

Влияние фактических закономерностей распределения предела текучести стали 17Г1С на коэффициент запаса прочности участков магистрального газопровода

DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10029

С.Л. Голофаст

д.т.н., профессор

sgolofast@gazpromproject.ru

ООО «Газпром проектирование», Санкт-Петербург, Россия

В работе представлены результаты расчета коэффициента запаса прочности для участков магистрального газопровода с учетом случайной природы внешней нагрузки и предела текучести σ_T материала труб разного сортамента. На основе фактических значений коэффициента запаса выполнена оценка текущего уровня надежности участков магистрального газопровода. Обоснована необходимость учета индивидуальных законов распределения предела текучести материала труб различного сортамента, применявшихся на этапе строительства магистрального газопровода, при определении класса безопасности участка.

Материалы и методы

Расчет проектных значений коэффициента запаса для участков магистрального газопровода выполнен на основе строительных норм и правил (СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы). Обработка экспериментальных значений предела текучести, полученных в результате механических испытаний, выполнена на основе методов непараметрической статистики. Оценка фактических значений коэффициента запаса прочности и текущего уровня надежности участков магистрального газопровода выполнена на основе СТО ПАО Газпром 2-2.3-184-2007, а также методов теории вероятности и теории надежности.

Ключевые слова

магистральный газопровод, линейная часть, трубная сталь, предел текучести, надежность, коэффициент запаса прочности

Введение

Решение задачи оценки текущего уровня надежности участков находящегося на этапе эксплуатации магистрального газопровода (далее — МГ) основано на использовании вероятностных методов. Реализация данных методов требует установления закономерностей изменения случайного спектра внешней нагрузки и предельных для материала трубы напряжений. В зависимости от норм расчета в качестве предельных напряжений выбирают предел прочности, предел текучести или предел выносливости. Данные параметры относятся к физико-механическим характеристикам материала трубопровода и имеют случайную природу, которая является причиной различий в закономерностях и пределах изменения этих параметров в зависимости от предприятия-изготовителя, технических условий и стандартов, действовавших на дату выпуска трубной продукции, срока и условий эксплуатации МГ [1, 2, 3, 4]. Вследствие этого фактический уровень надежности линейного участка магистрального газопровода будет определяться индивидуальными закономерностями распределения физико-механических свойств металла труб, применявшихся на этапе строительства или ремонта. Отечественная и зарубежная нормативная документация предполагают принятие нормальных законов распределения для прочностных характеристик в вероятностных методах расчета показателей надежности МГ. Аналогичный подход принят и в научно-технической литературе [5, 6, 7, 8]. Однако для фактических распределений не всегда возможно отнести выборку значений случайных величин, в качестве которых принимаются прочностные характеристики металла труб, к нормальному закону и определить его параметры. При определении несущей способности труб по данным механических испытаний профессор Г.К. Клейн принимал допущение, что распределение прочностных характеристик подчиняется

закону Фостера, являющемуся более общим, чем распределение Гаусса. В более поздних исследованиях, результаты которых представлены в работе [9], авторы рекомендуют при описании распределений прочностных характеристик применять более универсальный и гибкий закон Грамма-Шарлье, который в отличие от нормального закона зависит не от двух, а от четырех параметров, таких как среднее значение, среднее квадратическое отклонение, асимметрия и эксцесс. При этом данный закон также не всегда позволяет корректно описать реальный спектр изменения предельных напряжений, что напрямую влияет на достоверность результатов решения задач по оценке фактической надежности и безопасности находящихся на этапе эксплуатации таких потенциально опасных объектов, как магистральные газопроводы.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния различий в закономерностях распределения предела текучести стали 17Г1С и вида закона, принятого при описании данных закономерностей, на величину коэффициента запаса прочности при оценке уровня текущей надежности линейных участков МГ по критерию прочности.

Теоретическая часть

На этапе проектирования участков подземных магистральных газопроводов для обеспечения их надежной и безотказной работы в расчетах на прочность и устойчивость в соответствии со СНиП 2.05.06-85* [10] используют проектные значения коэффициента запаса K_{np} , расчет которого производится по формуле:

$$K_{np} = \frac{n \cdot k_1 \cdot k_n}{m}, \quad (1)$$

где n — коэффициент надежности по внутреннему давлению;

k_1 — коэффициент надежности по материалу труб;

	Класс безопасности участка МГ	Формула для расчета коэффициента запаса
1.	Высокий (проектный)	K_{np}
2.	Средний	$K_4 = \frac{k_1}{6 + k_1} \cdot (1 + 6 \cdot k_n)$
3.	Нормальный	$K_3 = \frac{k_1}{2,5 + k_1} \cdot (1 + 2,5 \cdot k_n)$
4.	Низкий	$K_2 = \frac{k_1}{1,2 + k_1} \cdot (1 + 1,2 \cdot k_n)$

* k_n — коэффициент перегрузки [5].

Таб. 1 — Формулы для расчета коэффициентов запаса в зависимости от классов безопасности линейных участков МГ

Tab. 1 — Formulas for calculating the safety factors depending on the safety classes of the main gas pipelines linear sections

k_n — коэффициент надежности по назначению трубопровода;
 m — коэффициент условий работы трубопровода.

Однако на этапе эксплуатации участков газопроводов вследствие отличия фактических значений механических свойств материала трубы от сертификационных, различия в прочностных характеристиках основного металла и сварных соединений, учета реальной нагруженности, отклонения оси МГ от проектных положений, наличия дефектов и влияния ряда других случайных факторов, значение фактического коэффициента запаса K_ϕ , как правило, отличается от проектного K_{np} , причём в меньшую сторону.

Сравнение фактических значений коэффициентов запаса прочности участков линейной части магистральных газопроводов с допускаемыми значениями позволяет оценить техническое состояние находящегося в эксплуатации магистрального газопровода и текущий уровень его надежности (класс безопасности).

В соответствии со Стандартом ПАО «Газпром» [5] различают четыре класса безопасности для участков линейной части МГ на этапе эксплуатации:

- высокий (проектный);
- средний;
- нормальный;
- низкий.

Допускаемые значения коэффициента запаса для различных классов безопасности рассчитывают по формулам, приведенным в таб. 1 [5].

С учетом эксплуатационных нагрузок и прочностных характеристик материала трубы, применявшейся на этапе строительства, величина фактического коэффициента запаса для исследуемого участка определяется как частное двух случайных величин s и σ :

$$K_\phi = \frac{s}{\sigma}, \quad (2)$$

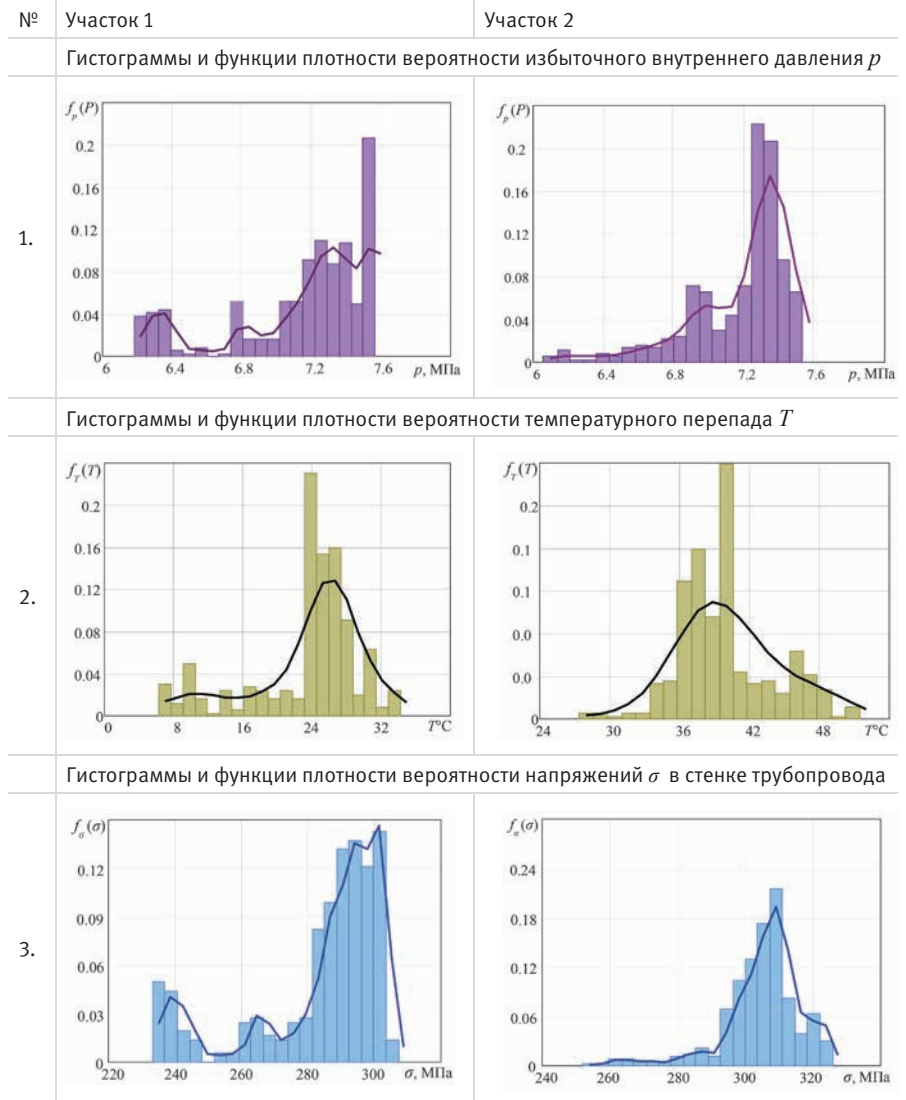
где s — предельные для материала трубы напряжения (МПа), имеющие некоторую функцию плотности распределения вероятности $f_s(s)$, а σ — фактические кольцевые напряжения в трубе (МПа) с функцией плотности распределения $f_\sigma(\sigma)$. В общем случае фактические напряжения, возникающие в стенке трубопровода, определяются на основе известных зависимостей [11]:

$$\sigma = \sigma(p, T, D_n, \delta, h, L, \psi) \quad (3)$$

где p — избыточное давление в газопроводе (МПа), T — температурный перепад вдоль исследуемого участка МГ ($^{\circ}\text{C}$), D_n — наружный диаметр трубы (мм), δ — номинальная толщина стенки трубы (мм), h — максимальная глубина дефекта (мм), L — длина дефекта (мм), ψ — коэффициент концентрации напряжений, вызываемый наличием дефекта трубы с размерами h и L .

Очевидно, что при данном подходе фактический коэффициент запаса K_ϕ будет также являться величиной случайной, функция плотности распределения которого $f_{K_\phi}(K_\phi)$ не известна и может быть определена согласно выражения (2) на основании функций $f_s(s)$ и $f_\sigma(\sigma)$.

Реализация изложенного в Стандарте [5] подхода к оценке текущего уровня надежности участков линейной части МГ основана



Таб. 2 — Примеры закономерностей распределения давления, температуры и напряжений в стенке трубопровода для различных участков МГ

Tab. 2 — Examples of patterns of distribution of pressure, temperature and stresses in the wall of the pipe for different main gas pipelines sections

на принятии нормальных законов распределения для внешней нагрузки и прочностных характеристик материала трубы для описания неизвестных функций $f_s(s)$ и $f_\sigma(\sigma)$. При этом результаты оценки прочностной надежности магистральных нефте и газопроводов, представленные в работах [12, 13, 14], свидетельствуют, что такие случайные величины, как избыточное внутреннее давление и температурный перепад ΔT , определяющие спектр фактических напряжений σ , возникающих в стенке трубопровода, в большинстве случаев имеют не только индивидуальные для каждого участка, но и весьма специфические асимметричные полимодальные распределения, отности которые к нормальному закону не всегда корректно, а в ряде случаев невозможно. Примеры таких данных для двух участков линейной части (условно обозначены Участок 1 и Участок 2) магистрального газопровода, расположенного на территории Западной Сибири, приведены в таб. 2 [12].

Результаты исследований закономерностей распределения и пределов рассеивания механических характеристик трубных сталей позволяют сделать вывод, что предельные напряжения также имеют весьма специфические распределения, принятие для которых

нормальных законов не всегда обосновано. Более того, закономерности распределения данных случайных величин существенно отличаются даже при одинаковых стандартах (технических условиях) на трубную продукцию. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены построенные на основании экспериментальных данных гистограммы частот распределения предела текучести σ_T для материала труб, изготовленных в разные периоды времени из одной и той же стали 17Г1С согласно ТУ 14-3-109-73 на Харцызском ТЗ и Челябинском ТПЗ [3, 4].

В связи с этим на базе аппарата непараметрической математической статистики разработаны методы и алгоритмы, позволяющие для любой случайной величины, принимаемой при решении задач оценки прочностной надежности МГ, получить функцию плотности вероятности вне зависимости от сложности закона ее распределения. Для восстановления на основе выборки значений случайной величины $X_i, i = \overline{1, m}$ искомым функции плотности ее распределения $f_X(X)$ в рамках одного из подходов, реализуемых на базе методов непараметрической статистики, функция $f_X(X)$ представляется в виде разложения:

$$f_X(X) = \frac{1}{m \cdot h_X \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \sum_{i=1}^m \exp\left[-0,5 \left(\frac{X - X_i}{h_X}\right)^2\right] \cdot \frac{1}{c_X}, \quad (4)$$

где

$$c_X = \frac{1}{m \cdot h_X \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{X_{\min}}^{X_{\max}} \sum_{i=1}^m \exp\left[-0,5 \left(\frac{X - X_i}{h_X}\right)^2\right] dX, \quad (5)$$

а h_X — параметр сглаживания, определяющий, по каким элементам выборки будет происходить сглаживание и, как следствие, точность получаемых в итоге оценок. Вычисление оптимального значения параметра h_X производится в

результате поиска максимума информационного функционала:

$$\max_{h_X} J = \max_{h_X} \left\{ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \ln \left[\frac{1}{(m-1)h_X} \sum_{j=1}^{m-1} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \exp\left[-0,5 \left(\frac{X_i - X_j}{h_X}\right)^2\right] \right] \right\}. \quad (6)$$

Примеры решения на основе изложенного подхода задач оценки прочностной надежности МТ, включая реализацию методик определения функций плотности вероятности $f_s(s)$ и $f_\sigma(\sigma)$ для предельных s и возникающих в стенке трубы вследствие случайного

спектра внешних нагрузок фактических напряжений σ , а также функции $f_{K_\phi}(K_\phi)$ для коэффициента запаса, подробно рассмотрены в работах [12, 13, 14, 15, 16, 17].

При известной функции $f_{K_\phi}(K_\phi)$, для K_ϕ можно рассчитать любые значения квантилей K_ϕ^α путем численного решения уравнения:

$$\int_{K_{\phi_{\min}}}^{K_\phi^\alpha} f_{K_\phi}(K_\phi) dK_\phi = \alpha. \quad (7)$$

Очевидно, что функции плотности вероятности $f_{K_\phi}(K_\phi)$ фактического коэффициента запаса K_ϕ , полученные на основании выражения (2) для разных выборок предельных напряжений (в данном случае — предел текучести σ_p), гистограммы которых приведены на рисунках 1 и 2, будут различными. Причем отличие будет определяться не только различием в частотах распределения предела текучести материала труб разных производителей, но видом закона, к которому при обработке будут отнесены выборки экспериментальных значений σ_p при восстановлении искомым функций $f_s(s)$.

Представленная информация свидетельствует о необходимости учета при оценке текущего уровня надежности МГ индивидуальных, в зависимости от производителя и даты выпуска, закономерностей распределения прочностных характеристик материала труб.

Пример расчета

Оценку влияния случайной природы механических характеристик трубной стали 17Г1С на текущий уровень надежности участка находящегося в эксплуатации магистрального газопровода выполним для исходных данных, приведенных в таб. 3.

На основании данных, представленных в таб. 1, произведем предварительные расчеты.

Определим значение проектного коэффициента запаса K_{np} по формуле (1):

$$K_{np} = \frac{n \cdot k_1 \cdot k_n}{m} = \frac{1,1 \cdot 1,34 \cdot 1,1}{0,9} = 1,8 \quad (8)$$

По формулам, приведенным в таб. 1 и данным таб. 3, вычислим допускаемые значения коэффициентов запаса, которые соответствуют классам безопасности, принятым для линейных участков магистральных газопроводов:

$$K_4 = \frac{k_1}{6 + k_1} \cdot (1 + 6 \cdot k_n) = \frac{1,34}{6 + 1,34} \left(1 + 6 \cdot \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,9}\right) = 1,66 \quad (5)$$

$$K_5 = \frac{k_1}{2,5 + k_1} \cdot (1 + 2,5 \cdot k_n) = \frac{1,34}{2,5 + 1,34} \left(1 + 2,5 \cdot \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,9}\right) = 1,52 \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{k_1}{1,2 + k_1} \cdot (1 + 1,2 \cdot k_n) = \frac{1,34}{1,2 + 1,34} \left(1 + 1,2 \cdot \frac{1,1 \cdot 1,1}{0,9}\right) = 1,38 \quad (7)$$

Решение задачи оценки текущего уровня надежности рассмотрим на примере двух участков МГ Уренгой-Сургут-Челябинск. Первый участок находится на линейной части после компрессорной станции КС-03, а второй — после КС-10. Данные участки имеют одинаковую категорию, но подвержены различному спектру внешней нагрузки, вследствие чего напряжения, возникающие в стенке трубы, имеют различные закономерности и пределы изменения (стр. 3, таб. 2). Расчеты для каждого из участков выполним по двум

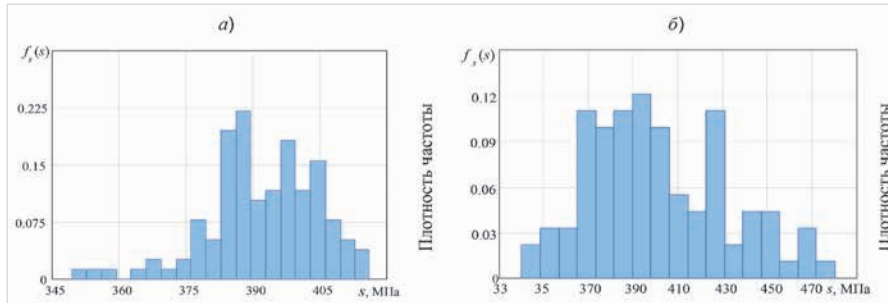


Рис. 1 — Гистограммы частот распределения предельных напряжений для материала труб, изготовленных на Харцизском ТЗ:
а) предел текучести σ_p для материала труб, произведенных до 1975 г.
б) предел текучести σ_p для материала труб, произведенных после 1975 г.

Fig. 1 — Histogram of limit stresses distribution frequencies of the material of pipe manufactured at Khartsizsk Tube Plant:

- a) yield strength for pipe material produced before 1975
b) yield strength for pipe material produced after 1975

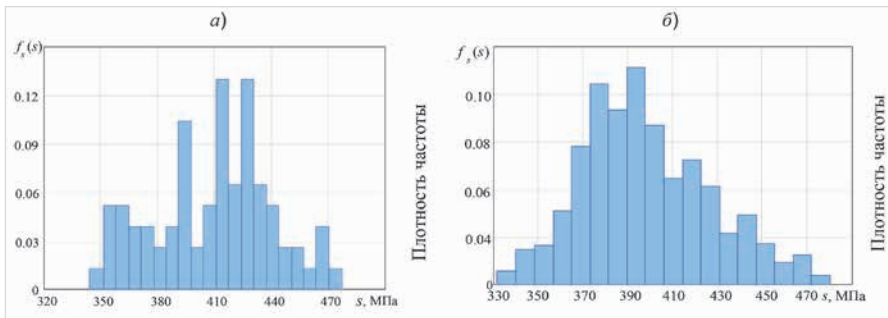


Рис. 2 — Гистограммы частот распределения предельных напряжений для материала труб, изготовленных на Челябинском ТПЗ:
а) предел текучести σ_p для материала труб, произведенных до 1975 г.
б) предел текучести σ_p для материала труб, произведенных после 1975 г.

Fig. 2 — Histogram of limit stresses distribution frequencies of the material of pipe manufactured at Chelyabinsk Pipe Rolling Plant:

- a) yield strength for pipe material produced before 1975
b) yield strength for pipe material produced after 1975

1.	Материал трубы	Сталь 17Г1С
2.	Стандарт (технические условия)	ТУ14-3-109-73
3.	Изготовитель трубы	Харцизский ТЗ Челябинский ТПЗ
4.	Внешний диаметр трубы	$D_n = 1420$ мм
5.	Толщина стенки	$t = 20$ мм
6.	Категория участка	III
7.	Коэффициент надежности по внутреннему давлению	$n = 1,1$
8.	Коэффициент условий работы	$m = 0,9$
9.	Коэффициент надежности по материалу труб	$k_1 = 1,34$
10.	Коэффициент надежности по назначению трубопровода	$k_n = 1,1$
11.	Нормативное рабочее давление	$p = 7,4$ МПа

Таб. 3 — Исходные данные для расчета
Tab. 3 — The source data for the calculation

вариантам. В первом варианте предположим, что при строительстве рассматриваемых участков применялась труба производства Харцизского ТЗ, а во втором варианте — Челябинского ТПЗ. В качестве предельных напряжений используем выборки экспериментальных данных о пределе текучести $\sigma_{Tj}, i=1,77$ и $\sigma_{Tj}, j=1,116$ для материала труб каждого из производителей, гистограммы которых представлены на рисунках 1а) и 2а). По каждому варианту выполним расчет коэффициента K_ϕ для двух случаев. В первом случае для определения функции плотности предельных напряжений $f_s(s)$ примем нормальный закон распределения, параметры которого определены по имеющейся выборке экспериментальных значений s, σ_T , а во втором функцию $f_s(s)$ восстановим на основе методов непараметрической статистики с учетом фактического закона распределения предела текучести. Таким образом при одинаковом спектре внешней нагрузки и аналогичных геометрических параметрах труб представляется возможность сравнить полученные результаты оценки текущего уровня надежности исследуемых участков в зависимости от закона, принятого для описания выборки значений предела текучести.

Графическая иллюстрация к результатам определения функции плотности предельных напряжений $f_s(s)$ для материала труб производства Харцизского ТЗ в соответствии с рассмотренными выше случаями обработки выборки экспериментальных значений $\sigma_{Tj}, i=1,77$ приведена на рис. 3. Аналогичная информация для труб производства Челябинского ТПЗ, полученная на основе статобработки выборки $\sigma_{Tj}, j=1,116$, представлена на рис. 4.

Для функций плотности $f_\sigma(\sigma)$ возникающих в стенке трубы напряжений $f_s(s)$, приведенных в 3 строке таб. 2 и предельных напряжений $f_{K_\phi}(K_\phi)$, представленных на рис. 3 и 4, в результате решения задачи (2) получены искомые функции плотности вероятности коэффициента запаса.

Графическая иллюстрация к определению функции $f_{K_\phi}(K_\phi)$ для Участка 1 по первому варианту для каждого расчетного случая приведена на рис. 5, а по второму варианту — на рис. 6. Соответствующая информация для Участка 2 по аналогичным вариантам расчета приведена на рис. 7 и 8.

Сводные данные о результатах расчета квантильных значений коэффициента запаса (при уровне значимости $\alpha=0,05$) для всех, рассматриваемых в представленном примере вариантов и расчетных случаев, приведены в таб. 4.

Анализ результатов

Выполним анализ результатов, представленных на рис. 5–8 и в таб. 4.

Вследствие отличий в закономерностях распределения значений предела текучести материала труб и вида закона, принятого при определении функции плотности вероятности $f_s(s)$ для описания выборки значений предельных напряжений s , функции плотности $f_{K_\phi}(K_\phi)$ коэффициента запаса для каждого рассмотренного в примере варианта и расчетного случая, существенно отличаются. При этом различный спектр внешней нагрузки на каждом из рассматриваемых участков даже при условии применения на этапе строительства труб от одного производителя

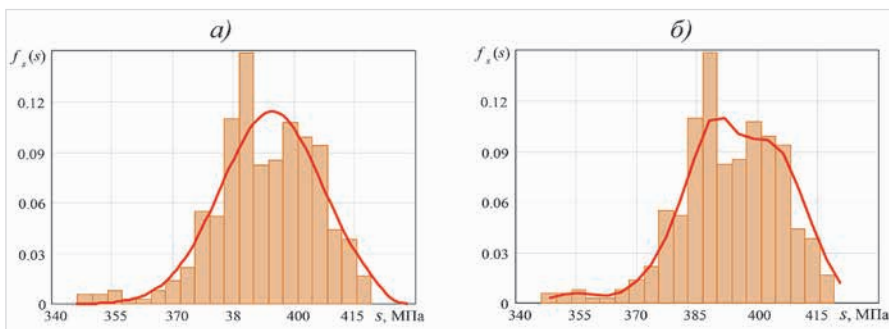


Рис. 3 — Функция плотности предельных напряжений для материала труб производства Харцизского ТЗ:

- а) нормальный закон распределения предельных напряжений
- б) фактический закон распределения предельных напряжений

Fig. 3 — Limit Stress Density Function of the material of pipe manufactured at Khartsizsk Tube Plant:

- a) normal law of the distribution of limit stresses
- b) the actual law of the distribution of the limit stress

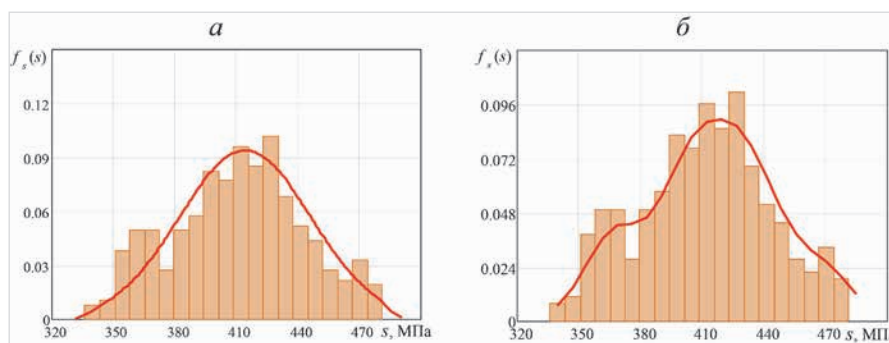


Рис. 4 — Функция плотности предельных напряжений для материала труб производства Челябинского ТПЗ:

- а) нормальный закон распределения предельных напряжений
- б) фактический закон распределения предельных напряжений

Fig. 4 — Limit Stress Density Function of the material of pipe manufactured at Chelyabinsk Pipe Rolling Plant:

- a) normal law of the distribution of limit stresses
- b) the actual law of the distribution of the limit stress

№ п/п	Закон распределения предела текучести σ_T	Значение фактического коэффициента запаса прочности K_ϕ			
		Участок 1 (КС - 03)		Участок 2 (КС - 10)	
		Харцизский ТЗ	Челябинский ТПЗ	Харцизский ТЗ	Челябинский ТПЗ
1	Нормальный	1,49	1,59	1,29	1,45
2.	Фактический	1,65	1,75	1,42	1,58

Таб. 4 — Значения коэффициента запаса прочности n для участков* МГ *исследуемые участки находятся на линейной части МГ после компрессорных станций, которые приведены в таблице

Tab. 4 — Values of the safety factor n for main gas pipelines sections*

* study sections are on the linear part of the main gas pipelines after the compressor stations, which are listed in the table

также является причиной отличий в функциях $f_{K_\phi}(K_\phi)$ для коэффициента запаса прочности на данных участках.

Для Участка 1 при варианте, предполагающем применение на этапе строительства трубы производства Харцизского ТЗ для расчетного случая, когда выборка значений предела текучести при статистической обработке отнесена к нормальному закону (таблица 4), значение коэффициента запаса прочности $K_\phi^{0,95}=1,49$. Сравним полученное значение с допускаемыми значениями коэффициента запаса K_2, K_3, K_4 и K_{np} , рассчитанными на основании зависимостей (4–7). Так как $K_2=1,38 < K_\phi^{0,95}=1,49 < K_3=1,52$, то в соответствии с классификацией, приведенной в таблице 1, рассматриваемый участок имеет

класс безопасности «низкий».

При этом же варианте расчета для случая, когда обработка выборки значений предела текучести выполнена на основе методов непараметрической статистики, величина коэффициента запаса прочности для Участка 1 составит $K_\phi^{0,95}=1,65$. Сравнение полученного значения с предельно допустимыми позволяет оценить класс безопасности данного участка как «нормальный», т.к. $K_3=1,52 < K_\phi^{0,95}=1,65 < K_4=1,66$.

При втором варианте расчета, предполагающим применение на этапе строительства Участка 1 трубы производства Челябинского ТПЗ и отнесение выборки экспериментальных значений предела текучести при статобработке к нормальному закону, расчетная

величина коэффициента запаса $K_{\phi}^{0,95}=1,59$. Так как $K_3=1,52 < K_{\phi}^{0,95}=1,59 < K_4=1,66$, то класс безопасности данного участка «нормальный», что выше по отношению к классу «низкий», которому соответствует этот же участок при условии, что он построен из трубы производства Харцизского ТЗ.

Для Участка 1 при расчете по второму варианту для случая обработки выборки значений предела текучести материала трубы на основе методов непараметрической статистики значение коэффициента запаса прочности составляет $K_{\phi}^{0,95}=1,75$. Поскольку $K_4=1,66 < K_{\phi}^{0,95}=1,75$, то данный участок соответствует классу безопасности «высокий».

Полученные для Участка 1 результаты позволяют сделать вывод, что применение нормального закона при описании выборок экспериментальных значений предельных для материала труб напряжений приводит к заниженным значениям коэффициента запаса прочности. Вследствие этого для исследуемого участка принимаются более низкие классы безопасности вне зависимости от

производителя трубной продукции. При этом больший запас прочности для рассматриваемого участка при одинаковом спектре внешней нагрузки обеспечивается для варианта, когда участок построен из трубы производства Челябинского ТПЗ.

В результате аналогичных расчетов, выполненных для Участка 2, имеющего другой спектр внешней нагрузки, значение коэффициента запаса прочности для варианта строительства участка из трубы производства Харцизского ТЗ в случае отнесения выборки значений предела текучести к нормальному закону $K_{\phi}^{0,95}=1,29$. Поскольку $K_2=1,38 < K_{\phi}^{0,95}=1,29$, то класс безопасности участка в данном случае нельзя отнести даже к уровню «низкий».

Для этого же варианта расчета, но в случае обработки выборки значений предела текучести на основе методов непараметрической статистики, величина коэффициента запаса прочности для Участка 2 составит $K_{\phi}^{0,95}=1,42$. Т. к. $K_2=1,38 < K_{\phi}^{0,95}=1,42 < K_3=1,52$, то в рассмотренном случае участок соответствует

классу безопасности «низкий».

При втором варианте расчета, предполагающим применение на этапе строительства Участка 2 трубы производства Челябинского ТПЗ, и расчетном случае, когда обработка выборки экспериментальных значений σ_T выполнена на основе нормального закона, значение коэффициента безопасности составляет $K_{\phi}^{0,95}=1,45$. Вследствие того, что $K_2=1,38 < K_{\phi}^{0,95}=1,45 < K_3=1,52$, в данном варианте расчета класс безопасности участка «низкий».

Для этого же варианта расчета Участка 2 в случае обработки выборки значений предела текучести на основе методов непараметрической статистики, величина коэффициента запаса прочности составит $K_{\phi}^{0,95}=1,58$. Сравнения полученное значение с предельно допустимыми: $K_3=1,52 < K_{\phi}^{0,95}=1,58 < K_4=1,66$, класс безопасности данного участка можно оценить как «нормальный».

Результаты, полученные для Участка 2, также свидетельствуют, что обработка выборок экспериментальных значений предела текучести на основе нормального закона и последующее применение полученных результатов при расчетах приводит к заниженным значениям коэффициента запаса прочности. Вследствие этого классы безопасности, принятые для второго исследуемого участка, имеющего иной спектр внешней нагрузки, также оказались заниженными по обоим вариантам расчета — как для случая применения в качестве исходных данных выборки предела текучести материала труб производства Харцизского ТЗ, так и труб Челябинского ТПЗ. При этом аналогично результатам, полученным для Участка 1, больший запас прочности на Участке 2 также обеспечивается для варианта, когда на этапе строительства применялась труба производства Челябинского ТПЗ.

Итоги

Индивидуальные законы распределения фактических значений предела текучести материала труб даже одного сортамента являются причиной существенных отличий в результатах оценки текущего уровня надежности магистральных газопроводов. Вследствие этого существующие подходы к оценке прочностной надежности требуют развития новых методик расчета, которые позволят учесть случайную природу и специфику законов распределения механических характеристик материала труб.

Выводы

1. Рассмотренный подход позволяет обосновать текущий уровень надежности магистрального газопровода на основе расчета фактических значений коэффициента запаса прочности с учетом случайной природы предела текучести σ_T материала труб, применяющихся на этапе строительства исследуемого участка.
2. Вследствие случайной природы предела текучести σ_T обоснование класса безопасности участков магистрального газопровода необходимо осуществлять с учетом индивидуальных для каждого сортамента труб законов распределения значений σ_T .
3. С целью повышения достоверности результатов оценки надежности магистральных газопроводов требуется формирование и наполнение базы данных о физико-механических свойствах основного металла и металла сварных соединений путем проведения

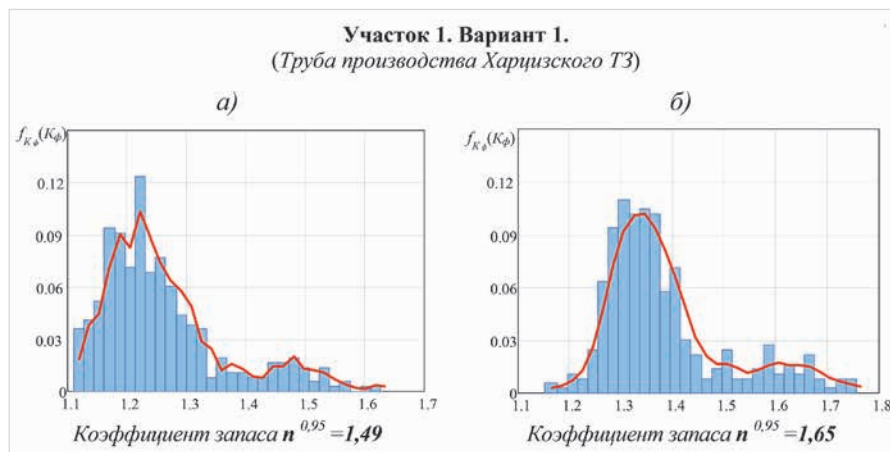


Рис. 5 – Гистограмма и функция плотности вероятности коэффициента запаса прочности:

- а) нормальный закон распределения предельных напряжений
 - б) фактический закон распределения предельных напряжений
- Fig. 5 — Histogram and probability density function of safety factor
 а) normal law of the distribution of limit stresses
 б) the actual law of the distribution of the limit stress

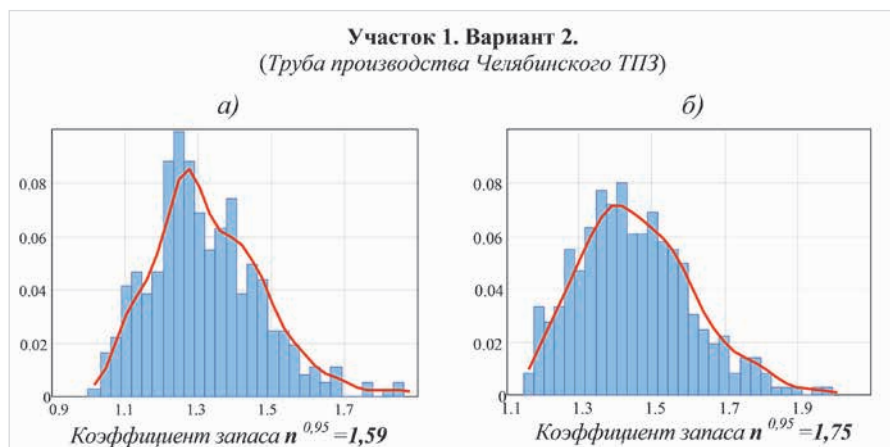


Рис. 6 – Гистограмма и функция плотности вероятности коэффициента запаса прочности:

- а) нормальный закон распределения предельных напряжений
 - б) фактический закон распределения предельных напряжений
- Fig. 6 — Histogram and probability density function of safety factor
 а) normal law of the distribution of limit stresses
 б) the actual law of the distribution of the limit stress

лабораторных испытаний образцов из материала труб различного сортамента.

Литература

- Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Лысяный К.К., Невелев Я.П. Исследование механических характеристик трубных сталей 17ГС, 17Г1С, 14ХГС после длительной эксплуатации нефтепроводов // Нефтяное хозяйство. 2008. №3. С. 98–100.
- Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л., Лысяный К.К. Расчет характеристик предела выносливости трубных сталей 17ГС, 17Г1С, 14ХГС на основе данных прочностных испытаний // Нефтяное хозяйство. 2008. №4. С. 102–105.
- Голофаст С.Л. Оценка влияния механических свойств трубной стали 17Г1С различных производителей на прочностную надежность магистральных трубопроводов // Экспозиция Нефть Газ. 2018. №7. С. 20–25.
- Голофаст С.Л. Влияние статистического разброса предела текучести трубной стали марки 17Г1С на прочностную надежность магистральных газопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2019. №2. С. 42–47.
- СТО Газпром 2-2.3-184-2007. Методика по расчету и обоснованию коэффициента запаса прочности и устойчивости магистральных газопроводов на стадии эксплуатации и технического обслуживания. Введен с 14.05.2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/248936/
- Барышев С.Н. Вероятностное прогнозирование ресурса нефтегазового оборудования при эксплуатации в сероводородосодержащих средах. Оренбург, 2009. 371 с.
- Frenkel I.B. and others. Applied Reliability Engineering and Risk Analysis: Probabilistic Models and Statistical Inference. Wiley, 2013-2014, 436 p.
- Smith D.J. Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers. Eighth Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2011, 436 p.
- Яковлев А.Я., Алеников С.Г., Теплинский Ю.А., Быков И.Ю. Методы оценки эксплуатационной работоспособности труб технологических газопроводов. М.: ЦентрЛитНефтеГаз. 2008. 272 с.
- СНИП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 60 с.
- Теплинский Ю.А., Быков И.Ю. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. 400 с.
- Сызранцев В.Н., Новоселов В.В., Созонов П.Н., Голофаст С.Л. Оценка безопасности и прочностной надежности магистральных трубопроводов методами непараметрической статистики. Новосибирск: Наука, 2013. 178 с.
- Филатов А.А., Георге М.С. Влияние условий эксплуатации газопровода на показатели

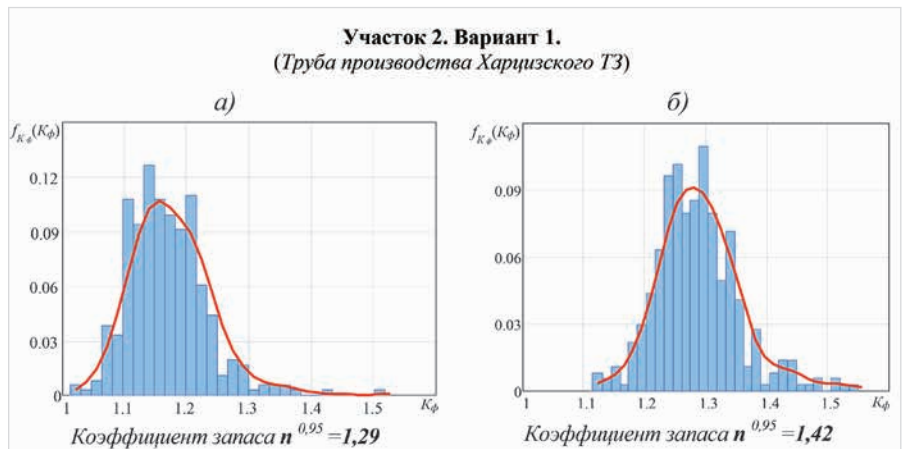


Рис. 7 — Гистограмма и функция плотности вероятности коэффициента запаса прочности:

- нормальный закон распределения предельных напряжений
 - фактический закон распределения предельных напряжений
- Fig. 7 — Histogram and probability density function of safety factor
- normal law of the distribution of limit stresses
 - the actual law of the distribution of the limit stress

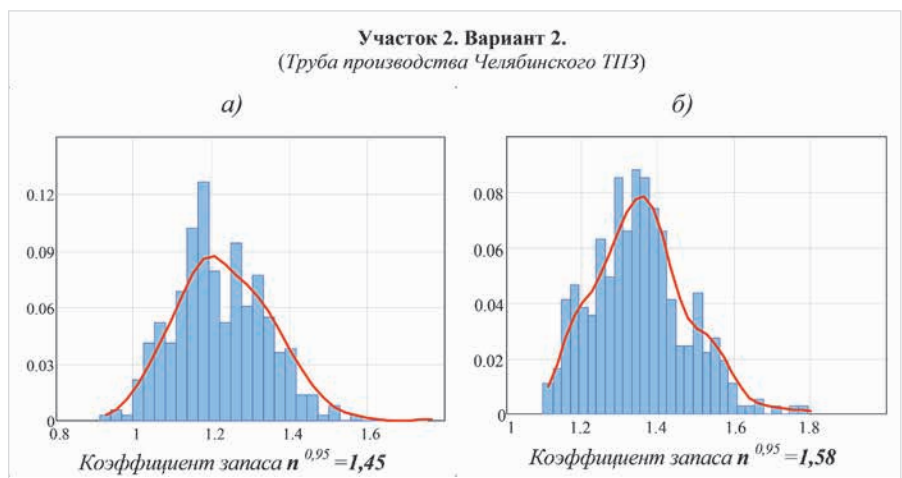


Рис. 8 — Гистограмма и функция плотности вероятности коэффициента запаса прочности:

- нормальный закон распределения предельных напряжений
 - фактический закон распределения предельных напряжений
- Fig. 8 — Histogram and probability density function of safety factor
- normal law of the distribution of limit stresses
 - the actual law of the distribution of the limit stress

его прочностной надежности // Наука и техника в газовой промышленности. 2013. №2. С. 75–82.

14. Голофаст С.Л. Проблемы оценки надежности линейной части магистральных трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2018. №4. С. 36–40.

15. Филатов А.А., Новоселов В.В. Влияние прочностных свойств материала трубы на вероятностные характеристики коэффициента запаса прочности в условиях эксплуатации

газопровода // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. №4. С. 80–85.

16. Голофаст С.Л. Оценка прочностной надежности магистральных трубопроводов на основе квантильных значений коэффициента запаса прочности // Безопасность труда в промышленности. 2018. №7. С. 22–28.

17. Филатов А.А., Голофаст С.Л. Проблемы оценки прочностной надежности газопроводов // Газовая промышленность. 2015. №7. С.45–48.

The effect of the actual patterns of distribution of the yield strength of steel 17G1S on the safety factor of main gas pipeline sections

Authors

Sergey L. Golofast — Ph.D., professor; sgolofast@gazpromproject.ru

"Gazprom-Project" LLC, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of the calculation of the safety factor for main gas pipeline sections, taking into account the random nature of the external load and the yield strength (σ_T) of the pipes material with various grades. Based on the actual values of the safety factor, the current level of main gas pipelines sections reliability was assessed. The necessity of taking into account the individual laws of yield strength distribution of the material of pipes with various grades used at construction stage of gas pipeline when determining safety class of pipeline section is substantiated.

Materials and methods

The calculation of the design values of the safety factor for gas pipelines section is based on SNiP 2.05.06-85* Trunk pipelines. Processing of the yield strength experimental values obtained from mechanical tests was carried out on the basis of non-parametric

statistics methods. The assessment of the actual values of the safety factor and the current level of main gas pipelines sections reliability is made on the basis of the STO P/SC Gazprom 2-2.3-184-2007, as well as the methods of probability theory and reliability theory.

Keywords

main gas pipeline, line section, pipe steel, yield limit, reliability, Safety Factor

Results

The individual laws of the distribution for yield strength actual values of pipes material even a single grade cause significant differences in the assessment results of the current level of gas pipelines reliability. As a result, the existing approaches to assessing the strength reliability require the development of new calculation methods that will take into account the random nature and specificity of pipe material mechanical characteristics distribution laws.

Conclusions

1. The considered approach allows to substantiate the current level of main gas pipelines reliability based on the calculation of safety factor actual values taking into account the random nature of the yield strength (σ_T) of the pipe material used during the construction phase of the studied section.
2. Due to the random nature of the yield strength (σ_T), the safety class of the main gas pipelines sections must be justified taking into account the laws of (σ_T) values that are individual for each pipe grade.
3. In order to increase the reliability of the main gas pipelines assessing the reliability results, it is necessary to form and fill a database of the physicomechanical properties of the base metal and metal of welded joints by conducting laboratory tests of samples from pipe material of various grades.

References

1. Syzrantsev V.N., Golofast S.L., Lysyanyy K.K., Nevelev Ya.P. *Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik trubnykh staley 17GS, 17G1S, 14KhGS posle dlitel'noy ekspluatatsii nefteprovodov* [Study of the mechanical characteristics of pipe steels 17GS, 17G1S, 14HGS after oil pipelines long-term operation]. Neftyanoe khozyaystvo, 2008, issue 3, pp. 98–100.
2. Syzrantsev V.N., Golofast S.L., Lysyanyy K.K. *Raschet kharakteristik predela vynoslivosti trubnykh staley 17GS, 17G1S, 14KhGS na osnove dannykh prochnostnykh ispytani* [Calculation of strength characteristics of pipe steels 17GS, 17G1S, 14KhGS by tests results]. Neftyanoe khozyaystvo, 2008, issue 4, pp. 102–105.
3. Golofast S.L. *Otsenka vliyaniya mekhanicheskikh svoystv trubnoy stali 17G1S razlichnykh proizvoditeley na prochnostnyu nadezhnost' magistral'nykh truboprovodov* [Assessment of the effect of the mechanical properties of 17G1S pipe steel of various manufacturers on the strength reliability of the main pipelines]. Exposition Oil Gas, 2018, issue 7, pp. 20–25.
4. Golofast S.L. *Vliyanie statisticheskogo razbroa predela tekuchesti trubnoy stali marki 17G1S na prochnostnyu nadezhnost' magistral'nykh gazoprovodov* [Effect of Statistical Stragglings of the Yield Strength of 17G1S Pipe Steel Grade on Strength Reliability of the Main Gas Pipelines]. Occupational Safety in Industry, 2019, issue 2, pp. 42–47.
5. STO Gazprom 2-2.3-184—2007. *Metodika po raschetu i obosnovaniyu koeffitsienta zapasa prochnosti i ustoychivosti magistral'nykh gazoprovodov na stadii ekspluatatsii i tekhnicheskogo obsluzhivaniya* [Method for the calculation and substantiation of strength and stability factor of the main gas pipelines at the stage of operation and maintenance]. Available at: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/248936/
6. Baryshev S.N. *Veroyatnostnoe prognozirovaniye resursa neftegazovogo oborudovaniya pri ekspluatatsii v serovodorodosoderzhashchikh sredakh* [Probabilistic forecast of the resource of oil and gas equipment at operation in hydrogen sulfide environments]. Orenburg, 2009, 371 p.
7. Frenkel I.B. and others. *Applied Reliability Engineering and Risk Analysis: Probabilistic Models and Statistical Inference*. Wiley, 2013- 2014, 436 p.
8. Smith D.J. *Reliability, Maintainability and Risk: Practical Methods for Engineers*. Eighth Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2011, 436 p.
9. Yakovlev A.Ya., Alennikov S.G., Teplinskiy Yu.A., Bykov I.Yu. *Metody otsenki ekspluatatsionnoy rabotosposobnosti trub tekhnologicheskikh gazoprovodov* [Methods for assessing the operational performance of pipes of process gas pipelines]. Moscow: CentrLitNefteGaz, 2008, 272 p.
10. SNiP 2.05.06-85*. *Magistral'nye truboprovody* [Trunk pipelines]. Moscow: FGUP TsPP, 2005, 60 p.
11. Teplinskiy Yu.A., Bykov I.Yu. *Upravlenie ekspluatatsionnoy nadezhnost'yu magistral'nykh gazoprovodov* [Management of operational reliability of gas pipelines]. - M.: CentrLitNefteGaz, 2007, 400 p.
12. Syzrantsev V.N., Novoselov V.V., Sozonov P.N., Golofast S.L. *Otsenka bezopasnosti i prochnostnoy nadezhnosti magistral'nykh truboprovodov metodami neparametricheskoy statistiki* [Assessment of safety and strength reliability of the trunk pipelines using the nonparametric statistics methods]. Novosibirsk: Nauka, 2013, 178 p.
13. Filatov A.A., George M.S. *Vliyanie usloviy ekspluatatsii gazoprovoda na pokazateli ego prochnostnoy nadezhnosti* [Effect of the operating conditions of the gas pipeline on the indices of its strength reliability]. Science and Technology in the Gas Industry, 2013, issue 2, pp. 75–82.
14. Golofast S.L. *Problemy otsenki nadezhnosti lineynoy chasti magistral'nykh truboprovodov* [Problems of Reliability Assessment for Linear Part of Trunk Pipelines]. Occupational Safety in Industry, 2018, issue 4, pp. 36–40.
15. Filatov A.A., Novoselov V.V. *Vliyanie prochnostnykh svoystv materiala truby na veroyatnostnye kharakteristiki koeffitsienta zapasa prochnosti v usloviyakh ekspluatatsii gazoprovoda* [Effect of the strength properties of the pipe material on the probabilistic characteristics of the strength factor in the operating conditions of gas pipeline]. News of higher educational institutions. Oil and gas, 2014, issue 4, pp. 80–85.
16. Golofast S.L. *Otsenka prochnostnoy nadezhnosti magistral'nykh truboprovodov na osnove kvantil'nykh znacheniy koeffitsienta zapasa prochnosti* [Assessment of the Strength Reliability of the Trunk Pipelines based on the Quantile Values of Safety Factor]. Occupational Safety in Industry, 2018, issue 7, pp. 22–28.
17. Filatov A.A., Golofast S.L. *Problemy otsenki prochnostnoy nadezhnosti gazoprovodov* [Problems of assessment of gas pipelines strength reliability]. Gas Industry, 2015, issue 7, pp. 45–48.