

Исследование двукратного и многократного нагружения стержневых образцов трубной стали

A study of double and multiple loading of rod-type test samples made of pipe steel

Маянц Ю.А.^{1*}, Ширяпов Д.И.¹, Носова Е.С.¹

Mayants Yu.A.¹, Shiryapov D.I.¹, Nosova E.S.¹

¹ ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, Санкт-Петербург

¹ Gazprom VNIIGAZ LLC, Russian Federation, Saint Petersburg

*Y_Mayants@vniigaz.gazprom.ru



Маянц Ю.А.



Ширяпов Д.И.



Носова Е.С.

Резюме. При испытаниях на прочность внутренним давлением магистральных трубопроводов значение испытательного давления принимается равным 1,1 от рабочего для участков нормальной категории и 1,25 либо 1,5 для участков повышенных категорий. Приведенные значения имеют обоснования, уходящие своими корнями середину XX-го века, и, возможно, нуждаются в переосмыслении в свете современных реалий применения трубных материалов нового поколения. Целью проводимого исследования является выявление оптимального значения коэффициента запаса при испытаниях на прочность магистральных трубопроводов с учетом материала труб, а также изменения разрушающего усилия при многократном нагружении образцов. Получаемые результаты позволят подтвердить либо пересмотреть существующий подход к назначению давления при проведении испытаний на прочность магистральных трубопроводов и разработать теоретическое обоснование наблюдаемых явлений. На практике это позволит установить оптимальные параметры испытаний газопроводов, обеспечивающие необходимую надежность и безопасность. Исследование актуально с учетом постоянного совершенствования трубных сталей, а также в свете развития инновационных материалов, предназначенных для производства труб. Анализ зарубежных и отечественных экспериментальных исследований двукратного нагружения стальных образцов до разрушения указывает на возможность снижения разрушающего усилия при втором нагружении до 90% от величины первого усилия. При этом доступная статистическая выборка зарубежных и отечественных экспериментов невелика, а методика их проведения – сложна. В связи с этим авторами была разработана оригинальная методика, по которой были проведены эксперименты двукратного нагружения стальных образцов до разрушения и выполнен статистический анализ полученных результатов.

Abstract. During transmission pipelines pressure testing, the value of the test pressure is taken to be equal to 1.1 of the working pressure for sections of the normal category and 1.25 or 1.5 for sections of higher categories. The substantiations of the above values date back to the middle of the 20-th century, and may need to be reconsidered in the light of the new-generation pipe materials implementation. This paper aims to identify the optimal safety factor for pressure testing of main pipelines, taking into account the material of the pipes, as well as the variation of the destructive power in case of multiple loading of the test objects. The findings will allow confirming or revising the existing approach to assigning the strength test pressure of main pipelines and theoretically substantiating the observed phenomena. In practice, that will allow establishing the optimal parameters for testing gas pipelines, ensuring the required dependability and safety. The research is relevant due to the continuous improvement of pipe steels, as well as in the light of innovative pipe material development. An analysis of foreign and Russian experimental studies involving double loading of steel test objects to failure indicates that – before the second loading – the destructive force can be reduced to 90% of the first loading value. The available statistical sample of foreign and Russian experiments is small, while the methodology is complex. Given the above, the authors developed an original methodology, that was used in destructive double loading experiments on steel test objects and statistical analysis of the results.

Ключевые слова: испытания на прочность, магистральный трубопровод, двукратное нагружение, многократное нагружение, статистический анализ.

Keywords: pressure test, trunk pipeline, double loading, multiple loading, statistical analysis.

Для цитирования: Маянц Ю.А., Ширяпов Д.И., Носова Е.С. Исследование двукратного и многократного нагружения стержневых образцов трубной стали // Надежность. 2024. №4. С. 38-47. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-38-47>

For citation: Mayants Yu.A., Shiryapov D.I., Nosova E.S. A study of double and multiple loading of rod-type test objects made of pipe steel. *Dependability* 2024;4:38-47. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-4-38-47>

Поступила: 24.05.2024 / **После доработки:** 02.09.2024 / **К печати:** 18.11.2024
Received on: 24.05.2024 / **Revised on:** 02.09.2024 / **For printing:** 18.11.2024

Введение

В связи со строительством новых газопроводов, увеличением давления транспортирования газа с одновременным ростом диаметров трубопроводов и вытекающей отсюда необходимостью повышения прочности труб, продолжают работы по внедрению труб более высоких классов прочности, труб, обладающих высокими деформационными свойствами и устойчивых к различным температурным воздействиям.

Применение новых материалов и конструктивных решений должно сопровождаться обеспечением надежной и бесперебойной эксплуатации магистрального газопровода в течение всего жизненного цикла, что обеспечивается:

- 1) системой контроля качества продукции, действующей на трубных заводах и включающей испытания труб пробным давлением;
- 2) обеспечением требований действующей нормативно-технической документации;
- 3) испытаниями на прочность внутренним давлением.

Кроме того, испытания на прочность внутренним давлением являются заключительным этапом в комплексе работ в рамках программы капитального ремонта действующих газопроводов. Таким образом, успешные заключительные испытания в настоящее время считаются достаточно надежным основанием для ввода вновь построенных или прошедших реконструкцию газопроводов в эксплуатацию.

Величина давления, назначаемого при испытаниях на прочность трубопровода, должна, с одной стороны, учитывать свойства и параметры труб, а с другой – подтвердить достаточный запас прочности, позволяющий надежно эксплуатировать трубопровод в течение всего его жизненного цикла.

Целью данной работы является определение оптимального значения давления при испытаниях на прочность магистральных трубопроводов, в том числе после их ремонта, а также с учетом используемых материалов.

1. Предпосылки к проведению экспериментального исследования

Подходы к назначению коэффициентов запаса при испытаниях трубопроводов и труб на прочность внутренним давлением менялись с течением времени, с учетом развития технологии производства труб и накопления статистики эксплуатации трубопроводов. На заре трубопроводного строительства отправной точкой стали параметры испытаний, применявшиеся ранее к котлам и иным сосудам, работающим под давлением [1], однако

в дальнейшем стало ясно, что специфика протяженных объектов, которыми являются магистральные трубопроводы, обуславливает свои подходы к назначению испытательного давления. До середины XX-го века, в тех случаях, когда испытания на прочность выполнялись в принципе, в качестве испытательной среды зачастую выступал транспортируемый продукт. Желая предотвратить потери продукта в случае разрыва (при испытаниях нефтью и нефтепродуктами), а также из-за опасения протяженных разрывов трубопроводов (при испытаниях природным газом), испытательное давление стремились установить с небольшим запасом относительно запроектированного рабочего, как правило, в пределах 10 %.

Однако по мере накопления знаний об изменении технического состояния трубопроводов в течение их жизненного цикла, становилось все яснее, что для безопасной работы трубопроводов необходимо опираться на более глубокие предпосылки. Богатым источником статистики о поведении трубопроводов, подвергшихся повышенным нагрузкам, стали комплексные переиспытания двух американских трубопроводов – Big Inch и Little Big Inch [2]. Эти трубопроводы, построенные в 1942-43 гг., были призваны обеспечить надежные поставки сырой нефти техасских месторождений на перерабатывающие мощности восточного побережья США для снабжения горюче-смазочными материалами союзных войск в Европе, в условиях, когда немецкие подводные лодки вели охоту на американские танкеры, сделав невозможными морские поставки внутри США.

После окончания Второй мировой войны указанные трубопроводы были выкуплены у государства частным инвестором, решившим конвертировать их в газопроводы, для чего был запущен проект их технического перевооружения и повышения надежности. Два трубопровода протяженностью более 2000 км каждый, имеющие диаметры 610 мм и 508 мм соответственно, в течение 1950-го года подверглись многократным испытаниям на прочность давлением, существенно превышающим рабочее, в ряде случаев – эквивалентным напряжениям предела текучести трубной стали в кольцевом направлении, а в ряде случаев – до 109 % от этого предела [3].

Результатом испытаний стали сотни разрывов трубопроводов в местах дефектов, вызванных самыми разными причинами, – от брака трубного производства, до внутренней и наружной коррозии (на некоторых участках в целях экономии времени трубы укладывались без изоляции). Однако после завершения испытаний трубопровод работал весьма надежно, информация о чем быстро распространилась по отрасли. Успешному примеру последовали собственники других трубопроводов, и уже к концу 1960-х годов в США была накоплена вну-

шительная база данных переиспытаний трубопроводов на давление, эквивалентное 90 % от предела текучести и выше [4, 5]. В отечественной практике также проводились аналогичные работы, позволившие получить ценные экспериментальные данные [6].

Собранная в результате статистика, в совокупности с последующими исследованиями института Баттеля (США) позволила впервые обоснованно установить параметры испытаний. Любопытно, что в нормах ASME B31.8 было указано требование к максимально допустимому рабочему давлению, выраженному в виде испытательного, поделенного на коэффициент запаса 1,1; 1,25, либо 1,4, что выглядит несколько странно применительно ко вновь построенному трубопроводу, но вполне объяснимо в случае действующего трубопровода, который подвергается сплошному переиспытанию.

По мере накопления опыта испытаний на прочность трубопроводов, инженеры столкнулись с так называемой инверсией давления [7]. Смысл этого явления состоит в том, что предварительно испытанные трубопроводы могли разрушаться вследствие подрастания дефектов при давлении ниже того, на которое они были испытаны. Опытным путем было установлено, что запас по давлению величиной в 10% обеспечивает достаточно надежную гарантию от инверсии давления. Таким образом, трубопроводы, испытанные на давление, эквивалентное 90 % от напряжений предела текучести, в дальнейшем допускалось эксплуатировать при давлении не выше 80 % от испытательного, или при напряжении 0,72 от предела текучести (либо с запасом величиной 1,25 от упомянутых 90 %, что в результате дает все те же 72 %).

Величина 72 % от предела текучести и по сей день остается отправной точкой при назначении проектного рабочего давления магистральных трубопроводов, как в зарубежных (США¹, Нидерланды², Великобритания³ и ряд других), так и в отечественных нормативных документах⁴. В ряде случаев это базовое значение может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону, в зависимости от условий прохождения трубопровода [8, 9]. Учитывая развитие трубного производства, а также техники и технологий контроля качества сооружения трубопроводов, отдельные современные стандарты пересматривают эту базовую величину в сторону увеличения, в частности, последними ревизиями стандартов Канады⁵ и Австралии⁶ уже установлена величина 80%.

В процессе строительства трубопровод подвергается значительным нагрузкам и воздействиям, может

получить те или иные повреждения, которые не были или не могли быть обнаружены средствами контроля и диагностики. С этой точки зрения, испытания должны подтвердить, что трубопровод не имеет опасных дефектов, ставших следствием строительно-монтажных работ. Таким образом, организационная задача испытаний состоит в том, чтобы исключить эти неизвестные факторы, задавая начальное техническое состояние трубопровода и подтверждая, что трубопровод сможет безотказно эксплуатироваться при рабочих нагрузках.

Исходя из вышеизложенного, представляется актуальным исследовать поведение современных трубных сталей при предельных нагрузках, а также при повторном нагружении трубопроводов, что позволит оценить применимость существующих требований к испытаниям на прочность к трубопроводам нового поколения, и, при необходимости, пересмотреть их.

2. Условия и постановка эксперимента

Задача эксперимента состоит в том, чтобы имитировать в лабораторных условиях последовательное нагружение металла труб до давления, соответствующего их разрыву, подобно тому, как это происходило при испытаниях на прочность протяженного участка трубопровода, когда давление всякий раз повышалось до разрыва наименее прочной трубы.

Для эксперимента были изготовлены образцы специальной формы, позволяющей осуществить двукратное нагружение, а также пятикратное последовательное нагружение образцов до разрыва.

Для изготовления образцов была использована сталь 20 Г, относящаяся к марганцовистой группе легированных сталей согласно классификации, принятой отечественными стандартами⁷.

Подробное описание образцов, включая их форму и геометрические параметры, приведено далее в настоящей статье. Для полноты данных об используемом материале, до начала основного эксперимента была построена экспериментальная диаграмма растяжения стандартных образцов.

Целью эксперимента является выявление закономерности в полученных значениях усилия разрыва на различных этапах многократного нагружения, в частности установить, возможно ли разрушение на втором и последующем этапах при давлении, меньшем, чем то, при котором произошел один из предыдущих разрывов. Эксперимент проводится в развитие анализа двукратного нагружения трубопровода внутренним давлением, выполненного ранее одним из авторов на основе данных более ранних исследований [10], и имеет целью повысить качество эксперимента за счет исключе-

¹ Gas Transmission and Distribution Piping Systems. ASME B31.8-2022.

² Requirements for pipeline systems - Part 1: General requirements NEN 3650-1:2020 nl.

³ Pipeline systems - Steel pipelines on land. Code of practice PD 8010-1:2015+A1:2016.

⁴ СТО Газпром 2 2.1 249 2008 Магистральные газопроводы.

⁵ Oil and gas pipeline systems. CSA Z662:23.

⁶ Pipelines - Gas and liquid petroleum, Part 1: Design and construction AS/NZS 2885.1:2018.

⁷ ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия.

Табл. 1. Основные параметры образцов до и после испытаний

№ образца	Диаметр образца		Длина образца	
	начальный, d_0 , мм	наименьший диаметр шейки образца после разрыва, d_* , мм	начальная, l_0 , мм	после растяжения, l_* , мм
1	6,1	3,2	42	59,5
2	6,1	3,2	42	58,9

ния случайных факторов, а также применения металла, схожего с тем, из которого изготавливаются трубы для современных газопроводов.

3. Ход эксперимента

3.1. Получение диаграммы растяжения

Диаграмма растяжения металла была получена в результате испытаний на растяжение двух стандартных цилиндрических образцов, изготовленных в соответствии с требованиями нормативной документации¹. Основные параметры образцов до и после испытаний приведены на рис. 1 и в табл. 1. Полученные диаграммы растяжения представлены на рис. 2, их основные характеристики сведены в табл. 2.

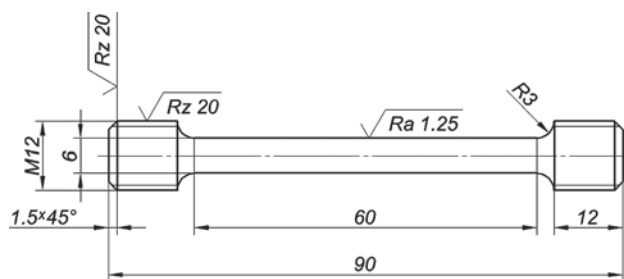


Рис. 1. Стандартный пропорциональный цилиндрический образец (тип IV по ГОСТ 1497)

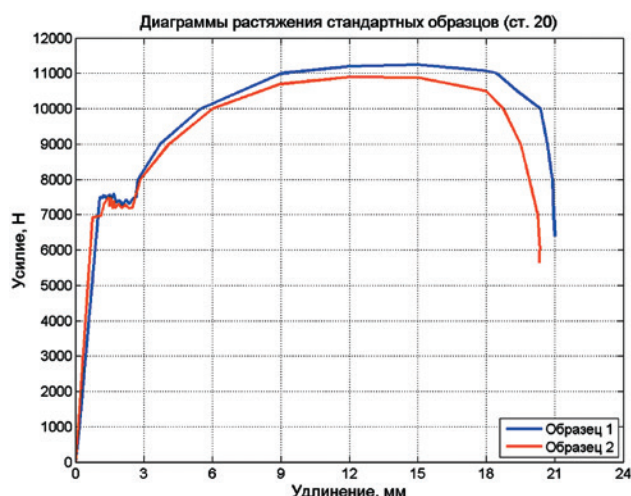


Рис. 2. Диаграммы растяжения стандартных образцов

Табл. 2. Основные параметры испытаний

Параметр	Единицы измерения	Значение	
		№ образца	
		1	2
Скорость испытания	мм/мин	4	10
Разрывная нагрузка	Н	6428	5647
Удлинение при разрывной нагрузке	мм	21,01	20,411
Максимальная нагрузка	Н	11274	10889
Удлинение при максимальной нагрузке	мм	13,593	13,049

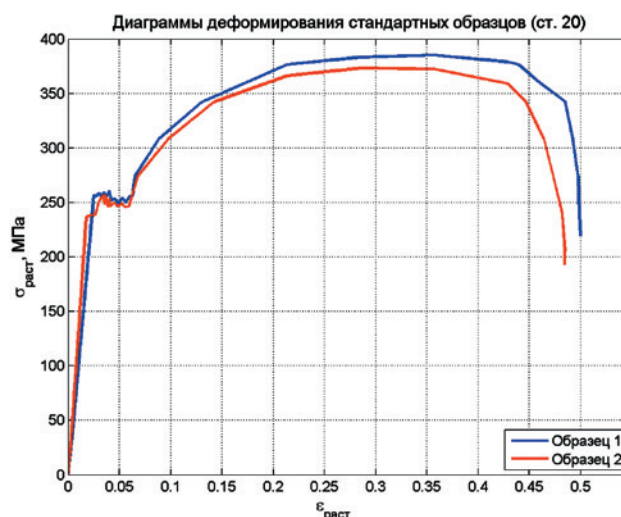


Рис. 3. Диаграммы деформирования стандартных образцов

Табл. 3. Основные характеристики диаграмм деформирования

Параметр	Единицы измерения	Значение	
		№ образца	
		1	2
Условный предел текучести	МПа	281,95	276,27
Временное сопротивление	МПа	385,77	372,6
Истинное сопротивление разрыву	МПа	799,26	702,15
Относительное удлинение после разрыва	%	41,67	40,24
Относительное сужение после разрыва	%	72,48	72,48

¹ ГОСТ 1497 84 (ИСО 6892 84) Металлы. Методы испытаний на растяжение.

Площади сечения образцов, мм²:

- до испытания (A_0):

$$A_{01} = A_{02} = \frac{\pi d_{01}^2}{4} = 29,21;$$

- после разрыва (A_*):

$$A_{*1} = A_{*2} = \frac{\pi d_{*1}^2}{4} = 8,04.$$

Диаграммы деформирования представлены на рис. 3, их основные характеристики сведены в табл. 3.

3.2. Двукратное нагружение

Для испытаний на двукратное растяжение было изготовлено 40 цилиндрических образцов специального типа, эскиз которых представлен на рис. 4.

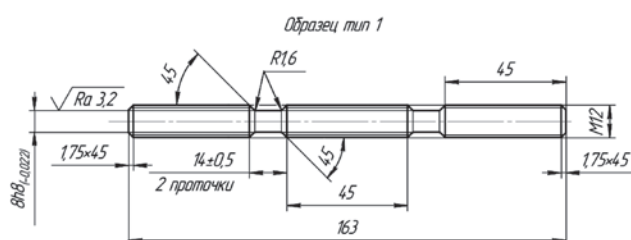


Рис. 4. Образец для испытаний на двукратное нагружение

Испытания проводились в следующем порядке:

- 1) замер штангенциркулем диаметра рабочей части (проточки) образцов с занесением в протокол испытаний;
- 2) закрепление образца в захватах электромеханической испытательной машины ИР 5047-50, создание незначительного натяжения и настройка силоизмерительного устройства на нулевую нагрузку, настройка скорости нагружения (20 мм/мин);
- 3) нагружение образца до разрыва по одной из проточек;

Табл. 4. Экспериментальные значения отношения максимальных усилий при первом (F_1) и втором (F_2) нагружении

№ образца	Отношение F_1/F_2	№ образца	Отношение F_1/F_2	№ образца	Отношение F_1/F_2
1	0,968	15	1,007	29	0,990
2	0,980	16	1,007	30	0,969
3	1,021	17	1,009	31	1,007
4	0,991	18	1,008	32	0,992
5	1,017	19	1,053	33	1,005
6	1,005	20	0,925	34	1,023
7	1,011	21	0,955	35	1,008
8	0,997	22	1,041	36	0,996
9	1,011	23	0,985	37	0,941
10	0,963	24	0,985	38	1,006
11	0,967	25	1,015	39	0,981
12	0,928	26	0,982	40	1,002
13	1,030	27	0,932	—	—
14	1,005	28	1,008	—	—

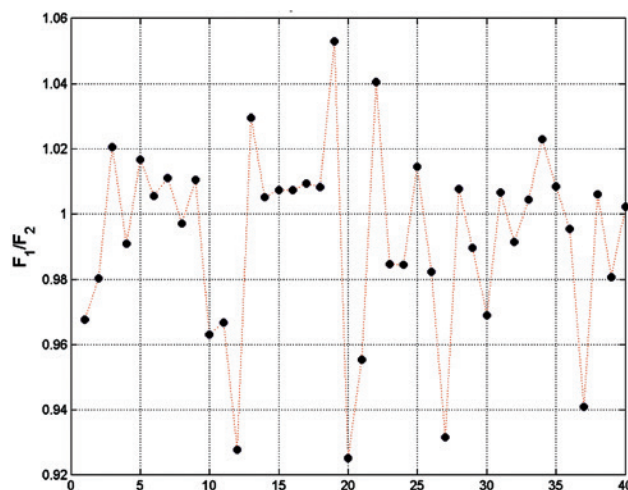


Рис. 5. Выборка значений отношения F_1/F_2

4) снятие с отображаемой диаграммы растяжения значений максимального усилия и усилия разрушения.

Далее две части образца соединяют в месте разрыва при помощи гайки и повторяют пп. 2-4 до разрыва по второй проточке.

Полученные экспериментальные значения отношения максимальных усилий при первом (F_1) и втором (F_2) нагружении представлены в табл. 4 и на рис. 5.

3.3. Многократное нагружение

Для испытаний на многократное растяжение, включающее 5 циклов, было изготовлено 10 цилиндрических образцов специального типа, эскиз которых представлен на рис. 6.

Алгоритм испытаний аналогичен алгоритму испытаний на двукратное нагружение, за исключением того, что пп. 2-4 повторяются до тех пор, пока не произойдет разрыва по всем проточкам.

Внешний вид испытательной машины в процессе проведения эксперимента, в том числе при растяжении разрыве и образца представлен на рис. 7.

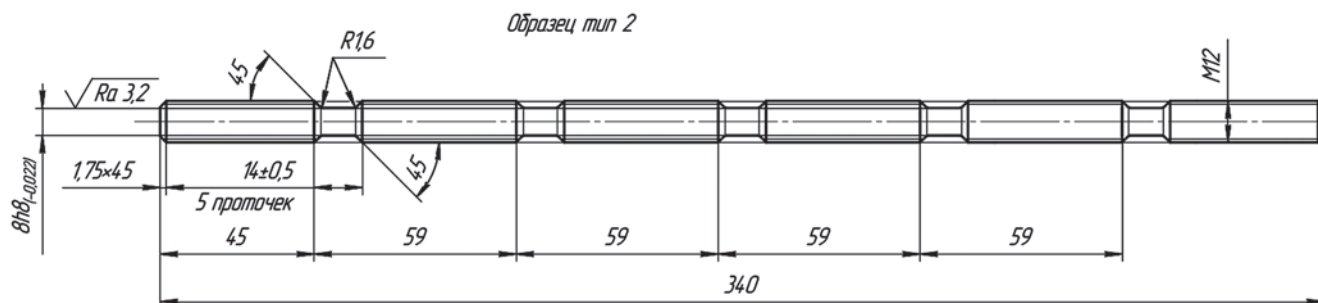


Рис. 6. Образец для испытаний на многократное нагружение

Вычисленные по экспериментальным данным значения отношения максимальных усилий при первом и последующем нагружениях представлены на рис. 8.

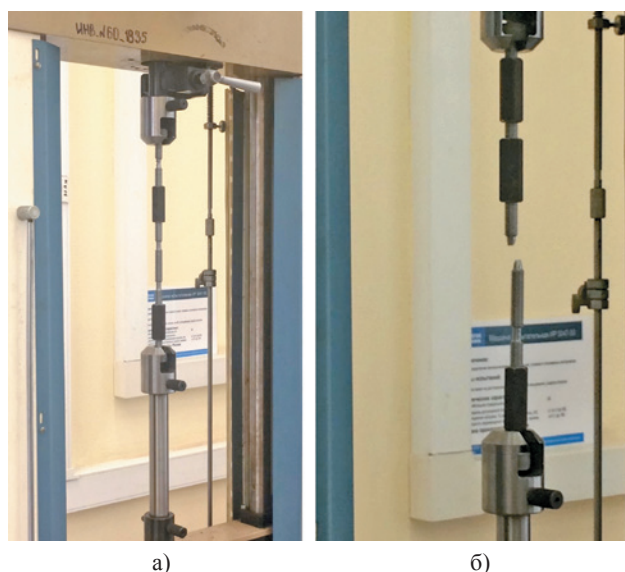


Рис. 7. Внешний вид испытательной машины в процессе проведения эксперимента:

а) – растяжение образца; б) – разрыв образца

4. Статистическая обработка результатов

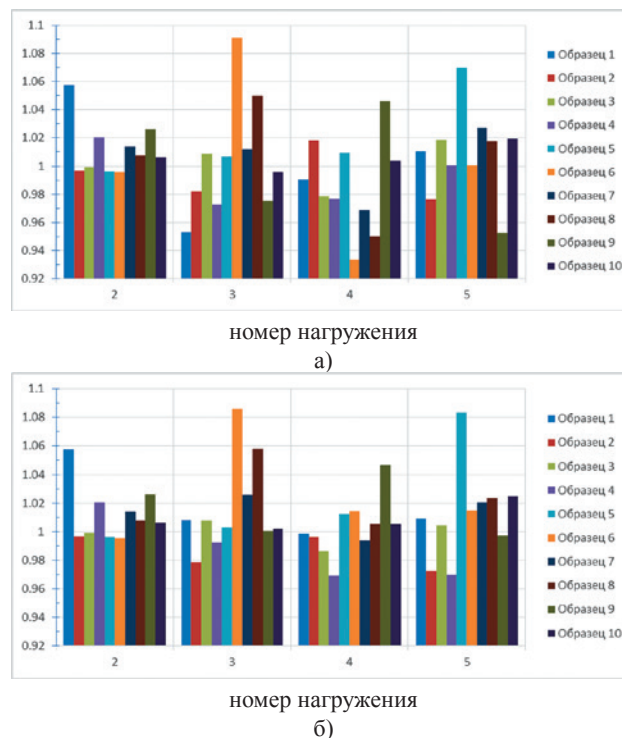
4.1. Двукратное нагружение

Исследования прочности 40 стальных образцов на разрыв образуют совокупность независимых и равно- точных измерений случайной величины (далее – СВ) максимального усилия X , кН.

По формуле Стерджесса [11] оптимальное количество интервалов, на которые разбивается наблюдаемый диа- пазон изменения случайной величины при построении гистограммы плотности ее распределения:

$$n = 1 + \log_2 N \approx 6,$$

где $N = 40$ – общее количество наблюдений случайной величины.


 Рис. 8. Выборка значений отношения максимальных усилий
 а) Отношения значений максимальных усилий предыдущего нагружения к текущему;
 б) Отношения значения максимальных усилий первого нагружения к текущему

На рис. 9 изображены гистограмма и полигон отно- сительных частот.

Значения эмпирической функции распределения вы- писаны в последней строке статистического ряда распре- деления относительных частот табл. 6. Значения эмпири- ческой функции распределения в аналитическом виде:

$$F'(x) = \begin{cases} 0,1, & \text{если } 0,9252 \leq x < 0,9465; \\ 0,2, & \text{если } 0,9465 \leq x < 0,9678; \\ 0,35, & \text{если } 0,9678 \leq x < 0,9891; \\ 0,775, & \text{если } 0,9891 \leq x < 1,0104; \\ 0,95, & \text{если } 1,0104 \leq x < 1,0317; \\ 1, & \text{если } 1,0317 \leq x < 1,0530. \end{cases}$$

Табл. 4. Количество данных в каждом интервале

Интервалы	[0,9252; 0,9465)	[0,9465; 0,9678)	[0,9678; 0,9891)	[0,9891; 1,0104)	[1,0104; 1,0317)	[1,0317; 1,0530)
Частота m_i	4	4	6	17	7	2

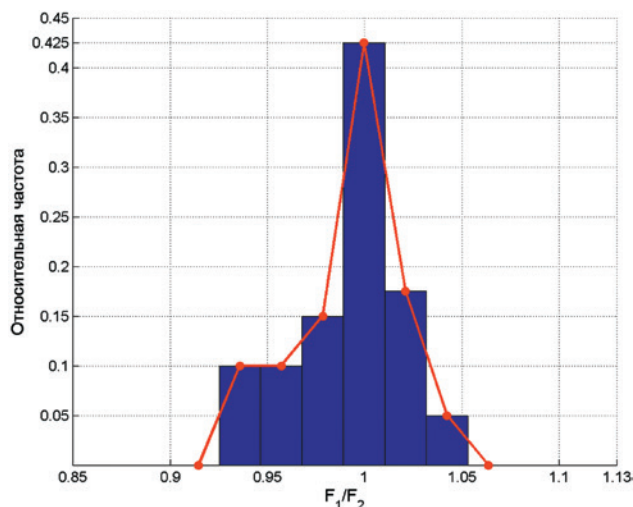
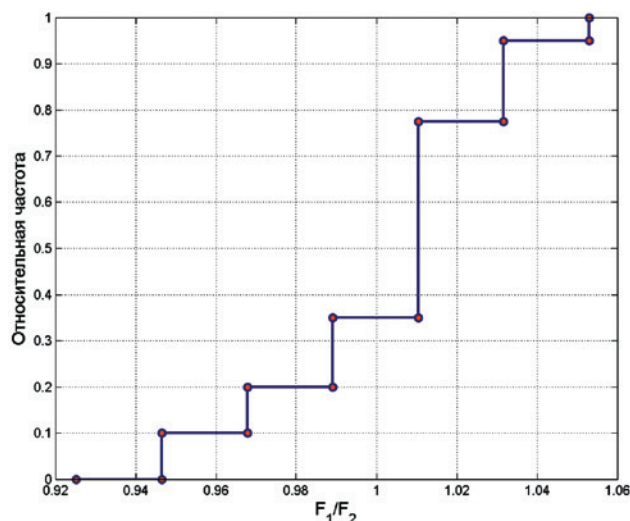

 Рис. 9. Гистограмма и полигон распределения относительных частот отношения F_1/F_2

 Рис. 10. Эмпирическая функция распределения отношения F_1/F_2

График эмпирической функции изображен на рис. 10.

В тех случаях, когда объем выборки достаточно велик ($N > 25$), прежде всего целесообразно найти математическое ожидание ($\bar{x}$):

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i m_i,$$

а затем перейти к вычислению центральных моментов порядка k ($k = 2, 3, 4$). Полученные значения сведены в табл. 6.

Выборочное среднеквадратическое отклонение σ :

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2 m_i}{N} = 0,0276,$$

коэффициент асимметрии (A):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^3 m_i}{N \sigma^2} = -0,0143,$$

коэффициент эксцесса (E):

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^4 m_i}{N \sigma^4} - 3 = 2,7116.$$

Среднеквадратичные отклонения коэффициентов асимметрии (A_s) и эксцесса (E_s):

$$A_s = 3 \cdot \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}} = 1,0930,$$

$$E_s = 5 \cdot \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}} = 3,2209,$$

Критерием нормальности распределения является выполнение неравенств:

$$|A| \leq A_s, \quad |E| \leq E_s.$$

Из приведенных расчетов видно, что выборочные коэффициенты асимметрии A и эксцесса E удовлетво-

Табл. 5. Частота попадания в каждый интервал

Интервалы	[0,9252; 0,9465)	[0,9465; 0,9678)	[0,9678; 0,9891)	[0,9891; 1,0104)	[1,0104; 1,0317)	[1,0317; 1,0530)
Относительная частота m_i/n	0,1	0,1	0,15	0,425	0,175	0,05
Накопленная относительная частота	0,1	0,2	0,35	0,775	0,95	1,0

Табл. 6. Расчет параметров распределения

Интервалы наблюдаемых значений СВ X	Середины интервалов X_i	Частоты	$(X_i - \bar{x}) m_i$	$(X_i - \bar{x})^2 m_i$	$(X_i - \bar{x})^3 m_i$	$(X_i - \bar{x})^4 m_i$
[0,9252; 0,9465)	0,9359	4	-0,2236	0,0125	$-6,9894 \cdot 10^{-4}$	$3,9075 \cdot 10^{-5}$
[0,9465; 0,9678)	0,9572	4	-0,1384	0,0048	$-1,6581 \cdot 10^{-4}$	$5,7385 \cdot 10^{-6}$
[0,9678; 0,9891)	0,9785	6	-0,0799	0,0011	$-1,4151 \cdot 10^{-5}$	$1,8836 \cdot 10^{-7}$
[0,9891; 1,0104)	0,9998	17	0,1358	0,0011	$8,6604 \cdot 10^{-6}$	$6,9167 \cdot 10^{-8}$
[1,0104; 1,0317)	1,0211	7	0,2050	0,0060	$1,7579 \cdot 10^{-4}$	$5,1479 \cdot 10^{-6}$
[1,0317; 1,0530)	1,0424	2	0,1012	0,0051	$2,5883 \cdot 10^{-4}$	$1,3092 \cdot 10^{-5}$
Итого:		40	$7,1054 \cdot 10^{-15}$	0,0306	$-4,3562 \cdot 10^{-4}$	$6,3311 \cdot 10^{-5}$

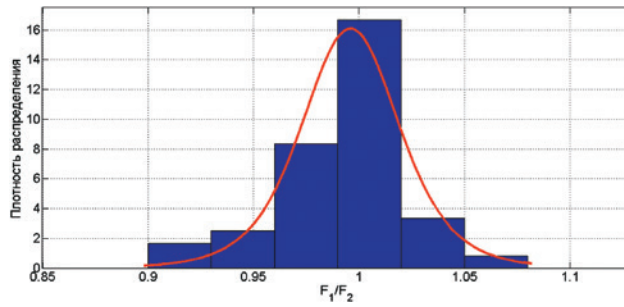
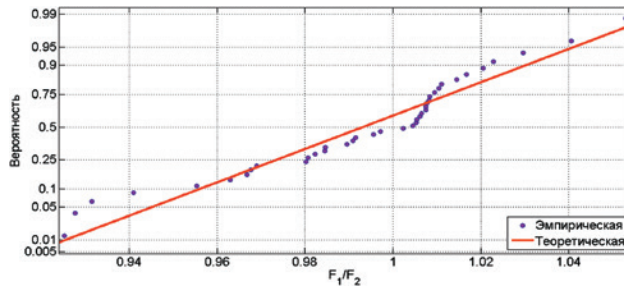
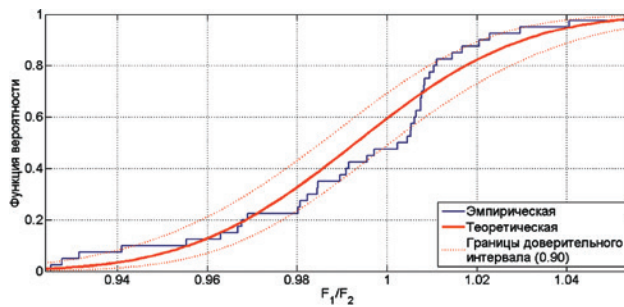
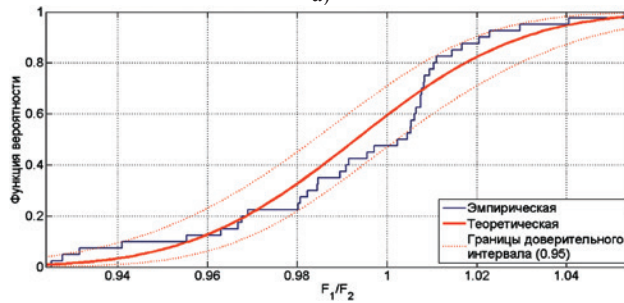

 Рис. 11. Плотность распределения F_1/F_2


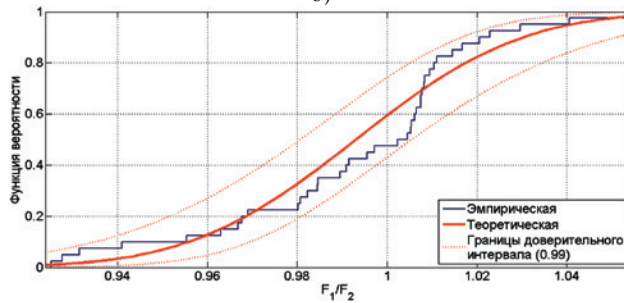
Рис. 12. График сравнения распределения эмпирической и теоретической вероятности



а)



б)



в)

 Рис. 13. График сравнения эмпирической функции вероятности для выборки с теоретическим распределением (доверительная вероятность: а – $\alpha=0,90$, б – $\alpha=0,95$, в – $\alpha=0,99$)

ряют неравенствам, что соответствует нормальному распределению. Вид полигона и гистограммы относительных частот также напоминает нормальную кривую (кривую Гаусса).

Исходя из «технологии» образования СВ X , т.е. механизма образования отклонений значений максимальных усилий от некоторого номинального значения, можно предположить, что распределение отношения F_1/F_2 является нормальным.

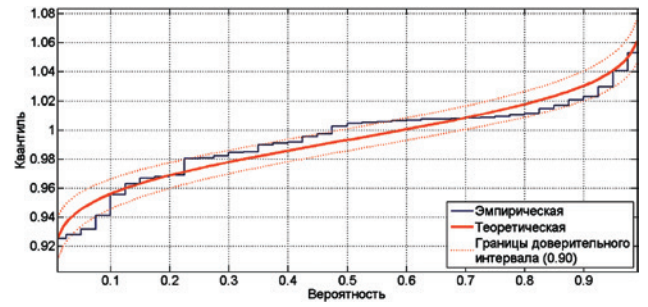
Плотность вероятности нормального распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}.$$

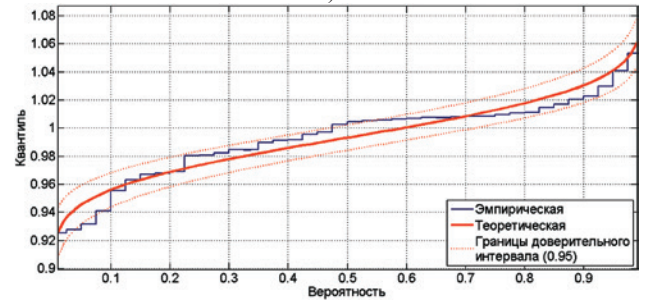
Найдем точечные оценки параметров $\bar{x}$ и π нормального распределения методом моментов:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i m_i = 0,9918,$$

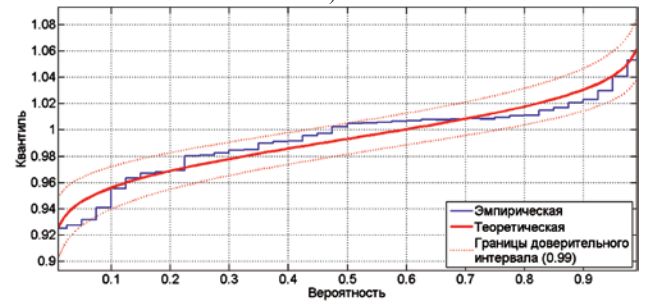
$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2 m_i}{N} = 0,0276.$$



а)



б)



в)

 Рис. 14. График сравнения эмпирической квантили распределения с теоретическим распределением (доверительная вероятность: а – $\alpha=0,90$, б – $\alpha=0,95$, в – $\alpha=0,99$)

Следовательно, плотность вероятности предполагаемого нормального распределения имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{0,0276 \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-0,9918)^2}{2 \cdot 0,0276^2}}.$$

Выводы

Назначение оптимальных коэффициентов запаса при испытаниях на прочность стальных магистральных трубопроводов является важнейшим аспектом, обуславливающим надежность их эксплуатации. Эти величины напрямую связаны с проектными параметрами трубопроводов и методиками определения их несущей способности. Однако текущие значения коэффициентов основаны на опыте середины XX-го века и не пересматривались много лет, несмотря на развитие техники строительства трубопроводов и технологии производства труб.

В рамках проведенной работы была отработана методика экспериментального исследования на двукратное и многократное растяжение стержневых образцов специальной формы, изготовленных из трубной стали. Полученные результаты подтвердили корректность используемого в настоящее время подхода к выбору коэффициентов запаса при испытаниях на прочность магистральных трубопроводов.

Испытательный арсенал исследователей пополнился методическим инструментом, позволяющим если не заменить, то на первых порах подкреплять результаты дорогостоящих и трудоемких полномасштабных экспериментов на реальных трубопроводах. В частности, многократное нагружение образцов может использоваться для имитации многоэтапных испытаний трубопроводов на участках повышенной категории.

Важно также учитывать влияние таких факторов, как природа трубного материала и температурные условия испытаний и последующей работы трубопровода. Исходя из этого, в развитие описанного в настоящей статье эксперимента и с целью наработки достаточной эмпирической базы, планируется разработать соответствующую методику и провести аналогичные испытания образцов, изготовленных из разных материалов, а также при различных температурах первого и второго нагружений.

В современных реалиях внедрения трубных материалов нового поколения, в том числе различных цветных металлов и композитных материалов, использование методики позволит усовершенствовать подход к оценке их промышленной применимости и к назначению параметров испытаний трубопроводов на прочность.

Библиографический список

1. Мир-Бабаев М.Ф. Трубопроводный транспорт в бакинском нефтяном деле (к 115-летию начала строительства уникального трубопровода Баку-Батум) // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 2012. № 1. С. 73-79.

2. The Big Inch and Little Big Inch pipelines: the most amazing government-industry cooperation ever achieved. Texas Eastern Transmission Corporation, May 2000.

3. Technical, operational, practical, and safety considerations of hydrostatic pressure testing existing pipelines. Interstate Natural Gas Association of America Foundation final report No. 2013.03.

4. Gray J.S. Retesting pipeline justifies higher allowable discharge pressures // Oil & Gas Journal. Vol. 63. No. 38. P. 122.

5. Kiefner J.F., Maxey W.A. Pressure ratios key to effectiveness; in-line inspection complements // Oil & Gas Journal. Vol. 98. No. 31. Pp. 54-61.

6. Галиуллин З.Т., Карпов С.В., Королев М.И. и др. Переиспытание и комплексное обследование магистральных газопроводов, подверженных стресс-коррозии // Научно-технический сборник «Транспорт и подземное хранение газа». М.: ИРЦ Газпром, 1996. 35 с.

7. Brooks L.E. High-Pressure Testing – Pipeline Defect Behavior and Pressure Reversals. ASME, 68-PET-24, 1968.

8. Курганова М.А., Нефедов С.В., Носова Е.С. и др. Сравнительный анализ методик расчета несущей способности магистральных газопроводов по различным нормам и стандартам // Наука и техника в газовой промышленности. 2012. № 4(52). С. 5-19.

9. Hopkins P. High design factor pipelines: integrity issues // The Journal of Pipeline Integrity. 2005. № 2. Pp. 69-97.

10. Маянц Ю.А. Совершенствование методов испытаний магистральных нефтегазопроводов в северных условиях: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19: защищена 11.02.2015 / Маянц Юрий Анатольевич. М., 2015. 142 с. Москва, 2014. – 142 с.

11. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

References

1. Mir-Babayev M.F. Pipeline transportation in the Baku oil industry (dedicated to the 115th anniversary of commencing the construction of unique pipeline Baku-Batum). Azerbaijan Oil Industry 2012;1:63-69.

2. The Big Inch and Little Big Inch pipelines: the most amazing government-industry cooperation ever achieved. Texas Eastern Transmission Corporation; May 2000.

3. Technical, operational, practical, and safety considerations of hydrostatic pressure testing existing pipelines. Interstate Natural Gas Association of America Foundation final report No. 2013.03.

4. Gray J.S. Retesting pipeline justifies higher allowable discharge pressures. Oil & Gas Journal;63(38);122.

5. Kiefner J.F., Maxey W.A. Pressure ratios key to effectiveness; in-line inspection complements. Oil & Gas Journal;98(31):54-61.

6. Galiullin Z.T., Karpov S.V., Korolev M.I. et al. Retesting and comprehensive inspection of main gas pipelines

subject to stress corrosion. In: Collected Science and Engineering Papers Transmission and Underground Storage of Gas. Moscow: IRC Gazprom; 1996. (in Russ.)

7. Brooks L.E. High-Pressure Testing – Pipeline Defect Behavior and Pressure Reversals. ASME, 68-PET-24; 1968.

8. Kurganova M.A., Nefedov S.V., Nosova E.S. et al. [A comparative analysis of methods for calculating the bearing capacity of main gas pipelines according to various norms and standards]. Science and Technology in the Gas Industry 2012;4(52):5-19. (in Russ.)

9. Hopkins P. High design factor pipelines: integrity issues. The Journal of Pipeline Integrity 2005;2:69-97.

10. Mayants Yu.A. [Improving the testing methods for main oil and gas pipelines in northern conditions: a Candidate of Engineering dissertation: 25.00.19: defended on 02.11.2015]. Moscow; 2015. (in Russ.)

11. Stepanov M.N. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. Moscow: Mashinostroyeniye; 1985. (in Russ.)

Сведения об авторах

Маянц Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, начальник Корпоративного научно-технического центра технологий строительства, эксплуатации и ремонта ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Y_Mayants@vniigaz.gazprom.ru

Ширяпов Дмитрий Игоревич – кандидат технических наук, начальник Лаборатории методического обеспечения предпусковых и пусковых операций Корпоративного научно-технического центра технологий строительства, эксплуатации и ремонта ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация; председатель подкомитета «Системы трубопроводного транспорта» технического комитета «Нефтяная и газовая промышленность, включая низкоуглеродную энергетику» международной организации по стандартизации ISO, e-mail: D_Shiryapov@vniigaz.gazprom.ru

Носова Екатерина Сергеевна – старший научный сотрудник Лаборатории материалов и изделий для строительства и ремонта трубопроводов Корпоративного научно-технического центра технологий строительства, эксплуатации и ремонта ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: E_Nosova@vniigaz.gazprom.ru

About the authors

Yury A. Mayants, Candidate of Engineering, Head of Corporate Scientific and Technical Center of Construction, Operation and Repair Technologies, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: Y_Mayants@vniigaz.gazprom.ru

Dmitry I. Shiryapov, Candidate of Engineering, Head of Laboratory for Pipeline Pre-commissioning, Corporate Scientific and Technical Center of Construction, Operation and Repair Technologies, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint Petersburg, Russian Federation; Chairman of the Subcommittee "Pipeline Transportation Systems" of the Technical Committee "Oil and gas industries including lower carbon energy" of the International Organization for Standardization ISO, e-mail: D_Shiryapov@vniigaz.gazprom.ru

Ekaterina S. Nosova, Senior Researcher, Laboratory of Materials and Products for Pipelines Construction and Repair, Corporate Scientific and Technical Center of Construction, Operation and Repair Technologies, Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: E_Nosova@vniigaz.gazprom.ru

Вклад авторов

Маянцем Ю.А. предложена идея и концепция проведения исследования, разработана методика эксперимента на двукратное и многократное растяжение, подготовлена конструкторская документация на изготовление стержневых образцов специальной формы.

Ширяповым Д.И. выполнен ретроспективный обзор отечественных и зарубежных требований нормативных документов, регламентирующих требования к испытаниям на прочность трубопроводов, проанализированы предпосылки к действующим в настоящее время параметрам испытаний, сформулированы выводы по результатам работы.

Носовой Е.С. проведены испытания на растяжение стандартных цилиндрических образцов, построены диаграммы деформирования, проведены испытания на двукратное и многократное растяжение цилиндрических образцов специального типа, выполнена статистическая обработка экспериментальных данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.