

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-6-48-54>

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ГАЗОПРОВОДА ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

© **Николай Иннокентьевич Голиков^{1,2*}, Михаил Михайлович
Сидоров^{1,2}, Игорь Иннокентьевич Санников^{1,2},
Андрей Константинович Родионов³**

¹ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» обособленное подразделение Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, *e-mail: n.i.golikov@mail.ru

² Центр коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, ул. Петровского, д. 2, e-mail: i.i.sannikov@mail.ru

³ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН» обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Россия, 677980, г. Якутск, ул. Петровского, д. 2.

*Статья поступила 17 марта 2020 г. Поступила после доработки 27 марта 2020 г.
Принята к публикации 16 апреля 2020 г.*

В целях обеспечения безопасности длительной эксплуатации трубопроводов в климатических условиях Севера проведена оценка остаточной прочности и технического состояния материала трубы магистрального газопровода диаметром 530 мм из стали 14ХГС. Механические свойства определяли с использованием стандартных методик разрушающих испытаний в лабораторных условиях. Фактические значения трещиностойкости и запаса прочности трубы находили путем натурных испытаний внутренним давлением до разрушения. Такие испытания проводили на стенде, включающем объект исследований и компьютерно-измерительный комплекс, который показывает реакцию объекта на нагрузку. Испытания проводили на фрагменте трубы, который вырезали из линейной части магистрального газопровода и заваривали сферическими заглушками. На наружную поверхность стенки трубы вдоль ее оси наносили надрез, глубину которого рассчитывали таким образом, чтобы разрушающая нагрузка на лигаментное сечение в месте надреза соответствовала рабочему давлению газопровода. Результаты исследований не показали существенных изменений механических свойств металла трубы магистрального газопровода, не получившего видимых коррозионных и деформационных повреждений при длительной его эксплуатации в условиях Севера. Испытания на ударный изгиб не выявили охрупчивания металла труб. Натурные испытания трубы с искусственно нанесенным трещиноподобным концентратором позволили рассчитать значение критического коэффициента интенсивности напряжений, по которому можно оценить остаточную прочность трубы с продольной трещиной. Значение силового критерия механики разрушения свидетельствует о сохранении достаточно высокой вязкости листового металла труб. Подобные испытания применяемых в магистральных газопроводах труб (различных типоразмеров, из разных марок сталей) будут продолжены с учетом диапазонов температур и деградации материала после длительной эксплуатации.

Ключевые слова: магистральный газопровод; натурные испытания; разрушение; механические свойства; критический коэффициент интенсивности напряжений.

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE GAS PIPELINE METAL AFTER LONG-TERM OPERATION IN CONDITIONS OF THE NORTH

© **Nikolay I. Golikov^{1,2*}, Mikhail M. Sidorov^{1,2},
Igor I. Sannikov^{1,2}, Andrey K. Rodionov³**

¹ V. P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Federal Research Center Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Oktyabr'skaya ul. 1, Yakutsk, 677980, Russia; *e-mail: n.i.golikov@mail.ru

² Shared core facilities of the Federal Research Center of the Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Petrovskogo ul. 2, Yakutsk, 677980, Russia; e-mail: i.i.sannikov@mail.ru

³ Institute of Oil and Gas Problems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Federal Research Center 'Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Petrovskogo ul. 2, Yakutsk, 677980, Russia.

Received March 17, 2020. Revised March 27, 2020. Accepted April 16, 2020.

The residual strength and technical condition of the material of 530- mm steel pipe (14KhGS) of main gas pipeline are estimated to ensure the safety of long-term operation of pipelines in climatic conditions of the North. The mechanical properties are determined using standard methods of mechanical testing in laboratory conditions. A full-scale pressure test up to failure is used to determine the actual values of the fracture toughness and safety factor of the pipe. Full-scale tests were carried out on a test bench, a computer-measuring complex which displayed the reaction of the object to the load. A pipe fragment was cut from the linear part of the main gas pipeline and welded with spherical plugs. The outer surface of the pipe was notched along the pipe axis. The depth of the notch was calculated such that the breaking load on the ligament section at the notch site corresponded to the working pressure of the gas pipeline. No significant changes in the mechanical properties of the pipe metal were revealed in the absence of visible corrosion and deformation damage during long-term operation of the pipe in the North. Impact tests did not reveal embrittlement of the metal of the tested pipes. Full-scale tests of a pipe with an artificially applied defect made it possible to calculate the value of the critical stress intensity factor, which allowed us to estimate the residual strength of a pipe with a longitudinal crack. The value of the strength criterion of the fracture mechanics indicates the preservation of a sufficiently high viscosity of sheet metal pipes. Similar tests of the pipes (of other size and made of other materials) operating in the main gas pipelines should be continued taking into account temperature ranges and material degradation after long-term operation.

Keywords: main gas pipeline; full-scale tests; failure; mechanical properties; critical stress intensity factor.

Введение

В настоящее время проблема продления срока службы и безопасной эксплуатации потенциально опасных производственных объектов — одна из важнейших научно-технических задач. Магистральные газопроводы, предназначенные для транспортировки природного газа из районов добычи к пункту потребления, являются объектами повышенного риска, на которых велика вероятность возникновения техногенных аварий, вызванных в том числе и недостаточной эксплуатационной прочностью металла. Разрушения магистральных газопроводов могут привести к большим экономическим потерям, нарушить экологическое равновесие целого региона, вызвать катастрофические последствия для окружающей среды, нарушить жизнеобеспечение населенных пунктов.

В первую очередь это связано с тем, что большинство магистральных газопроводов России на данный момент находится в эксплуатации более 33 лет [1]. В частности, магистральные газопроводы Республики Саха (Якутия) эксплуатируют в зоне распространения вечномёрзлых грунтов с 1970 г., т.е. срок эксплуатации первой нитки газопровода составляет около 50 лет. Большая часть линейных магистральных систем республики расположена в сложных инженерно-геологических условиях — на заболоченных и обводненных территориях, оползневых участках и площадях. На металл труб воздействуют экстремально-климатические факторы, что формирует особые условия эксплуатации газопровода [2 – 5].

Научные исследования [6 – 9], посвященные изучению деградации структуры и изменению механических свойств сталей длительно эксплуа-

тирующихся магистральных газопроводов, показывают, что металл труб в течение длительной эксплуатации не претерпевает особых структурных изменений. Установлено [1], что продолжительность эксплуатации не оказывает заметного влияния на основные механические свойства труб. Основной причиной разрушения подземных газопроводов является коррозия металла труб из-за нарушения защитных свойств изоляционного покрытия. Эти данные подтверждены результатами исследования структуры [6 – 8], а также тем, что механические свойства материала за довольно длительный период эксплуатации труб в составе магистральных газопроводов, находящихся в длительной эксплуатации, соответствуют требуемым нормативным характеристикам [9].

В то же время в некоторых работах [10 – 12] показано, что при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов (более 20 лет) в металлах труб происходят процессы, характерные для деформационного старения. Деградация свойств металла связана с перераспределением углерода, азота и других элементов, эволюцией дислокационной субструктуры, распадом цемента, образованием микротрещин. Это может привести к повышению температуры вязкохрупкого перехода, развитию усталостных процессов, приводящих к снижению критического размера допустимых дефектов, возрастанию опасности коррозионного растрескивания под напряжением.

Анализ возникновения аварий на магистральных системах Якутии позволяет сделать вывод, что вероятность отказов, обусловленных деградационными процессами в металле труб при их длительной эксплуатации, возрастает [13, 14]. Причиной разрушения трубопроводов, как пра-

вило, становятся дефекты типа трещин, а также недостаточное сопротивление материала их распространению при воздействии заданных эксплуатационных факторов (температуры, среды, скорости нагружения, характера и длительности действия нагрузки и т.д.). Поэтому помимо изучения влияния длительной эксплуатации на механические свойства металла газопровода, возникает необходимость определения величины сопротивления материала распространению в нем трещины (его трещиностойкости) и учета значений этой характеристики при оценке остаточной прочности материала в конструкции при заданных условиях ее эксплуатации.

Исследование изменения механических свойств трубных сталей в процессе длительной эксплуатации имеет большое значение для понимания процессов разрушения, а определение фактических значений параметров трещиностойкости и запасов прочности реальных металлоконструкций невозможно без проведения натурных испытаний [15, 16]. Прикладная задача таких исследований состоит в оценке остаточной прочности и технического состояния материала труб, а также выработке прогнозов, касающихся перспектив дальнейшей безопасной эксплуатации действующих газопроводов.

Цель работы — исследование механических свойств металла газопровода из стали 14ХГС после длительной эксплуатации в экстремальных условиях Севера.

Методы исследования

Исследовали фрагменты трех труб (из ферритно-перлитной стали 14ХГС) диаметром 530 мм и толщиной стенки 8 мм, вырезанные из участка магистрального газопровода после длительной эксплуатации (в течение 50 лет) с рабочим давлением 3,5 – 5,5 МПа. При визуальной оценке металла труб наличие коррозионных и деформационных повреждений не было обнаружено. Трубы имели сертификаты качества (1963 г.), в которых приведены данные о марке стали, пределах прочности и текучести по результатам заводских испытаний.

Испытания образцов на статическое растяжение проводили по ГОСТ 10006–80 и ГОСТ 1497–84 посредством нагружения на электромеханической испытательной машине Zwick/Roell Z600, испытания на ударный изгиб — по ГОСТ 9454–78 на инструментированном маятниковом копре Amsler RKP 450. Надрезы образцов (V-образные) наносили специальными ножами (протяжками) на моторизованном станке Black Charpy. Температуру испытания в диапазоне от –60 до +20 °С обеспечивали охлаждением образцов в климатической камере Lauda RP 890. Зна-

чение ударной вязкости находили усреднением результатов испытаний трех образцов.

Химический состав металла труб определяли в соответствии с ГОСТ 18895–97 на оптико-эмиссионном анализаторе Foundry-Master.

Натурные гидравлические испытания проводили в специальном бетонном бункере. На рис. 1 приведена схема испытательного стенда нагружения фрагмента трубы внутренним давлением.

Испытательный стенд представляет собой систему для проведения натурных испытаний трубы и компьютерно-измерительного комплекса для снятия показателей реакции испытываемого объекта на нагрузку. Трубу 1 непрерывно нагружали путем закачки воды из заправочной емкости 3 посредством ручного насоса НР до разрушающего давления с одновременной регистрацией температуры. Внутреннее давление при испытаниях измеряли манометром МН. Температуру металла трубы во время испытания регистрировали преобразователем сигналов, приходящих от термометров сопротивления (ТС) и термопар прецизионных (ТП), «Теркон» 4. Давление поднимали со скоростью 0,12 – 0,16 МПа/мин.

Испытания проводили на отрезке трубы длиной 6 диаметров, который был вырезан из линейного участка трубы магистрального газопровода и заварен сферическими заглушками (рис. 2, а). На наружной поверхности стенки трубы вдоль ее оси был нанесен надрез длиной 260 мм (рис. 2, б). Глубину надреза рассчитывали таким образом, чтобы разрушающая нагрузка на лигаментное сечение в месте надреза соответствовала рабочему давлению газопровода; радиус надреза — 0,7 мм.

Результаты исследований

В табл. 1 приведены данные спектрального анализа металла исследованных труб. По содержанию химических элементов он соответствует составу стали марки 14ХГС по ГОСТ 19281–2014. По элементам С, Si, Mn, Cr металл исследованных труб и сталь 14ХГС различаются в пределах 15 – 29 %.

В табл. 2 представлены результаты механических испытаний сталей исследованных труб и данные сертификатов. При сравнении выявлено, что пределы текучести (σ_T) и прочности (σ_B) исследованных труб не выходят за диапазоны данных сертификатов.

Данные испытаний на ударный изгиб представлены в табл. 3. Здесь же для сравнения приведены минимальные требования к значениям ударной вязкости толстолистового, широкополосного универсального проката и гнутых профилей по ГОСТ 19281–2014 для стали 14ХГС.

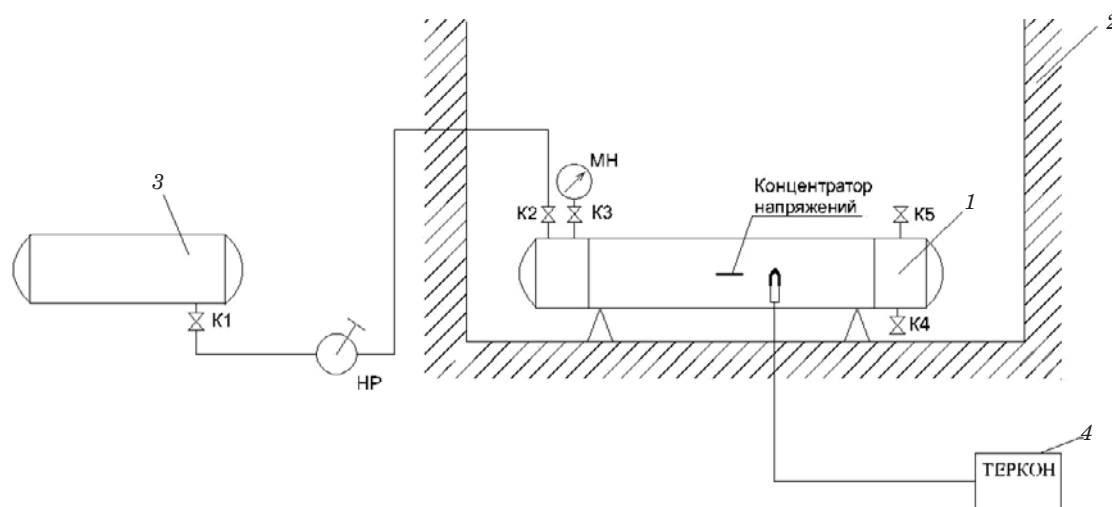


Рис. 1. Схема системы испытания и компьютерно-измерительного комплекса: 1 — испытуемая труба; 2 — бункер; 3 — заправочная емкость; 4 — преобразователь сигналов термометров сопротивления (ТС) и термопар прецизионных (ТП) «Теркон»; K1, K2, K3, K4 — шаровые краны; K5 — воздушный кран; MN — манометр механический; HP — подкачивающий насос ручной

Fig. 1. Diagram of the test system and computer-measuring complex: 1 — test pipe; 2 — hopper; 3 — refueling capacity; 4 — signal converter of resistance thermometers (TS) and thermocouples precision (TP) “Terkon”; K1, K2, K3, K4 — ball valves; K5 — air valve; MN — mechanical pressure gauge; HP — manual booster pump



Рис. 2. Фрагмент трубы диаметром 530 мм (а) и вид продольного надреза на трубе при гидравлическом испытании (б)

Fig. 2. A 530-mm pipe fragment (a) and a longitudinal notch on the pipe during a hydraulic test (b)

Результаты спектрального анализа и механических испытаний показали, что по химическому составу и механическим характеристикам основной металл всех трех труб магистрального газопровода соответствует стали 14ХГС (ГОСТ 19281–2014). Динамические испытания не вы-

явили охрупчивания металла труб — ударная вязкость оказалась не ниже минимальных значений по стандарту (см. табл. 3).

При оценке остаточной прочности конструкций ответственного назначения широко используют принцип безопасного повреждения, до-

Таблица 1. Химический состав (%) металла трубы (числитель) и стали 14ХГС согласно ГОСТ 19281 (знаменатель)

Table 1. Chemical composition (%) of pipe metal (numerator) and steel 14KhGS according to GOST 19281 (denominator)

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Al	Fe
0,11–0,15	0,49–0,64	1,03–1,21	0,56–0,79	0,04–0,06	0,03	0,03	0,04–0,06	0,02	Ост.
0,11–0,16	0,40–0,70	0,90–1,30	0,50–0,80	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,35	≤ 0,30	–	–



Рис. 3. Трещина, образовавшаяся при испытаниях фрагмента линейного участка трубы

Fig. 3. The crack formed upon testing of the pipe fragment

пускающий наличие дефекта в изделии. Критический размер дефекта оценивают методами механики разрушения, в которых применяют параметры трещиностойкости. Наиболее достоверные значения трещиностойкости конструкций определяют путем натурных испытаний.

Окружное напряжение в стенке трубы оценивали по формуле

$$\sigma_{\theta} = pR/t,$$

где p — давление; R и t — радиус и толщина стенки трубы. Критический коэффициент интенсивности напряжений определяли как [17]

$$K_c^2 = \frac{\pi a \sigma_{\theta}^2}{\cos \Theta} M^2 \frac{4-x}{2},$$

где a — полудлина трещины; M — коэффициент концентрации напряжений сквозной трещины в цилиндре; $\cos \Theta$ — поправка на наличие пластической зоны; $(4-x)/2$ — поправка, учитывающая напряженное состояние в заглушенном трубопроводе.

Размеры испытанной трубы: $R = 257$ мм; $t = 8$ мм; $l = 130$ мм; температура испытаний — от 0 до -1 °С. Разрушение наступило при давлении 57 атм (рис. 3). Окружное напряжение в стенке трубы в момент разрушения составляло

Таблица 2. Средние значения механических свойств металла труб (числитель) и данные сертификатов на эти трубы (знаменатель)

Table 2. The mechanical properties of the pipe metal (numerator) and reference certified data for those pipes (denominator)

σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %
361 – 404	519 – 563	30 – 33
350 – 480	510 – 595	–

0,5 σ_T , что соответствовало 185 МПа. Величина критического коэффициента интенсивности напряжений $K_c = 416$ МПа · м^{1/2}. Данное значение силового критерия механики разрушения K_c свидетельствует о достаточно высокой вязкости листового металла труб и превышает минимально нормируемый показатель K_c — не менее 400 МПа · м^{1/2} [16]. Результаты коррелируют с данными работы [18], где приведены значения трещиностойкости для новых труб из аналогичного класса сталей.

Заключение

Исследования механических свойств трубы из стали 14ХГС магистрального газопровода диаметром 530 мм, не имеющего видимых коррозионных и деформационных повреждений, не выявили существенного их изменения в процессе длительной эксплуатации в условиях Севера.

В результате натурных испытаний участка трубы с искусственно нанесенным трещиноподобным концентратором получен критический коэффициент интенсивности напряжений $K_c = 416$ МПа · м^{1/2}. Значение параметра K_c позволило оценить остаточную прочность трубы с продольной трещиной.

В дальнейшем необходимо продолжить подобные испытания в целях определения трещиностойкости большинства применяемых в магистральных газопроводах типоразмеров труб из разных марок сталей с учетом диапазонов температур и деградации материала после длительной эксплуатации. Особый интерес вызывают натурные испытания труб с кольцевыми сварными соединениями магистрального газопровода из-за их частых разрушений в условиях Севера.

Благодарность

Авторы выражают благодарность инженерам ИФТПС СО РАН Тихонову Р. П., Семенову С. В., Литвинцеву Н. М., сотрудникам ООО «Газэкспертсервис» и ЛПУМГ АО «Сахатранснефтегаз», принимавших участие в натурных испытаниях труб.

Таблица 3. Средние значения ударной вязкости металла исследованных труб

Table 3. Impact toughness of the studied metal pipes

Материал	Температура испытания, °С	Ударная вязкость, Дж/см ²
Металл труб	+20	124 – 143
	–10	126 – 134
	–40	62 – 124
Сталь 14ХГС (ГОСТ 19281–2014) толщиной от 5 до 12 мм	–20	Не менее 34

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лубенский С. А., Ямников С. А. Влияние длительности эксплуатации на свойства металла труб магистральных газопроводов / Проблема анализа риска. 2013. Т. 10. № 1. С. 58 – 63. eLIBRARY ID: 21402065.
2. Капитонова Т. А., Стручкова Г. П., Тарская Л. Е., Ефремов П. В. Анализ факторов риска трубопроводов, проложенных в условиях криолитозоны с использованием ГИС-технологий / Фундаментальные исследования. 2014. № 5. С. 954 – 958.
3. Слепцов О. И., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А., Степанов А. А. Оценка риска возникновения ЧС на участках трубопроводов условиях криолитозоны / Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2018. — Якутск: Изд-во Цумори Пресс, 2018. С. 604 – 607.
4. Махутов Н. А., Лебедев М. П., Большаков А. М., Захарова М. И. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций на газопроводах в условиях Севера / Вестник Российской академии наук. 2017. Т. 87. № 9. С. 858 – 862. DOI: 10.7868/S0869587317090158.
5. Голиков Н. И., Аммосов А. П. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера. — Якутск: СВФУ, 2012. — 323 с.
6. Филиппов Г. А., Ливанова О. В., Дмитриев В. Ф. Дегградация свойств металла при длительной эксплуатации магистральных трубопроводов / Сталь. 2003. № 2. С. 84 – 87.
7. Мочернюк Н. П., Красневский С. М., Лазаревич Г. И., Сорохин Ц. Д., Герасимчик И. И. Влияние времени эксплуатации магистрального газопровода и рабочего давления газа на физико-механические характеристики трубной стали 19Г / Газовая промышленность. 1991. № 3. С. 34 – 36.
8. Лякишев Н. П., Кантор М. М., Воронин В. Н., Тимофеев В. Н., Шарыгин Ю. М. Исследование структуры металла газопроводов после их длительной эксплуатации / Металлы. 2005. № 1. С. 3 – 6.
9. Махутов Н. А., Пермяков В. Н., Кравцова Ю. А., Ботвина Л. Р. Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 2. С. 35 – 43.
10. Сыромятникова А. С. Дегградация физико-механического состояния металла труб магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях криолитозоны / Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 2. С. 85 – 91.
11. Голиков Н. И., Литвинцев Н. М. Изменение механических свойств и структурных показателей металла конструкций, эксплуатируемых в условиях Севера / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 12. С. 60 – 65.
12. Makhutov N. A., Bolshakov A. M., Zakharova M. I. Possible scenarios of accidents in reservoirs and pipelines at low operating temperature / Inorganic Materials. 2016. Vol. 52. Issue 15. P. 1498 – 1502.
13. Ivanov A., Bolshhev K., Bolshakov A., Syromyatnikova A., Alexeev A., Burnashev A., Andreev Y., Prokopiev L., Grigoriev A., Cheremkin M., Efimov V., Golikov N., Makharova S., Zhirkov A. The corrosion damage mechanisms of the gas pipelines in the Republic of Sakha (Yakutia) / Collector: E3S Web of Conferences. 2019. P. 03002.
14. Большаков А. М., Сыромятникова А. С. Разрушения и повреждения объектов магистрального газопровода при длительной эксплуатации в условиях Арктики / Наука и образование. 2015. № 4(80). С. 94 – 99. eLIBRARY ID: 24922340.
15. Макаров Г. И. Проверка качества сварных труб для магистральных газопроводов на соответствие нормативным тре-

бованиям статической и динамической трещиностойкости / Наука о земле. 2018. № 3(292). С. 112 – 124.

16. Варламов Н. В., Поликарпов К. В., Макаров Г. И., Горицкий В. Н. Натурные испытания труб и ремонтных конструкций на испытательном полигоне ОАО ВНИИСТ / Трубопроводной транспорт: теория и практика. 2010. № 6(22). С. 4 – 6.
17. Красовский А. Я., Красико В. Н. Трещиностойкость стальных магистральных трубопроводов. — Киев: Наукова Думка, 1990. — 176 с.
18. Ларионов В. П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. — Новосибирск: Наука, 1986. — 256 с.

REFERENCES

1. Lubenskiy S. A., Yamnikov S. A. The influence of the duration of operation on the properties of metal pipes / Probl. Anal. Riska. 2013. Vol. 10. N 1. P. 58 – 63 [in Russian].
2. Kapitonova T. A., Struchkova G. P., Tarskaya L. Ye., Yefremov P. V. Analysis of risk factors for pipelines laid in the permafrost using GIS-technologies / Fundam. Issl. 2014. N 5. P. 954 – 958 [in Russian].
3. Sleptsov O. I., Struchkova G. P., Kapitonova T. A., Stepanov A. A. Influence of the natural fibrous additive on properties / Proceedings of VIII Eurasian Symposium on the problems of the strength of materials and machines for cold climate regions EURASTRENCOLD-2018. — Yakutsk: Tsumori Press, 2018. P. 604 – 607 [in Russian].
4. Makhutov N. A., Lebedev M. P., Bol'shakov A. M., Zakharova M. I. Features of emergency situations on gas pipelines in the North / Vestn. RAN. 2017. Vol. 87. N 9. P. 858 – 862. DOI: 10.7868/S0869587317090158.
5. Golikov N. I., Ammosov A. P. Strength of welded joints of tanks and pipelines operating in the conditions of the North. — Yakutsk: Izd. SVFU, 2012. — 323 p. [in Russian].
6. Filippov G. A., Livanova O. V., Dmitriev V. F. Degradation of metal properties during long-term operation of trunk pipelines / Stal'. 2003. N 2. P. 84 – 87 [in Russian].
7. Mochernyuk N. P., Krasnevsky S. M., Lazarevich G. I., Sorokhin Ts. D., Gerasimchik I. I. The influence of the operating time of the main gas pipeline and the working gas pressure on the physicomechanical characteristics of pipe steel 19G / Gaz. Promyshl. 1991. N 3. P. 34 – 36 [in Russian].
8. Lyakishev N. P., Kantor M. M., Voronin V. N., Timofeev V. N., Sharygin Yu. M. Investigation of the metal structure of gas pipelines after their long-term operation / Metally. 2005. N 1. P. 3 – 6 [in Russian].
9. Makhutov N. A., Permyakov V. N., Kravtsova Yu. A., Botvina L. R. Assessment of the condition of the product pipeline material after its long-term operation / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 2. P. 35 – 43 [in Russian].
10. Syromyatnikova A. S. Degradation of physical and mechanical condition of the main gas pipeline metal at long operation in the conditions of the cryolitzone / Fiz. Mezomekh. 2014. Vol. 17. N 2. P. 85 – 91 [in Russian].
11. Golikov N. I., Litvintsev N. M. Change in mechanical properties and structural parameters of metal structures operated in the North / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 12. P. 60 – 65 [in Russian].
12. Makhutov N. A., Bolshakov A. M., Zakharova M. I. Possible scenarios of accidents in reservoirs and pipelines at low operating temperature / Inorganic Materials. 2016. Vol. 52. Issue 15. P. 1498 – 1502.
13. Ivanov A., Bolshhev K., Bolshakov A., Syromyatnikova A., Alexeev A., Burnashev A., Andreev Y., Prokopiev L., Grigoriev A., Cheremkin M., Efimov V., Golikov N., Makharova S., Zhirkov A. The corrosion damage mechanisms of the gas pipelines in the Republic of Sakha (Yakutia) / Collector: E3S Web of Conferences. 2019. P. 03002.
14. Bol'shakov A. M., Syromyatnikova A. S. Destructions and Damages of Objects of the Main Gas Pipeline at Long Operation

- in Conditions of the Arctic / Nauka Obrazov. 2015. N 4(80). P. 94 – 99 [in Russian].
15. **Makarov G. I.** Quality control of welded pipes for gas pipelines for compliance with regulatory requirements for static and dynamic crack resistance / Nauka o zemle. 2018. N 3(292). P. 112 – 124 [in Russian].
 16. **Varlamov N. V., Polikarpov K. V., Makarov G. I., Goritsky V. N.** Field tests of pipes and repair structures at the testing range of VNIIST OJSC / Truboprovod. Transport. Teor. Prakt. 2010. N 6(22). P. 4 – 6 [in Russian].
 17. **Krasovsky A. Ya., Krasiko V. N.** Crack resistance of steel pipelines. — Kiev: Naukova Dumka, 1990. — 176 p. [in Russian].
 18. **Larionov V. P.** Electric arc welding of structures in the northern version. — Novosibirsk: Nauka, 1986. — 256 p. [in Russian].