

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-136-155>

УДК 621.644.2.02.07:620.197.5

Техническое диагностирование и анализ состояния металла стальных подземных газопроводов

С. Ф. Гориченко¹⁾, В. А. Седнин²⁾, А. Г. Анисович³⁾, А. А. Абразовский⁴⁾

¹⁾Филиал «Минские тепловые сети» РУП «Минскэнерго» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики

Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь),

⁴⁾ООО «Бустер Бел» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Ввиду старения и превышения нормативного срока службы стальных газопроводов газораспределительной системы Республики Беларусь актуальным является исследование их состояния с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Для оценки влияния условий эксплуатации на уровень деградации механических свойств и химического состава металла стальных подземных газопроводов в рамках ГПО «Белтопгаз» проведен специальный цикл исследований, в том числе путем обследования выборки образцов газопроводов в виде участков труб, извлеченных из действующих объектов различного срока эксплуатации. Проведен анализ эксплуатационных факторов, оказывающих воздействие на стальные подземные газопроводы, приведены методы исследования механических свойств металла труб, микроструктуры и химических свойств. Показано, что результатом воздействия эксплуатационных нагрузок могут быть: изменение геометрии элементов газопровода, коррозионное повреждение стенки трубы, образование и развитие макродефектов (трещин, расслоений и т. д.), изменение механических свойств и структуры металла. Контроль состояния металла трубопроводов производится при помощи определения фактических механических свойств основного металла и металла сварных соединений, измерения уменьшения фактической толщины стенки вследствие коррозионных процессов, оценки накопленной поврежденности основного металла. Для оценки состояния микроструктуры стали после длительной эксплуатации проведен также химический анализ состава и металлографические исследования основного металла труб газопроводов. Химический состав испытываемых образцов анализировался на оптико-эмиссионном спектрометре и сравнивался с допустимыми интервалами значений, указанных в стандартах. Установлено, что металл в местах, не подвергнутых коррозии, соответствует требованиям, предъявляемым к сталям, деградации его химического состава и структуры не выявлено. Показано, что при сохранении свойств защитного изоляционного покрытия трубопроводов признаки старения стальной части труб не проявляются. Анализ результатов испытаний механических свойств стальных труб с различными сроками службы показал, что условия эксплуатации объектов газораспределительной системы не приводят к их деградации. Механические свойства, структура и химический состав соответствуют требованиям, предъявляемым к конструкционным низкоуглеродистым сталям. Доказано, что стальные подземные газо-

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
vsednin@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
vsednin@bntu.by

провода с различными сроками службы находятся в удовлетворительном состоянии, деградации механических свойств и структуры не выявлено.

Ключевые слова: газопровод, газораспределительная система, сталь, измерение, микроструктура, химический состав, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение

Для цитирования: Техническое диагностирование и анализ состояния металла стальных подземных газопроводов / С. Ф. Гориченко [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2026. Т. 69, № 2. С. 136–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-136-155>

Technical Diagnostics and Analysis of the Metal Condition of Steel Underground Gas Lines

S. F. Gorichenko¹⁾, V. A. Sednin²⁾, A. G. Anisovich³⁾, A. A. Abrazovsky⁴⁾

¹⁾Branch “Minsk Heating Network” of RUE “Minskenenergo” (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾ Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾State Scientific Institution “Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

⁴⁾LLC “Booster Bel” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Due to the aging and exceeding of the standard service life of steel gas pipelines of the gas distribution system of the Republic of Belarus, it is relevant to study their condition in order to determine the possibility of their further operation. To assess the effects of operating conditions on the level of degradation of the mechanical properties and chemical composition of the metal of steel underground gas lines, a special cycle of studies was conducted within the framework of Beltopgaz State Production Association, including the studies by examining a sampling of gas pipeline specimens in the form of pipe sections extracted from existing facilities of various service life. The analysis of operational factors affecting steel underground gas pipelines is carried out, methods for studying the mechanical properties of metal pipes, microstructure and chemical properties are given. It is demonstrated that the effects of operational loads can result in the following: changes in the geometry of gas pipeline elements; corrosion damage to the pipe wall; formation and development of macrodefects (cracks, delamination, etc.); changes in the mechanical properties and structure of the metal. To assess the state of the microstructure of steel after long-term operation, chemical composition analysis and metallographic studies of the base metal of gas line pipes were also carried out. The chemical composition of the tested specimens was analyzed on an optical emission spectrometer and compared with the permissible ranges of values specified in the standards. It has been established that the metal in areas not subjected to corrosion meets the requirements for steels, and no degradation of its chemical composition and structure has been detected. It has been demonstrated that while the properties of the pipeline’s protective insulation coating are maintained, no signs of aging are apparent in the steel portion of the pipes. Analysis of the test results of the mechanical properties of steel pipes with different service life demonstrated that the operating conditions of the gas distribution system facilities do not result in their degradation. Their mechanical properties, structure, and chemical composition meet the requirements for low-carbon structural steels. It is proved that steel underground gas pipelines with different service life are in satisfactory condition, no degradation of mechanical properties and structure has been revealed.

Keywords: gas pipeline, gas distribution system, steel, measurement, microstructure, chemical composition, ultimate strength, yield strength, relative elongation

For citation: Gorichenko S. F., Sednin V. A., Anisovich A. G., Abrazovsky A. A. (2026) Technical Diagnostics and Analysis of the Metal Condition of Steel Underground Gas Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (2), 136–155 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-2-136-155>

Введение. Состояние проблемы

Для соблюдения требований по безопасной эксплуатации объектов газоснабжения эксплуатирующими организациями проводится регулярный контроль состояния газопроводов. Поскольку срок эксплуатации отдельных газопроводов достигает 60 и более лет, актуальным вопросом является определение фактического состояния металла труб для выявления факторов риска, определения остаточной работоспособности и прогнозирования вероятных изменений в металле при дальнейшей работе. Износ газопроводов [1] является одной из ключевых причин аварийности, ведущей к разгерметизации и порывам из-за коррозии, накопленных в процессе жизненного цикла механических повреждений, а также к снижению прочности конструкции из-за деградации механических свойств металла [2]. Для противодействия негативному влиянию коррозионным процессам и защиты объектов газораспределительной системы создают систему электрохимической защиты [3, 4]. Учитывая приведенные выше обстоятельства, важно уметь прогнозировать состояние металла трубопроводов в зависимости от условий их эксплуатации, которые формируются влиянием совокупности внешних воздействующих факторов. Число этих факторов зависит от места расположения газопровода, типа прокладки, глубины залегания, давления газа в трубе, коррозионной активности грунта, наличия системы активной защиты и т. д.

По месту прокладки выделяют городские и полевые условия. Первые считаются гораздо более сложными из-за наличия плотной застройки, смежных коммуникаций и инфраструктуры, обеспечивающей работу наземного электрического транспорта и одновременно являющейся источником блуждающих токов, вызывающих интенсификацию электрохимической коррозии. В совокупности это требует более тщательного планирования компенсирующих и защитных мероприятий.

В свою очередь глубина залегания газопровода оказывает непосредственное влияние на безопасность эксплуатации, поскольку требуется оптимизация ее величины. Недостаточная глубина повышает вероятность механических повреждений от внешних нагрузок (транспорта и пучения грунтов при промерзании). В то же время значительная глубина залегания, обеспечивая лучшую защиту от поверхностных повреждений, приводит к увеличению нагрузки от слоя грунта на газопровод. В общих случаях [5] рекомендуемая глубина залегания от поверхности земли до верха трубы газопровода должна быть не менее 0,8 м, а на пахотных и орошаемых землях – не менее 1,2 м. На практике имеют место случаи залегания стальных подземных газопроводов на уровне 0,3 м от поверхности земли и до 4–5 м в местах старой застройки жилого фонда.

По рабочему давлению, согласно [5], различают газопроводы четырех категорий: высокого давления I категории (от 0,6 до 1,2 МПа), высокого давления II категории (от 0,3 до 0,6 МПа); среднего давления (от 0,005 до 0,300 МПа) и низкого давления (менее 0,005 МПа). Величина и характер изменения давления транспортируемой среды оказывают непосредственное влияние на работоспособность газопроводов [6], в процессе экс-

плуатации превышение максимального рабочего давления на величину более 10 % от рабочего не допускается. Наличие пульсаций давления увеличивает вероятность аварий и инцидентов. В настоящее время для контроля за режимами эксплуатации объектов газораспределительной системы используется интеллектуальная система управления газоснабжением (ИСУГ) [7], которая позволяет осуществлять, мониторинг давления транспортируемой среды посредством средств телеметрии (рис. 1–3) в режиме реального времени. Из рисунков хорошо видно, что линии изменения давления имеют колебательный характер, что объясняется цикличностью изменения нагрузки потребления природного газа (ГРП – газораспределительный пункт, ШЗП – шкафной газораспределительный пункт).

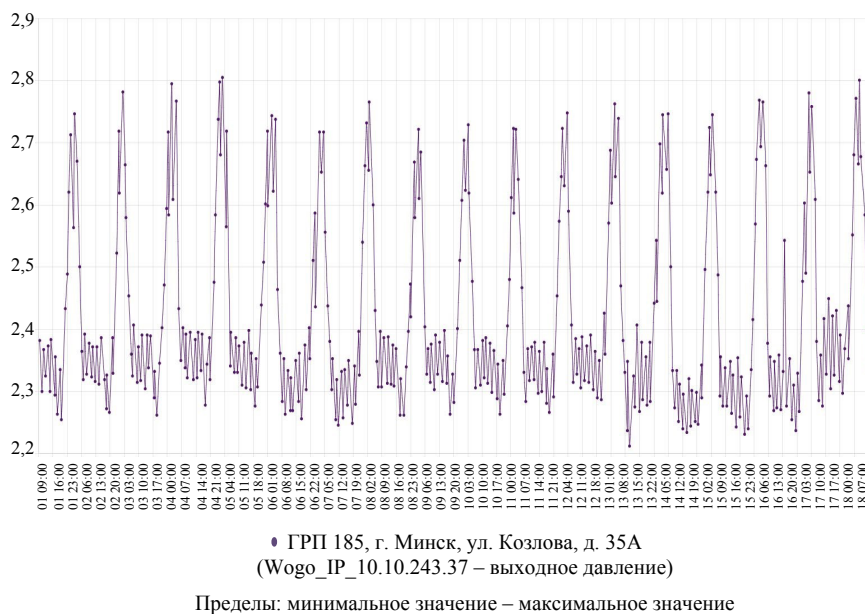


Рис. 1. Пример суточного тренда изменения давления газа в газопроводе низкого давления (данные с газораспределительного пункта 185 ГП «Мингаз»)

Fig. 1. An example of a daily trend in gas pressure trend in a low-pressure gas pipeline (data from gas distribution point 185 of the Mingaz State Enterprise)

Интенсивность протекания коррозионных процессов во многом определяется коррозионной агрессивностью грунта. Согласно ГОСТ 9.602–2016 [8], различают низкую, среднюю и высокую коррозионную активность грунта. При расположении газопроводов в грунтах средней и высокой коррозионной агрессивности применяют средства электрохимической защиты трубопроводов от коррозии [8]. Измерение коррозионной активности грунта проводится с периодичностью не реже одного раза в пять лет [9]. Протяженность газовых сетей в г. Минске и Минском районе, защищенных средствами активной защиты, составляет 1715,9 км (50,3 % от общей протяженности). За период 2023–2024 гг. по г. Минску и Минскому району обследованы 782 участка, выявлены 18 точек со средней коррозионной активностью грунта, в остальных случаях коррозионная активность была низкой.

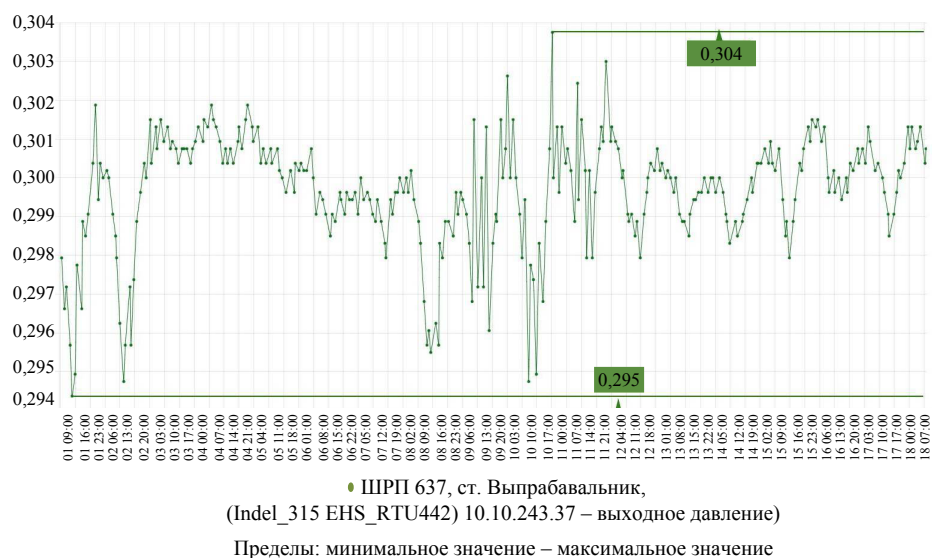


Рис. 2. Пример суточного тренда изменения давления газа в газопроводе среднего давления (данные со шкафного газораспределительного пункта 637 ГП «Мингаз»)

Fig. 2. An example of a daily trend in gas pressure trend in a medium-pressure gas pipeline (data from the cabinet gas distribution point 637 of the Mingaz State Enterprise)

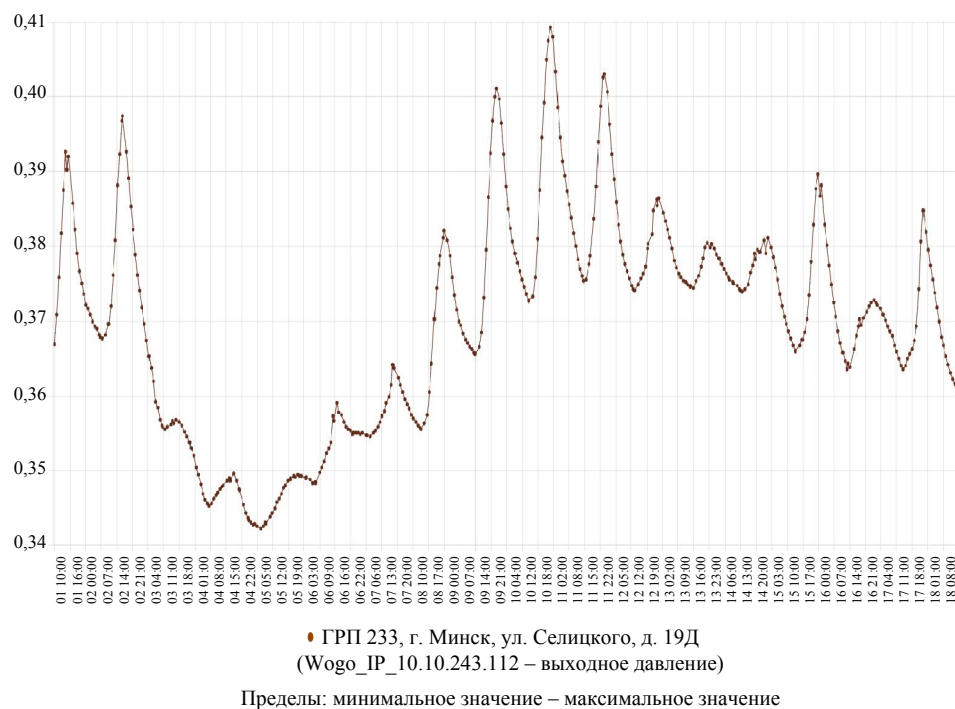


Рис. 3. Пример суточного тренда изменения давления газа в газопроводе низкого давления (данные с газораспределительного пункта 233 ГП «Мингаз»)

Fig. 3. An example of a daily trend in gas pressure trend in a low-pressure gas pipeline (data from gas distribution point 233 of the Mingaz State Enterprise)

Результатом воздействия эксплуатационных нагрузок [10] могут быть: изменение геометрии элементов газопровода, коррозионное повреждение стенки трубы, образование и развитие макродефектов (трещин, расслоений и т. д.), изменение механических свойств и структуры металла. Для оценки влияния условий эксплуатации на уровень деградации механических свойств и химического состава металла стальных подземных газопроводов проведен специальный цикл исследований, в том числе и путем обследования выборки образцов газопроводов в виде участков труб, извлеченных из действующих объектов различного срока эксплуатации.

Экспериментальная и аналитическая часть

Исследование состояния металла. Определение остаточного ресурса трубопровода должно основываться на установлении реального физического состояния металла в зависимости от времени эксплуатации и характера нагружения [11, с. IV]. При этом важно проанализировать и классифицировать причины, вызывающие аварийные ситуации в газораспределительных системах. В табл. 1 представлены сведения по аварийным ситуациям со стальными подземными газопроводами г. Минска и Минского района за период 2020–2023 гг. Причины возникновения аварий на трубопроводах в ней разделены по следующим группам дефектов:

- последствия дефектов строительно-монтажного происхождения;
- дефекты, связанные с внешним воздействием на трубопровод;
- коррозионные дефекты, связанные с повреждением изоляционного покрытия трубопровода;
- дефекты при комбинации повреждающих факторов (внешнее воздействие на трубопровод и последующее развитие трещин по механизму коррозионного растрескивания либо коррозии);
- заводской брак.

Таблица 1

Причины разрушения газопроводов

Causes of destruction of gas pipelines

Дата выявления	Типо-размер трубопровода, мм	Рабочее давление, МПа	Марка стали	Вид защитного покрытия	Срок эксплуатации, лет	Причина разрушения
1	2	3	4	5	6	7
03.2020	89×4,5	0,005–0,300	10	Мастичное	23	Трещина в зоне дефекта строительно-монтажного происхождения (вмятина с задиром), развитие трещины по механизму коррозионного растрескивания под напряжением
03.2020	108×4,0	0,005–0,300	10	Мастичное	39	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия с последующим образованием кластера коррозии

Окончание табл. 1

Ending of Table 1

1	2	3	4	5	6	7
03.2020	219×6	0,300–0,600	10	Мастичное	36	Сквозное повреждение (свищ) строительно-монтажного происхождения на пересечении заводского сварного шва и кольцевого сварного шва
01.2016	219×6	1,200	10	Мастичное	19	Образование сквозной поперечной трещины в результате повреждения трубы ковшом экскаватора
11.2023	108×4	0,005	10	Мастичное	55	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
04.2021	273×8	0,300–0,600	20	Мастичное	57	Внутреннее расслоение. Заводской дефект
05.2021	219×8	0,005	10	Мастичное	48	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
06.2021	89×4	0,005	10	Мастичное	59	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
07.2021	89×4	0,005	10	Мастичное	62	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
10.2021	89×4	0,005	10	Мастичное	35	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
11.2023	159×4	0,005	10	Мастичное	49	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
07.2023	108×4	0,005	20	Мастичное	55	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
10.2023	89×4,0	0,005	10	Мастичное	39	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
11.2023	89×4,0	0,005	20	Мастичное	52	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия
09.2023	57×3,5	0,005	20	Мастичное	47	Сквозное коррозионное повреждение стенки трубы. Локальное повреждение изоляционного покрытия

На практике дефекты труб стальных подземных газопроводов определяются на микро- и макроскопическом уровнях [12]. Основными макро-структурными дефектами являются механические повреждения поверхности – выбоины, вмятины и другие (рис. 4) [13], трещины и сквозные дефекты (рис. 5, 6), а также коррозионные поражения (рис. 7, 8).

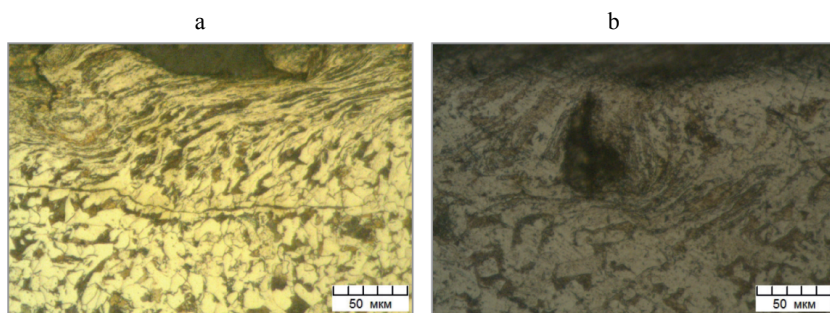


Рис. 4. Деформированные участки вблизи поверхности трубы:

а – деформированная структура на поверхности;

б – деформированный участок вокруг включения [12]

Fig. 4. Deformed areas near the pipe surface: а – deformed structure on the surface;

б – deformed area around the inclusion [12]



Рис. 5. Сквозное повреждение трубы: а – наружная поверхность стенки трубы;

б – поперечное сечение повреждения в зоне трещины на всю толщину стенки трубы, утяжина [12]

Fig. 5. End-to-end damage to a pipe: а – outer surface of the pipe wall;

б – cross-section of damage in the crack zone across the entire thickness of the pipe wall, shrinkage [12]

Несплошности вследствие развития трещин и коррозионного процесса связаны, как правило, с нарушением гидроизоляции. Для гидроизоляции труб использовали поливинилхлоридную и термоусаживаемую ленты и муфты, жидкую резину, пенополиуретан, различные полимерные составы, обмазочную гидроизоляцию битумной мастикой, что надежно предохраняет от коррозии. Нарушение гидроизоляции может иметь место вследствие механических повреждений при проведении строительно-монтажных либо ремонтных работ.



Рис. 6. Участок трубы со сквозным коррозионным повреждением после удаления неметаллических отложений: а – наружная сторона; б – поверхность излома в зоне окисления [12]

Fig. 6. A section of a pipe with t end-to-end corrosion damage after removal of non-metallic deposits: a – outer side; б – fracture surface in the oxidation zone [12]

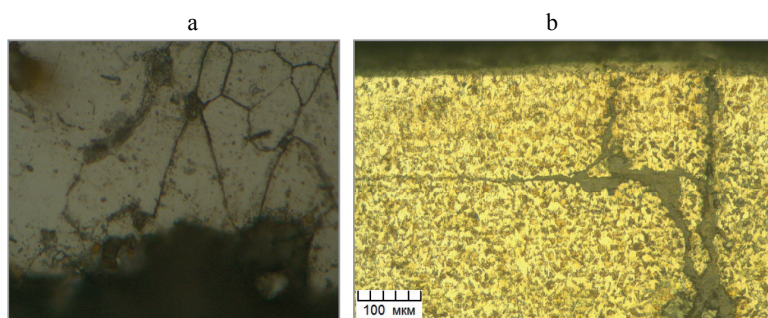


Рис. 7. Развитие коррозионного процесса: а – межкристаллитная коррозия; б – коррозия по сульфидным включениям [12]

Fig. 7. Development of the corrosion process: а – intercrystalline corrosion; б – corrosion along sulfide inclusions [12]

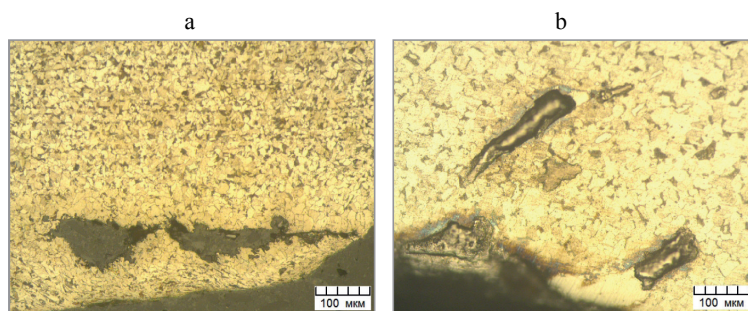


Рис. 8. Посторонние включения в структуре трубной стали: а – шлаки; б – металлические частицы [12]

Fig. 8. Extraneous inclusions in the structure of pipe steel: а – slag; б – metal particles [12]

Наиболее вероятными могут быть следующие механизмы образования сквозного повреждения:

– повреждение участка трубы с образованием прогиба и локальной вмятины с задиром, а также возможным локальным повреждением изоляци-

онного покрытия; рост напряжений в зоне наклепанного металла в процессе длительной эксплуатации под действием растягивающих напряжений, ориентированных в продольном направлении. Растягивающие напряжения образуются в результате дополнительного давления грунта на трубу с прогибом, наклепанный металл – в результате задира на локальной вмятине;

– образование трещин незначительной протяженности, направленной перпендикулярно действию растягивающих напряжений; рост трещин по механизму коррозионного растрескивания под напряжением.

На рис. 5 показано распространение трещин на всю глубину толщины стенки трубы на протяжении не более 20 мм. В поперечном сечении в зоне трещины фиксировали утяжины с внутренней стороны стенки трубы (рис. 5b). В поперечном сечении последней в зоне повреждения, кроме основной трещины, формируются множественные трещины глубиной до 30 % толщины стенки трубы с наружной поверхности (рис. 6b). Трещины ветвистые, хаотично распространяются в глубь стенки трубы.

Предварительная деформация может влиять на окисление стали при температурах, не превышающих температуру возврата или рекристаллизации. Установлено [12], что предварительная деформация металла несколько ускоряет его окисление в начальной стадии вследствие повышения энергии металла и влияния на структуру образующейся первичной оксидной пленки, а растягивающие напряжения увеличивают возможность протекания местной, в частности межкристаллитной, коррозии.

Основными микроструктурными дефектами являются включения шлаков (рис. 8a) и посторонних материалов (рис. 8b), в том числе закатанные в металл при обработке поверхности сульфидные включения, силикаты; полосчатость и видманштеттенова структура (рис. 9a); третичный цементит (рис. 9b) (зачастую в виде сетки, что встречается достаточно часто). Микроструктурные дефекты не связаны, как правило, с эксплуатацией труб, а обусловлены процессом их изготовления. Такие дефекты, как приведенные на рис. 8, зачастую соответствуют максимальным баллам по шкалам микроструктур по ГОСТ 5640–2020. В частности, балл структурно-свободного цементита на рис. 4b соответствует 6.

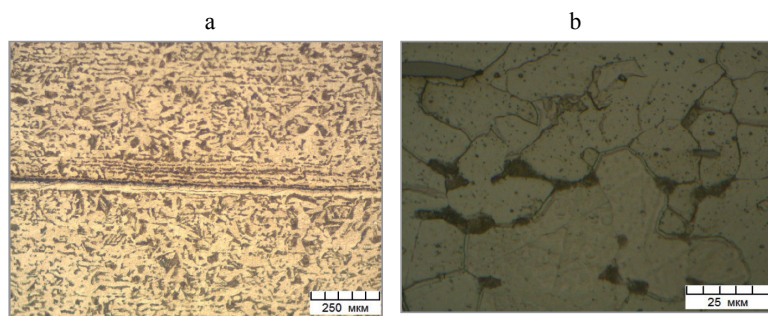


Рис. 9. Дефекты микроструктуры трубной стали, регламентированные ГОСТ 5640–2020:

а – полосчатость и видманштеттенова структура; б – структурно-свободный цементит [12]

Fig. 9. Microstructural defects of pipe steel regulated by GOST 5640–2020:

a – banding and Widmanstätten structure; b – structurally free cementite [12]

Все перечисленные дефекты микроструктуры обусловлены производственным браком или внешним механическим воздействием (трещина), что является крайне редким, всего 16 случаев согласно табл. 1, за три года при протяженности газопроводов около 4000 км. Далее исследованию подлежат участки газопроводов, у которых отсутствуют подобные дефекты.

Исследование механических свойств металла газопроводов. Контроль состояния металла трубопроводов производится при помощи определения фактических механических свойств основного металла и металла сварных соединений, измерения уменьшения фактической толщины стенки вследствие коррозионных процессов, оценки накопленной поврежденности основного металла. В качестве объектов для лабораторных исследований выбирались действующие подземные газопроводы, введенные в действие с 1961 по 2000 г., с давлением природного газа от низкого (0,005 МПа) до высокого (1,2 МПа), эксплуатируемые на различной глубине. Образцы в виде отрезков труб (катушек) (рис. 10) в количестве 38 штук длиной не менее 500 мм и диаметром от 57 до 529 мм извлекались из грунтов с различной коррозионной активностью. Были проведены испытания на одноосное растяжение основного металла по ГОСТ 10006–80 [13] и ГОСТ 1497–2023 [14] при температуре плюс 20 °С на универсальной разрывной машине РМ50УМ1 (рис. 11) с определением базовых (сертификатных) характеристик механических свойств, параметров кривой упрочнения и предельных состояний исследуемого металла.

Направления вырезки продольных образцов совпадали с осевым направлением трубы, а также с направлением прокатки (НП) листа, из которого она изготовлена. Направления вырезки поперечных образцов совпадали с окружным направлением трубы и с поперечным направлением относительно НП листа.



Рис. 10. Внешний вид образцов для исследований

Fig. 10. Appearance of research specimens

Проводились испытания на одноосное растяжение гладких пропорциональных цилиндрических образцов. В процессе испытаний записывалась первичная диаграмма растяжения, показывающая функциональную зависимость между нагрузкой, действующей на образец и вызываемой ею деформацией. По геометрическим размерам образца до и после испытаний и параметрам машинной диаграммы «усилие – перемещение» путем расчетов определялись служебные свойства металла газопровода. Базовые проч-

ностные и некоторые пластические свойства (δ_5 и/или δ_{10}) определяли по положению определенных точек на первичных кривых растяжения в координатах «нагрузка – абсолютное удлинение образца», которые записывались на диаграмме испытательной машины.



Рис. 11. Универсальная разрывная машина РМ-50УМ1

Fig. 11. Universal tear testing machine RM-50UM1

Из этой диаграммы определяли базовые механические характеристики испытуемого металла: предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b и относительное удлинение δ_5 или δ_{10} . Контроль твердости выполнялся по методу Бринелля по ГОСТ 9012 [15]. Значение твердости определяли как среднее арифметическое из не менее чем пяти измерений. Данные контроля твердости и результаты испытаний на растяжение металла труб приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний на растяжение металла труб
Pipe metal tensile test results

Марка стали	Срок службы, лет	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость, НВ
1	2	3	4	5	6
Сталь 10	35	603	387	23,6	118
Сталь 10	44	549	381	20,7	121
Сталь 10	40	425	298	20,9	121
Сталь 10	28	404	298	20,2	112
Сталь 10	23	438	325	27	154
Сталь 10	21	368	329	28,6	99
Сталь 20	22	393	365	22,7	122
Сталь 20	25	527	440	20,1	120
Сталь 20	26	491	339	24	131
Сталь 20	27	466	349	22,5	120
Сталь 20	32	473	343	27,6	124
Сталь 20	37	429	315	22,2	112
Сталь 20	41	459	388	23	118
Сталь 20	44	448	372	20	120

Окончание табл. 2

Ending of Table 2

1	2	3	4	5	6
Сталь 20	45	483	337	22,2	123
Сталь 20	49	402	292	21	127
Сталь 20	50	474	328	21,1	127
Сталь 3	11	497	336	21	120
Сталь 3	50	490	339	33,8	127
Сталь 3	28	428	319	29	122
Сталь 3	23	424	329	28,8	126
Сталь 3	12	433	299	26	120
Без марки	50	484	341	20	111
Без марки	50	475	347	20,5	117
Без марки	50	451	325	20,3	140
Без марки	48	464	303	20,3	130
Без марки	47	475	330	21,2	127
Без марки	47	428	298	28,1	115
Без марки	47	452	297	20,1	130
Без марки	45	424	305	20,7	127
Без марки	45	465	316	20,2	133
Без марки	44	460	325	25	123
Без марки	41	451	338	27,8	112
Без марки	40	435	299	20,1	120
Без марки	22	405	336	20	125
Без марки	22	423	344	20,4	113
Без марки	19	427	368	28,7	114
Без марки	13	469	327	20	137

На рис. 12 показана диаграмма при растяжении цилиндрического образца.

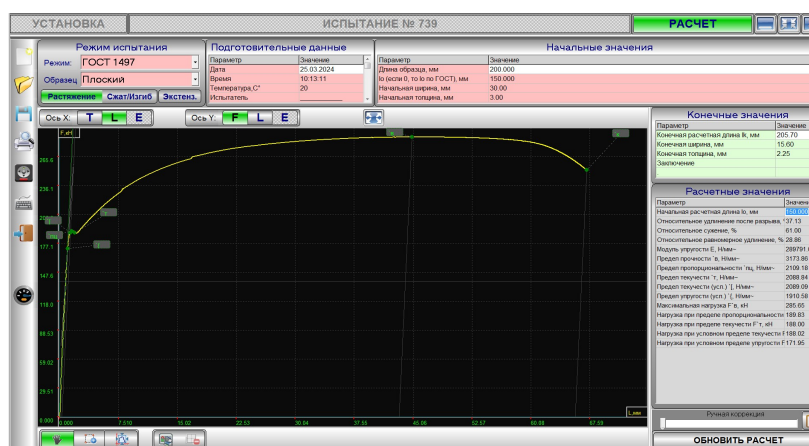


Рис. 12. Характер изменения напряжения в зависимости от удлинения (деформации) при комнатной температуре трубной стали

Fig. 12. The nature of stress changes depending on elongation (deformation) of pipe steel at room temperature

Значения механических свойств сталей трубопроводов (табл. 2) после длительной эксплуатации находятся в пределах допустимых значений и удовлетворяют требованиям ГОСТ 1050–2013 [16].

Распределение измеренных значений предела прочности σ_b , предела текучести σ_t , относительного удлинения и твердости для труб, изготовленных из разных сталей, в зависимости от длительности срока эксплуатации приведено на рис. 13–16. Анализ полученных данных измерений – рабочего давления (0,005–0,300 МПа, в отдельных случаях до 1,200 МПа), температуры эксплуатации (не ниже плюс 5 °С), диаметра труб (57–529 мм), толщины стенки (до 6 мм) – не показывал устойчивых достоверных зависимостей предела прочности σ_b , предела текучести σ_t , твердости и относительного удлинения δ от длительности эксплуатации.

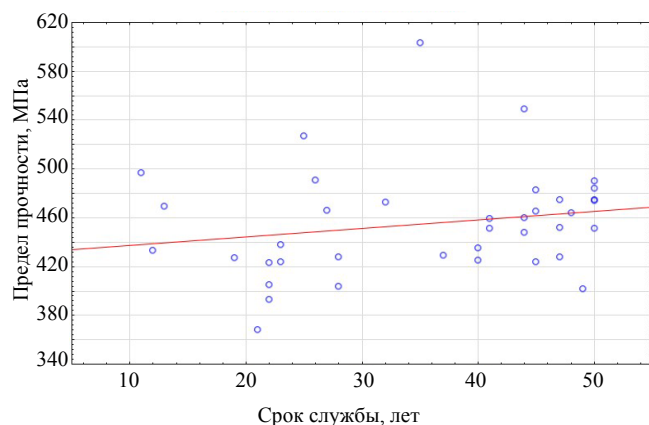


Рис. 13. Распределение значений предела прочности σ_b в зависимости от длительности срока эксплуатации

Fig. 13. Distribution of ultimate strength values σ_b depending on the duration of service life

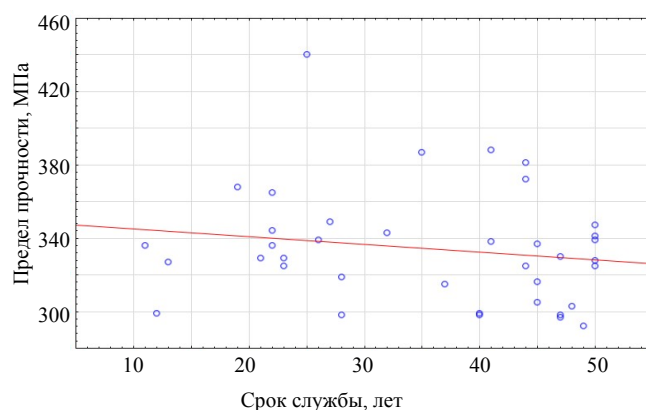


Рис. 14. Распределение значений предела текучести σ_t в зависимости от длительности срока эксплуатации

Fig. 14. Distribution of yield strength values σ_t depending on the duration of service life

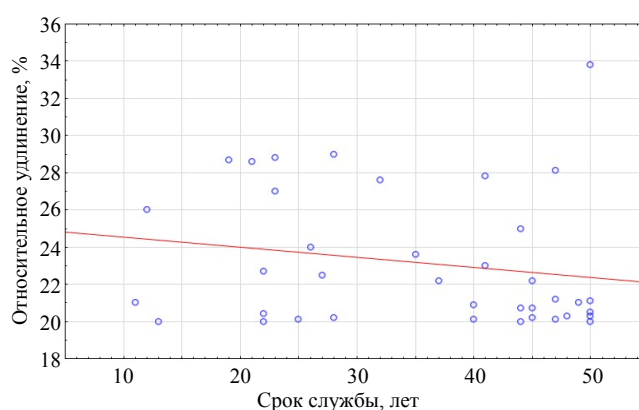


Рис. 15. Распределение значений относительного удлинения в зависимости от длительности срока эксплуатации

Fig. 15. Distribution of relative elongation values depending on the duration of service life

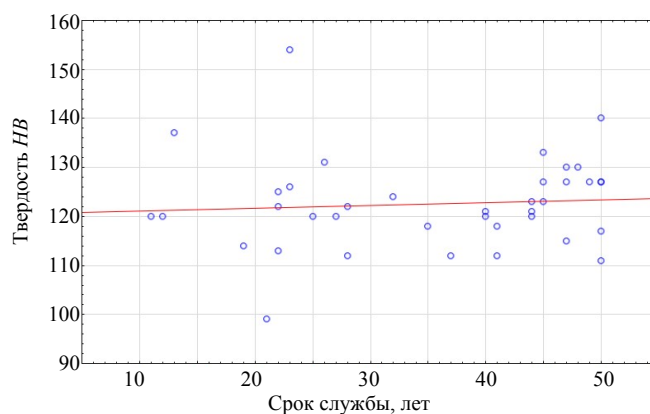


Рис. 16. Распределение значений твердости в зависимости от длительности срока эксплуатации

Fig. 16. Distribution of hardness values depending on the length of service life

Результаты измерений аппроксимировались полиномом первой степени

$$Y = aT + b,$$

где T – время эксплуатации трубы, лет; Y – измеренная величина (σ_b , σ_t , δ , твердость HB); a и b – параметры регрессии.

Регрессионный анализ выполнялся с использованием программы Statistica (разработчик – компания ООО «СтатСофт») [17]. Применение критерия Стьюдента для анализа статистических данных допустимо при соблюдении [18] нормальности распределения значений во всех сравниваемых выборках. В данном случае по критерию согласия Шапиро–Уилка [19] уровень значимости составил 0,0246 (меньше 0,05), следовательно, гипотеза о нормальности имеющегося распределения случайной величины отклоняется. Далее для исследования данных применяем корреляционный анализ с расчетом коэффициентов корреляции Спирмена [20]. Уравнения линейной регрессии для σ_b , σ_t , δ и твердости HB в зависимости от срока эксплуатации имеют вид табл. 3.

Таблица 3

Результаты регрессионного анализа

Results of regression analysis

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции Пирсона r	Уровень значимости p
$\sigma_b = 432,2983 + 0,4222x$	0,1916	0,30657
$\sigma_t = 341,793 - 0,3767x$	-0,1956	-0,17598
$\delta = 25,1571 - 0,0694x$	-0,2811	0,18277
$HB = 120,3114 + 0,0603x$	0,1042	0,22130

Как видно из полученных данных, расчетные уровни значимости во всех случаях превышают заданный номинальный принятый на уровне 0,05 [21]. Таким образом, гипотеза о зависимости свойств металла стальных подземных газопроводов от срока эксплуатации отклоняется.

Анализ химического состава металла труб стальных подземных газопроводов. Данные контроля химического состава приведены в табл. 4.

Анализ химического состава не выявил отклонений от требований нормативной документации после длительной эксплуатации. Рабочая среда (природный газ) в условиях температур эксплуатации (5–20 °С) не является науглероживающей средой и не вызывает изменения химического состава сталей. Факторы, отрицательно влияющие на склонность основного металла труб к хрупкому разрушению и снижающие прочностные свойства, в микроструктуре обследованных труб не выявлены [12, 19, 20, 21]. Таким образом, длительная эксплуатация в слабо нагруженных условиях (максимальное рабочее давление 0,005–0,300 МПа, в отдельных случаях 1,2 МПа; температура эксплуатации не ниже 5 °С) не приводит к видимым методами оптической металлографии изменениям структуры металла.

Таблица 4

Результаты контроля химического состава сталей газопроводов

Results of control of chemical composition of gas pipeline steels

Рабочее давление, МПа	Срок эксплуатации	Марка стали	C	Si	Mn	P	S
0,005–0,300	1965	Сталь 10	0,15	0,22	0,45	0,008	0,012
0,005–0,300	1981	Сталь 10	0,09	0,22	0,49	0,004	0,014
0,300–0,600	1984	Сталь 10	0,12	0,27	0,50	0,034	0,032
1,200	Нет данных	Сталь 10	0,15	0,16	0,56	0,023	0,012
0,005–0,300	1965	Сталь 10	0,15	0,22	0,45	0,008	0,012
Требования ГОСТ 1050 к химическому составу стали 10			0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	До 0,03	До 0,035
0,005–0,300	1973	Сталь 20	0,18	0,25	0,49	0,02	0,012
Требования ГОСТ 1050 к химическому составу стали 20			0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	До 0,035	До 0,040

ВЫВОДЫ

1. Показано, что одной из современных проблем газораспределительной системы Республики Беларусь является рост парка стальных газопроводов

с превышением нормативного срока службы, решение которой требует наличия методического «инструмента» (экспериментально-расчетного аппарата), позволяющего оценивать реальный допустимый срок газопровода по информации о его состоянии и условиях эксплуатации. Установлено, что результатом воздействия эксплуатационных нагрузок могут быть: изменение геометрии элементов газопровода, коррозионное повреждение стенки трубы, образование и развитие макродефектов (трещин, расслоений и т. д.), изменение механических свойств и структуры металла.

2. Для определения уровня деградации механических свойств металла стальных подземных газопроводов в ходе проведенного специального исследования обследована представительная выборка образцов участков путем измерения уменьшения фактической толщины стенки, оценки накопленной поврежденности основного металла, определения базовых (сертификатных) характеристик механических свойств (пределов текучести и прочности, относительного удлинения, твердости по методу Бринелля). Установлено, что значения механических свойств сталей трубопроводов после длительной эксплуатации находятся в пределах допустимых значений и удовлетворяют требованиям ГОСТ 1050–2013. В то же время анализ полученных данных измерений – рабочего давления (0,005–0,300 МПа, в отдельных случаях до 1,2 МПа), температуры эксплуатации (не ниже 5 °С), диаметра труб (57–529 мм), толщины стенки (до 6 мм) – не показывал устойчивых достоверных зависимостей предела прочности σ_b , текучести σ_t , твердости $HВ$ и относительного удлинения δ от длительности эксплуатации.

3. Химический анализ состава и металлографические исследования основного металла труб газопроводов не выявили отклонений от требований нормативной документации после длительной эксплуатации. Это подтверждает отсутствие изменения химического состава сталей и процесса их науглероживания рабочей средой (природным газом) в условиях изменения температуры эксплуатации (в пределах от 5 до 20 °С) и рабочего давления (от 0,005 до 0,3 МПа, в отдельных случаях до 1,2 МПа). Факторы, отрицательно влияющие на склонность основного металла труб к хрупкому разрушению и снижающие прочностные свойства, в микроструктуре обследованных труб также не выявлены, тем самым подтверждены результаты, полученные в работах [12, 23, 24, 25].

4. Показано, что при сохранении свойств защитного изоляционного покрытия трубопроводов и отсутствии производственных причин механического разрушения признаки старения стальной части трубопроводов не проявляются, условия эксплуатации объектов газораспределительной системы газопроводов не приводят к их деградации, механические свойства, структура и химический состав сталей, из которых они изготовлены, соответствуют требованиям, предъявляемым к конструкционным низкоуглеродистым сталям, что позволяет осуществлять их дальнейшую эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ основных причин аварий, произошедших на магистральных газопроводах / С. Савонин, З. Арсентьева, А. Москаленко [и др.] // Инженерная защита. 2015. № 6 (11). С. 52–57. URL: <https://territoryengineering.ru/vyzov/analiz-osnovnyh-prichin-avarij-proizoshedshih-na-magistralnyh-gazoprovodah/> (дата обращения: 24.12.2025).

2. Снарский, А. С. Дegradaция прочностных свойств металла промышленного оборудования и строительных конструкций / А. С. Снарский, А. В. Крыленко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2004. № 6. С. 93–98.
3. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>
4. Струцкий, Н. В. Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 67, № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-137-151>
5. Газораспределение и газопотребление: СН 4.03.01–2019. Введ. 23.07.2020. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2020. 104 с.
6. Байков, И. Р. Исследование влияния пульсаций давления транспортируемого газа на надежность работы магистральных газопроводов / И. Р. Байков, С. В. Китаев, И. А. Шаммазов // Территория НЕФТЕГАЗ. 2007. № 2. С. 18–22.
7. ИСУГ. Интеллектуальная система управления газоснабжением. URL: <https://softmax.world/presentations/isug.pdf> (дата обращения: 26.03.2024).
8. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ 9.602–2016. Взамен ГОСТ 9.602–2005; введ. 01.06.2017. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. 87 с.
9. Правила по обеспечению промышленной безопасности в области газоснабжения: постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 5 дек. 2022 г., № 66 // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2023.
10. Снарский, А. С. Методы определения механических свойств металла оборудования и конструкций / А. С. Снарский, А. В. Крыленко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2002. № 2. С. 57–61.
11. Техническая диагностика. Оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемых стальных трубопроводов на основе результатов механических испытаний образцов. Общие требования: ГОСТ Р 55046–2012. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2013. 8 с.
12. Основные дефекты структуры и состояние труб газораспределительной системы г. Минска после длительной эксплуатации / А. Г. Анисович, М. Л. Хейфец, А. С. Гаркун [и др.] // Литейное производство и металлургия 2025. Беларусь: сб. тр. 33-й Междунар. науч.-техн. конф., 19–21 нояб. 2025 г. Минск / Белорусский национальный технический университет; под общ. ред. Е. И. Маруковича. Минск: БНТУ, 2025. С. 144–149.
13. Трубы металлические. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 10006–80. Введ. 01.07.1980. М.: Стандартинформ, 2010. 206 с.
14. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497–2023. Введ. 01.07.2024. М.: ФГБУ «Институт стандартизации», 2023. 60 с.
15. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю: ГОСТ 9012–59. Введ. 01.01.60. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007. 40 с.
16. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия: ГОСТ 1050–2013. Взамен ГОСТ 1050–88 и ГОСТ 4543–71. Введ. 01.01.2015. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2014. 32 с.
17. Стукач, О. В. Программный комплекс Statistica в решении задач управления качеством: учеб. пособие / О. В. Стукач. Томск: Томский политехнический университет, 2011. 163 с.
18. Хлопова, А. Е. Условия применимости t-критерия Стьюдента в медицине / А. Е. Хлопова, И. В. Щербакова // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. 2015. Т. 4, № 11. С. 1276–1278. URL: <https://medconfer.com/node/4411> (дата обращения: 09.02.2026).
19. Рыбак, Г. В. Проверка нормальности распределения значений держащей силы якоря / Г. В. Рыбак // Форум молодых ученых. 2019. № 1–3 (29). URL: <https://sciup.org/proverka-normalnosti-raspredelenija-znachenij-derzhashhej-sily-jakorja-140284909> (дата обращения: 09.02.2026).

20. Кошелева, Н. Н. Корреляционный анализ и его применение для подсчета ранговой корреляции Спирмена / Н. Н. Кошелева // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. № 5. С. 23–26.
21. Гржибовский, А. М. Корреляционный анализ / А. М. Гржибовский // Экология человека. 2008. № 9. С. 50–60.
22. Орлов, А. И. Реальные и номинальные уровни значимости при проверке статистических гипотез / А. И. Орлов // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 114. URL: <https://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/03.pdf> (дата обращения: 02.02.2026).
23. Диагностика состояния труб городской газораспределительной системы после их длительной эксплуатации / А. Г. Анисович, А. С. Гаркун, Г. А. Ланцман [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. 2022. № 2. С. 22–29.
24. Шолоник, В.Е. Методология экспериментальных исследований и анализа возможных причин разрушения элементов газораспределительной системы / В. Е. Шолоник, С. Ф. Гориченко, А. Г. Анисович [и др.] // Неразрушающий контроль и диагностика. 2021. № 2. С. 3–13.
25. Гориченко, С. Ф. Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности / С. Ф. Гориченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 2. С. 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-68-2-154-174>

Поступила 10.10.2025 Подписана в печать 14.01.2026 Опубликована онлайн 31.03.2026

REFERENCES

1. Savonin S., Arsent'eva Z., Moskalenko A., Chugunov A., Tyunder A. (2015) Analysis of the Main Causes of Accidents on Main Gas Pipelines. *Inzhenernaya zashchita* [Engineering Protection], (6), 52–57. Available at: <https://territoryengineering.ru/vyzov/analiz-osnovnyh-prichin-avarij-proizoshedshih-na-magistralnyh-gazoprovodah/> (in Russian).
2. Snarsky A. S., Krylenko A. V. (2004). Degradation of the Strength Properties of Metal in Industrial Equipment and Building Structures. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (6), 93–98 (in Russian).
3. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 257–267 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>
4. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking Into Account the Organizational and Logistical Factor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 137–151 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151>
5. SN [Building Code] 4.03.01–2019. *Gas Distribution and Gas Consumption*. Minsk, RUP Stroytekhnorm, 2020. 106 (in Russian).
6. Baykov I. R., Kitaev S. V., Shammazov I. A. (2007) Study of the Impact of Pressure Pulsations of Transported Gas on the Reliability of Main Gas Pipelines. *Territoriya NEFTEGAZ* [Oil and Gas Territory], (2), 18–22 (in Russian).
7. ISUG. *Intelligent Gas Supply Management System*. Available at: <https://softmax.world/presentations/isug.pdf> (accessed 26 March 2024) (in Russian).
8. State Standart 9.602–2016. *Unified Corrosion and Aging Protection System. Underground Structures. General Requirements for Corrosion Protection*. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 87 (in Russian).
9. Industrial Safety Rules in the Gas Supply Industry: Resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus of December 5, 2022, No. 66. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22339537p> (in Russian).

10. Snarsky A. S., Krylenko A. V. (2002) Methods for Determining the Mechanical Properties of Equipment and Structure Metals. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, (2), 57–61 (in Russian).
11. State Standart R 55046–2012. *Technical Diagnostics. Estimation of the Residual Service Life of Long-Operated Steel Pipelines Based on the Results of Mechanical Tests of Samples. General Requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 8 (in Russian).
12. Anisovich A. G., Kheifets M. L., Garkun A. S., Sholonik V. E., Gorichenko S. F., Shablov A. O. (2025) Main Structural Defects and Condition of Pipes of the Gas Distribution System of Minsk after Long-Term Operation. *Liteinoe proizvodstvo i metallurgiya 2025. Belarus': sb. tr. 33-i Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., 19–21 noyab. 2025 g., Minsk* [Foundry and Metallurgy 2025, Belarus: Proceedings of the 33rd International Scientific and Technical Conference, November 19–21, 2025, Minsk], Minsk, BNTU, 144–149 (in Russian).
13. State Standart 10006-80. *Metal Pipes. Tensile Testing Method*. Moscow, Standartinform Publ., 2010 (in Russian).
14. State Standart 1497–2023. *Metals. Tensile Test Methods*. Moscow, Federal State Budgetary Institution “Institute of Standardization”, 2023. 60 (in Russian).
15. State Standart 9012–59. *Metals. Method of Brinell Hardness Measurement*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 39 (in Russian).
16. State Standart 1050–2013. *Metal Products from Non-Alloy Structural High-Quality and Special Steels. General Specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 (in Russian).
17. Stukach O. V. (2011) *The Statistica Software Package in Solving Quality Management Problems*. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University. 163 (in Russian).
18. Khlopova A. E., Shcherbakova I. V. (2014) Conditions of Applicability of the Student's t-Test in Medicine. *Medical Conferences Online*, 4 (11), 1276–1278. Available at: <https://medconfer.com/node/4411> (accessed 02 September 2026) (in Russian).
19. Rybak G. V. (2019) Checking the Normality of the Distribution of Anchor Holding Force Values. *Forum molodykh uchenykh* [Forum of Young Scientists], (1–3), 129–135. Available at: <https://sciup.org/proverka-normalnosti-raspredeleniya-znachenij-derzhashhej-sily-jakorja-140284909> (accessed 02 September 2026) (in Russian).
20. Kosheleva N. N. (2012) Correlation Analysis and its Application for Calculating Spearman's Rank Correlation. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Current problems of the Humanities and Natural Sciences], (5), 23–26 (in Russian).
21. Grzhibovsky A. M. (2008) Correlation Analysis. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, (9), 50–60 (in Russian).
22. Orlov A. I. (2015) Real and Nominal Significance Levels in Testing Statistical Hypotheses. *Scientific Journal of KubSAU*, (114). Available at: <https://ej.kubagro.ru/2015/10/pdf/03.pdf> (accessed 02 February 2026) (in Russian).
23. Anisovich A. G., Garkun A. S., Lantsman G. A., Gorichenko S. F., Doroshko S. I., Sednin V. A., Abrazovsky A. A. (2022) Control and Diagnostics of Products and Structural Materials. *Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], (2), 22–29 (in Russian).
24. Sholonik V. E., Gorichenko S. F., Anisovich A. G., Garkun A. S., Kren' A. P., Asadchaya M. V., Mayorov A. L., Baev A. R., Burnos A. U., Sednin V. A., Doroshko S. I. (2021) Methodology of Experimental Research and Analysis of Possible Causes of Destroying Elements of the Gas Distribution System. *Nerazrushayushchii Kontrol' i Diagnostika* [Nondestructive Testing and Diagnostics], (2), 3–13 (in Russian).
25. Gorichenko S. F. (2025) Development of a Methodology for Technical Diagnostics of Pipelines of the Gas Distribution System and Analysis of the Effectiveness of Ways to Restore their Operability. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (2), 154–174 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-68-2-154-174>