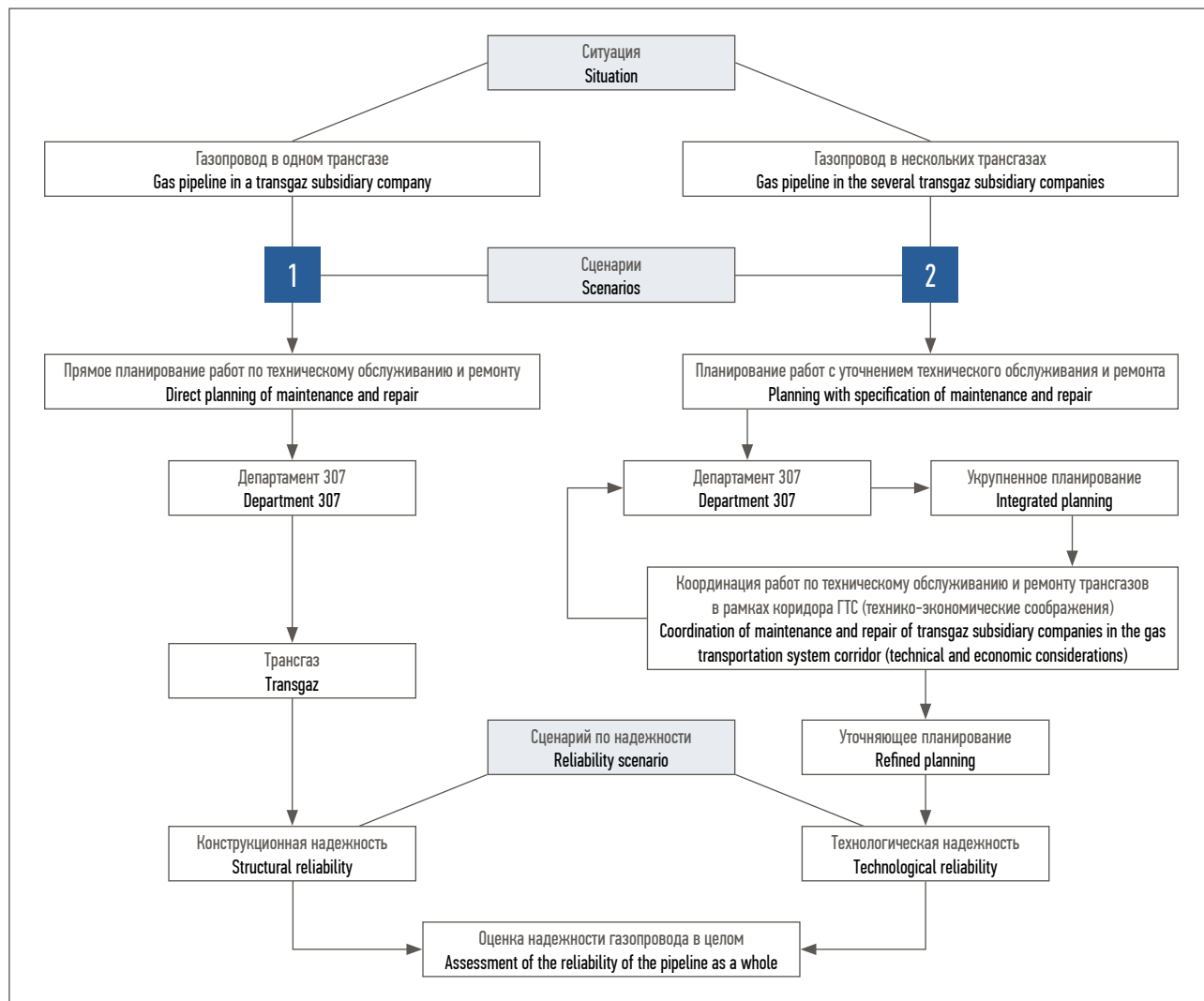


Рис. 8. Схема подхода к оценке надежности газопровода в целом
Fig. 8. Diagram of the approach to assessment of the reliability of the pipeline as a whole

обеспечить высокую надежность ГТС с минимальным количеством отказов на уровне международных требований.

На основе работ по надежности в отрасли сформирована система управления техническим состоянием ГТС, обеспечивающая

устойчивое функционирование Единой системы газоснабжения по поставкам газа потребителям.

На современном этапе требуется решать новые задачи конструктивной надежности, которые будут нацелены на исследования

работоспособности газопроводов с большими сроками эксплуатации, устойчивости газопроводов нового поколения в Арктической зоне и на континентальном шельфе, а также на разработку инженерных решений по безопасной эксплуатации МГ. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Анучкин М.П. Прочность сварных магистральных газопроводов. М.: Гостехиздат, 1963. 196 с.
2. Камерштейн А.Г., Рождественский В.В., Ручимский Н.Н. Расчет трубопроводов на прочность. М.: Недра, 1969. 440 с.
3. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1982. 341 с.
4. Петров И.П., Спиридонов В.В. Надземная прокладка трубопроводов. М.: Недра, 1973. 470 с.
5. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы. М.: Энерджи Пресс, 2011. 480 с.
6. Харионовский В.В. Стохастические методы в задачах для магистральных трубопроводов // Известия РАН. Механика твердого тела. 1996. № 3. С. 110–116.
7. Харионовский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 464 с.
8. Салюков В.В., Харионовский В.В. Магистральные газопроводы. Диагностика и управление техническим состоянием. М.: Недра, 2016. 213 с.
9. Проблемы надежности газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ, 1991. 169 с.
10. Вопросы надежности газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ, 1993. 110 с.
11. Проблемы ресурса газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ, 1995. 180 с.
12. Надежность и диагностика газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ, 1996. 200 с.
13. Проблемы надежности конструкций газотранспортных систем. М.: ВНИИГАЗ, 1998. 272 с.

14. Надежность газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ, 2000. 265 с.
15. Надежность и ресурс газопроводных конструкций. М.: ВНИИГАЗ, 2003. 425 с.
16. Проблемы системной надежности и безопасности транспорта газа. М.: ВНИИГАЗ, 2008. 328 с.
17. Методические рекомендации по расчетам конструктивной надежности магистральных газопроводов. М.: ИРЦ Газпром, 1997. 126 с.
18. Методические рекомендации по оценке работоспособности трубопроводов с дефектами овализации. М.: ВНИИГАЗ, 1996. 34 с.
19. Рекомендации по оценке работоспособности участков газопроводов с поверхностными повреждениями. М.: ВНИИГАЗ, 1996. 20 с.
20. Рекомендации по оценке работоспособности подводных переходов газопроводов при размывах дна. М.: ВНИИГАЗ, 1995. 40 с.
21. Методика расчета технологических трубопроводов компрессорных станций. М.: ВНИИГАЗ, 1987. 94 с.
22. Рекомендации по оценке несущей способности участков газопроводов в непроектном положении. М.: ВНИИГАЗ, 1986. 53 с.
23. Методические рекомендации по натурным измерениям напряженного состояния магистральных газопроводов. М.: ВНИИГАЗ, 1985. 43 с.
24. Методика оценки фактического положения и состояния подземных трубопроводов. М.: ВНИИГАЗ, 1992. 53 с.
25. Силкин В.М., Курганова И.Н. Методика оценки ресурса магистральных газопроводов на этапе проектирования // Проблемы системной надежности и безопасности транспорта газа. М.: ВНИИГАЗ, 2008. С. 48–64.
26. ВРД 39-1.10-043-2001. Положение о порядке продления ресурса магистральных газопроводов ОАО «Газпром» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293800/4293800146.htm> (дата обращения: 18.01.2019).
27. Методика о порядке продления срока безопасной эксплуатации магистральных газопроводов ОАО «Газпром». М.: ВНИИГАЗ, 2005. 58 с.
28. Р Газпром 2-2.1-369-2009. Методические рекомендации по оценке ресурса линейной части магистральных газопроводов на стадии проектирования. М., 2009. 118 с.
29. Временная методика комплексной экспресс-оценки технического состояния и продления срока безопасной эксплуатации линейной части магистральных газопроводов ОАО «Газпром». М.: ВНИИГАЗ, 2006. 36 с.
30. Харионовский В.В. Работоспособность газопроводов с большими сроками эксплуатации // Газовая промышленность. 2017. № 5. С. 56–61.
31. СТО Газпром 2-5.1-148-2007. Методы испытаний сталей и сварных соединений на коррозионное растрескивание под напряжением. М.: ОАО «Газпром», 2007. 44 с.
32. Созонов П.М., Трапезников С.В. Экспериментальные возможности и результаты работы опытного полигона ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» по проведению полигонных пневматических испытаний // Наука и техника в газовой промышленности. 2009. № 1. С. 8–9.
33. Неведов С.В., Панов М.Ю., Силкин В.М., Столов В.П. Совершенствование критериев и расчетных моделей Системы управления техническим состоянием и целостностью линейной части магистральных газопроводов // Тезисы докладов VII Международной научно-технической конференции «Газотранспортные системы: настоящее и будущее». М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2017. С. 65.
34. Васильев Г.Г., Горьяинов Ю.А., Беспалов А.П. Сооружение морских трубопроводов. М.: РГУНГ имени И.М. Губкина, 2015. 200 с.

REFERENCES

1. Anuchkin M.P. Strength of Welded Gas Pipelines. Moscow, Gostoptekhizdat, 1963, 196 p. (In Russian)
2. Kamershtein A.G., Rozhdestvensky V.V., Ruchimsky N.N. Calculation of Pipelines for Strength. Moscow, Nedra, 1969, 440 p. (In Russian)
3. Aynbinder A.B., Kamerstein A.G. Calculation of Pipelines for Strength and Stability. Moscow, Nedra, 1982, 341 p. (In Russian)
4. Petrov I.P., Spiridonov V.V. Above-Ground Pipelining. Moscow, Nedra, 1973, 470 p. (In Russian)
5. Borodavkin P.P. Underground Main Pipelines. Moscow, Energy Press, 2011, 480 p. (In Russian)
6. Kharionovskiy V.V. Stochastic Methods in Problems for Main Pipelines. Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela = News of the Russian Academy of Sciences. Solid Mechanics, 1996, No. 3, P. 110–116. (In Russian)
7. Kharionovskiy V.V. Reliability and Lifetime of Gas Pipeline Constructions. Moscow, Nedra, 2000, 464 p. (In Russian)
8. Salyukov V.V., Kharionovskiy V.V. Main Gas Pipelines. Diagnostics and Technical Control. Moscow, Nedra, 2016, 213 p. (In Russian)
9. Problems of Reliability of Gas Pipeline Constructions. Moscow, VNIIGAZ, 1991, 169 p. (In Russian)
10. Issues of Reliability of Gas Pipeline Constructions. Moscow, VNIIGAZ, 1993, 110 p. (In Russian)
11. Resource Problems of Gas Pipeline Constructions. Moscow, VNIIGAZ, 1995, 180 p. (In Russian)
12. Reliability and Diagnostics of Gas Pipeline Constructions. Moscow, VNIIGAZ, 1996, 200 p. (In Russian)
13. Problems of Reliability of Gas Transportation Systems. Moscow, VNIIGAZ, 1998, 272 p. (In Russian)
14. Reliability of Gas Pipeline Constructions. Moscow, VNIIGAZ, 2000, 265 p. (In Russian)
15. Reliability and Resource of Gas Pipeline Constructions. Moscow, VNIIGAZ, 2003, 425 p. (In Russian)
16. Problems of System Reliability and Safety of Gas Transportation. Moscow, VNIIGAZ, 2008, 328 p. (In Russian)
17. Methodical Recommendations on Calculations of Constructive Reliability of Gas Pipelines. Moscow, Information and Advertising Center of Gazprom, 1997, 126 p. (In Russian)
18. Guidelines for Assessment of the Performance of Pipelines with Ovalization Defects. Moscow, VNIIGAZ, 1996, 34 p. (In Russian)
19. Recommendations for Assessment the Performance of Gas Pipelines with Surface Damages. Moscow, VNIIGAZ, 1996, 20 p. (In Russian)
20. Recommendations for Assessment of the Performance of Underwater Crossings of Gas Pipelines at Bottom Erosion. Moscow, VNIIGAZ, 1995, 40 p. (In Russian)
21. Method of Calculation of Technological Pipelines of Compressor Stations. Moscow, VNIIGAZ, 1987, 94 p. (In Russian)
22. Recommendations for Assessment of the Carrying Capacity of Gas Pipeline Sections in a Non-Design Position. Moscow, VNIIGAZ, 1986, 53 p. (In Russian)
23. Methodical Recommendations for Field Measurements of the Stress State of Gas Pipelines. Moscow, VNIIGAZ, 1985, 43 p. (In Russian)
24. Methods of Assessment the Actual Position and Condition of Underground Pipelines. Moscow, VNIIGAZ, 1992, 53 p. (In Russian)
25. Silkin V.M., Kurganova I.N. Methods of Assessment of the Resource of Gas Pipelines at the Design Stage. Problemy sistemnoy nadezhnosti i bezopasnosti transporta gaza = Problems of System Reliability and Safety of Gas Transportation. Moscow, VNIIGAZ, 2008, P. 48–64. (In Russian)
26. Department Regulation Document VRD 39-1.10-043-2001. Regulations on the Procedure for Extending the Resource of Gas Pipelines of Gazprom OJSC [Electronic source]. Access mode: <http://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293800/4293800146.htm> (access date: January 18, 2019). (In Russian)
27. Methodology on the Procedure for Extending the Period of Safe Operation of Gas Pipelines of Gazprom OJSC. Moscow, VNIIGAZ, 2005, 58 p. (In Russian)
28. Recommendations R Gazprom 2-2.1-369-2009. Guidelines for Assessing the Resource of the Linear Part of Gas Pipelines at the Design Stage. Moscow, 2009, 118 p. (In Russian)
29. Temporary Methodology for the Integrated Rapid Assessment of the Technical State and the Extension of the Period of Safe Operation of the Linear Part of Gazprom OJSC Gas Main Pipelines. Moscow, VNIIGAZ, 2006, 36 p. (In Russian)
30. Kharionovskiy V.V. Efficiency of Gas Pipelines with Long Service Life. Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry, 2017, No. 5, P. 56–61. (In Russian)
31. Company Standard SТО Gazprom 2-5.1-148-2007. Test Methods for Steel and Welded Joints for Stress Corrosion Cracking. Moscow, Gazprom OJSC, 2007, 44 p. (In Russian)
32. Sozonov P.M., Trapeznikov S.V. Experimental Possibilities and the Results of the Pilot Site Work of Gazprom transgaz Ekaterinburg LLC for Field Pneumatic Testing. Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti = Science and Technology in the Gas Industry, 2009, No. 1, P. 8–9. (In Russian)
33. Nefedov S.V., Panov M.Yu., Silkin V.M., Stolov V.P. Improving the Criteria and Computational Models of the Management System for the Technical Condition and Integrity of the Linear Part of Gas Pipelines. Abstracts of VII International Scientific and Technical Conference "Gas Transportation Systems: Present and Future". Moscow, Gazprom VNIIGAZ, 2017, P. 65. (In Russian)
34. Vasiliev G.G., Goryainov Yu.A., Bepalov A.P. Construction of Offshore Pipelines. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2015, 200 p. (In Russian)