

Оценка надежности сварных соединений стальных магистральных трубопроводов

И.Г. Скобцов, М.О. Дербин

Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

Аннотация: Работа посвящена исследованию надежности сварных соединений трубопроводных систем при условии наличия в сварных швах дефектов различного вида: внешних подрезов, внутренних подрезов, пор. Произведено конечно-элементное моделирование сварных соединений и проведен расчет интенсивности действующих напряжений с применением пакета прикладных программ Ansys. Рассчитаны коэффициенты концентрации напряжений и проведена оценка вероятности безотказной работы сварных соединений при наличии рассмотренных дефектов. Полученные данные могут быть использованы при проектировании и оптимизации элементов трубопроводных систем.

Ключевые слова: моделирование, показатели надежности, сварное соединение.

Введение. Магистральные трубопроводы, несмотря на кажущуюся простоту, являются ответственными и дорогостоящими инженерно-техническими сооружениями, функционирующими в непростых условиях: большая протяженность, сезонные перепады температур (в арктической зоне страны строительные-монтажные работы и эксплуатация трубопроводов могут происходить при температуре до -60°C), наличие высоких рабочих давлений, воздействие внешних случайных нагрузок, присутствие в материале труб различных дефектов – концентраторов напряжений [1]. Причины появления дефектов носят случайный характер и могут быть различными: их образование может происходить при металлургическом процессе производства труб, при перевозке труб к месту эксплуатации водным или наземным транспортом, при монтаже трубопроводов, в том числе, при механической обработке и сварке.

При разработке и производстве стальных магистральных трубопроводов необходимо владеть данными о способности материала сопротивляться воздействию приложенных нагрузок с учетом влияния таких факторов, как наличие концентраторов напряжений в виде дефектов сварки,

снижающих прочность и оказывающих негативное влияние на надежность конструкции. Вопросы сопротивления разрушению сталей магистральных трубопроводов и их сварных соединений изучались Красовским А.Я., Красику В.Н. и др. [2], при этом авторами отмечено, что на сопротивление разрушению магистральных трубопроводов существенно влияют прочность и трещиностойкость их сварных соединений, которые являются наиболее уязвимым звеном этих конструкций. Продольные сварные швы, а также зона термического влияния с точки зрения прочности и трещиностойкости, а также вследствие возникновения в них концентраторов напряжений в виде пор, включений, подрезов, непроваров являются зонами, определяющими работоспособность трубопроводов. Изменение структуры зоны термического влияния (укрупнение размеров кристаллитов) приводит к снижению пластичности и вязкости сварных соединений труб, и, следовательно, к уменьшению способности материала сопротивляться разрушению. При этом необходимо отметить, что сварные соединения (сварной шов и зона термического влияния) проявляют такую же зависимость от условий нагружения, как и основной металл [2].

Задачи по оценке надежности магистральных газо- и нефтепроводов рассмотрены в работах Анучкина М.П., Горицкого В.Н. [1], Болотина В.В. [3], Иванцова О.Н., Харитонов В.И. [4] и ряда других авторов. Как отмечено в работе [4], разрушения трубопроводов, вызванные наличием дефектов в сварных стыках, занимают второе место по числу причин отказов.

Исследование трещиностойкости и оценка показателей надежности элементов конструкций трубопроводной арматуры с позиций механики разрушения проводилась в работах [5,6]. Поскольку вероятность безотказной работы является одним из важнейших показателей безотказности и, зачастую, входит в целевую функцию при решении задач оптимизации [7,8],

представляет достаточно большой интерес исследование влияния размеров сварных дефектов на данный показатель.

Материалы и методы исследований. В качестве примера рассмотрим стальную магистральную трубу с прямым швом вдоль продольной оси по ГОСТ 31447-2012. Исходные данные для исследования представлены в таблице №1.

Алгоритм исследований:

1) определение номинальных напряжений $\sigma_{ном}$ в стенках трубы, вызываемых действием давления на внутреннюю поверхность;

2) построение конечно-элементной модели сварного соединения в пакете прикладных программ ANSYS для следующих вариантов: отсутствие дефектов в сварном соединении; наличие дефектов следующих видов: внешний подрез, внутренний подрез, пора;

3) приложение нагрузки и оценка интенсивности напряжений в сварных соединениях, определение максимальных значений напряжений σ_{max} и коэффициентов концентрации напряжений K ;

4) расчет вероятности безотказной работы трубопровода при наличии концентраторов напряжений.

Таблица №1

Показатель	Значение
Рабочее давление в трубе	5 МПа
Наружный диаметр трубы	$D = 1220$ мм
Толщина стенки трубы	$t = 25$ мм
Материал	сталь 09Г2С
Предел прочности	$\sigma_T = 420$ МПа
Способ сварки	полуавтоматическая в среде защитных газов по ГОСТ 14771-76
Вид сварного шва	стыковой, с двусторонней разделкой кромок (рис. 1)

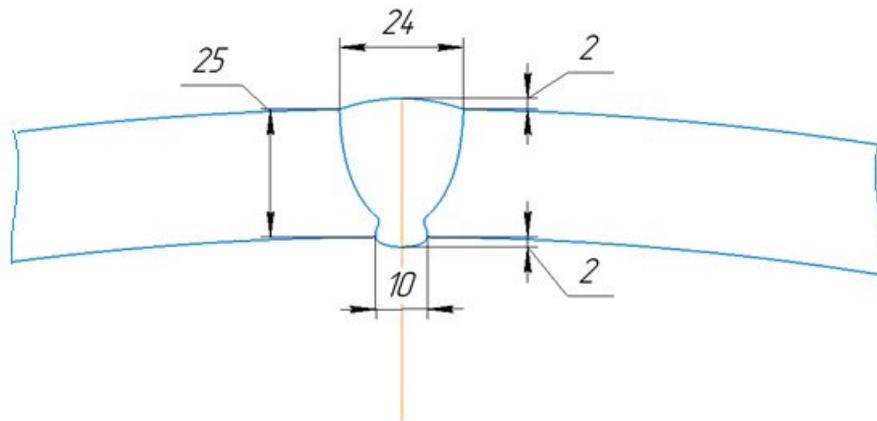


Рис. 1 – Эскиз сварного соединения

Определение номинальных напряжений в стенках трубы

$$\sigma_{ном} = P \cdot \frac{D}{2 \cdot t},$$

где P – рабочее давление; D – диаметр трубы; t – толщина стенки трубы.

Тогда $\sigma_{ном} = 5 \cdot \frac{1220}{2 \cdot 25} = 122$ МПа.

Коэффициент концентрации напряжений

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ном}},$$

где σ_{max} – максимальное значение напряжений.

Оценка интенсивности действующих напряжений проведена при использовании метода конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS. Результаты расчетов представлены на рис. 2 – 5 и в таблице №2.

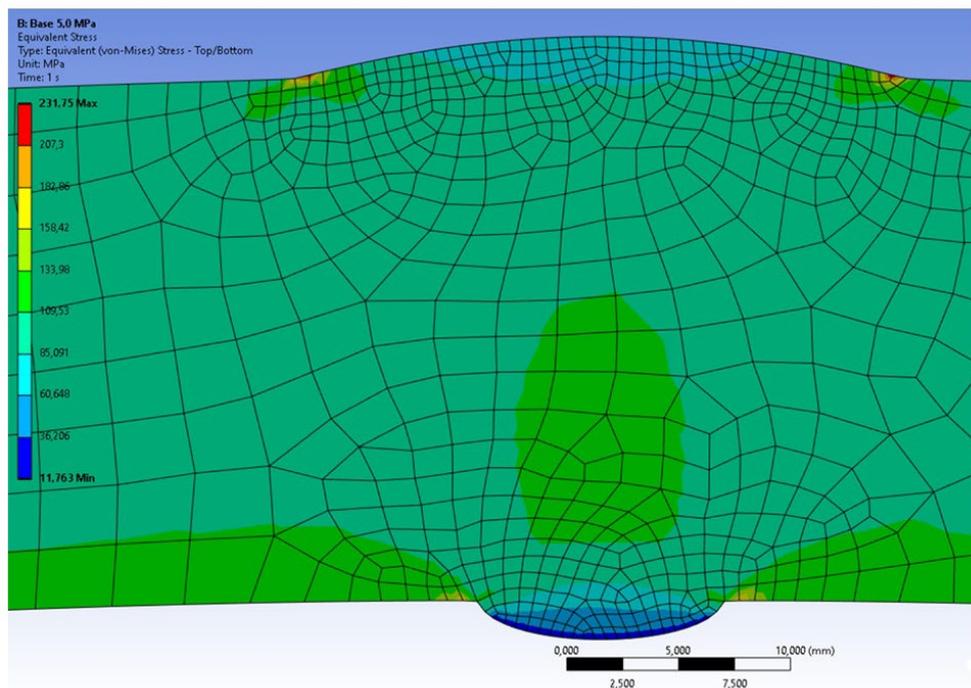


Рис. 2 – Бездефектный сварной шов, давление $P = 5$ МПа

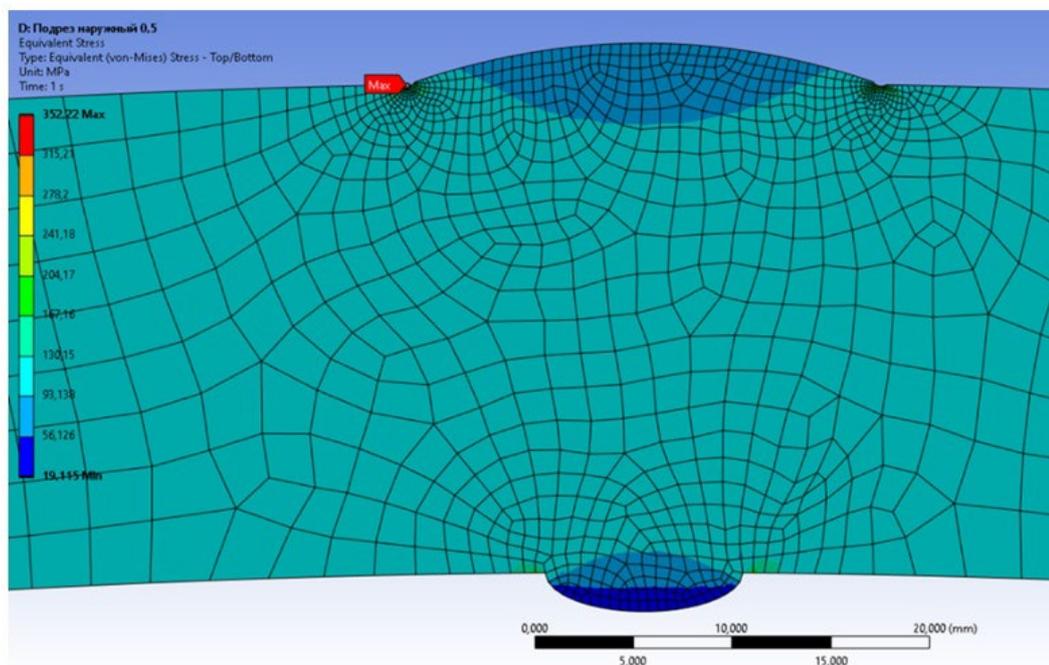


Рис. 3 – Сварной шов с внешними подрезами
(радиус подреза $r_{\text{п}} = 0.5$ мм, давление $P = 5$ МПа)

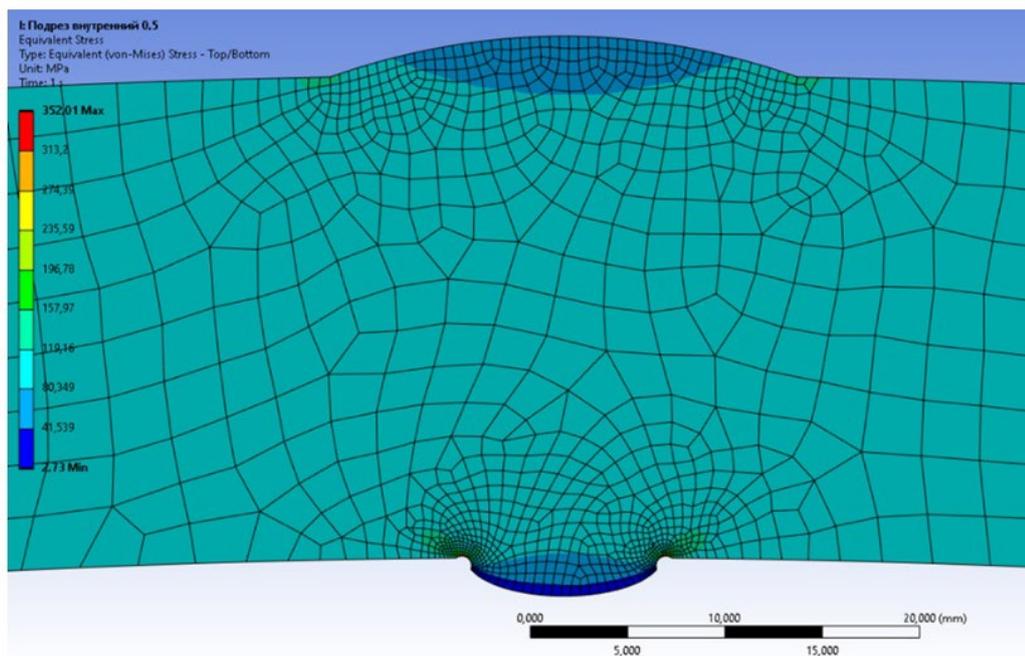


Рис. 4 – Сварной шов с внутренними подрезами
(радиус подреза $r_{\text{п}} = 0.5$ мм, давление $P = 5$ МПа)

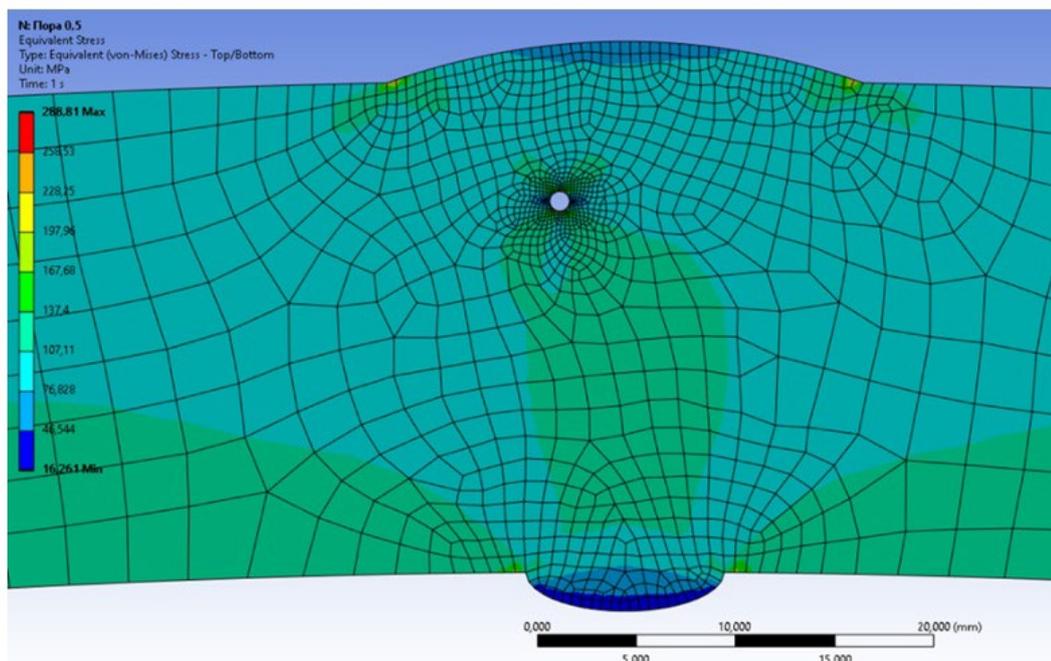


Рис. 5 – Сварной шов с порой
(диаметр поры $d_{\text{п}} = 0.5$ мм, давление $P = 5$ МПа)

Таблица № 2

Максимальные напряжения в сварных соединениях и коэффициенты концентрации напряжений при давлении в трубопроводе $P = 5$ МПа

Вид сварного дефекта	σ_{\max} , МПа	$K_{\text{конц}}$
Бездефектный шов	231.35	1.9
Внешние подрезы, радиус подреза:		
$r_{\text{п}} = 0.9$ мм	293.96	2.4
$r_{\text{п}} = 0.8$ мм	303.15	2.48
$r_{\text{п}} = 0.7$ мм	316.87	2.59
$r_{\text{п}} = 0.6$ мм	329.63	2.7
$r_{\text{п}} = 0.5$ мм	352.22	2.89
Внутренние подрезы, радиус подреза:		
$r_{\text{п}} = 0.9$ мм	263.46	2.15
$r_{\text{п}} = 0.8$ мм	270.87	2.22
$r_{\text{п}} = 0.7$ мм	282.88	2.31
$r_{\text{п}} = 0.6$ мм	293.47	2.4
$r_{\text{п}} = 0.5$ мм	352.01	2.66
Поры, диаметр поры:		
$d_{\text{п}} = 0.5$ мм	288.81	2.37
$d_{\text{п}} = 0.8$ мм	299.95	2.46
$d_{\text{п}} = 1.2$ мм	303.86	2.49
$d_{\text{п}} = 1.5$ мм	306.26	2.51
$d_{\text{п}} = 1.8$ мм	307.67	2.52

Оценка вероятности безотказной работы. Выразим вероятность безотказной работы как вероятность того, что величина наибольших напряжений в сварном соединении не превысит предела текучести (при условии равнопрочности основного металла и металла сварного шва)

$$R = \Pr\{\sigma_T \geq \sigma_{\max}\} = \Pr\{\sigma_T - \sigma_{\max} \geq 0\}.$$

Рассмотрим действующие напряжения и механические характеристики (предел текучести материала) как случайные величины с известными законами распределения. Предположим, что законы распределения величин σ_T и σ_{\max} известны и статистически независимы. Введем величину $Y = \sigma_T - \sigma_{\max}$ и примем допущение о нормальности ее распределения с математическим ожиданием

$$\bar{y} = M_{\sigma_T} - M_{\sigma_{\max}}$$

и дисперсией

$$D_y = D_{\sigma_T} + D_{\sigma_{\max}}.$$

Тогда вероятность безотказной работы [9]

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

$$\text{где } z = -\frac{\bar{y}}{\sqrt{D_y}} = -\frac{\bar{\sigma}_T - \bar{\sigma}_{\max}}{\sqrt{D_{\sigma_T} + D_{\sigma_{\max}}}}.$$

Здесь M_{σ_T} , $M_{\sigma_{\max}}$, D_{σ_T} , $D_{\sigma_{\max}}$ – математические ожидания и дисперсии случайных величин σ_T и σ_{\max} .

Принимаем: $M_{\sigma_T} = 420$ МПа, $M_{\sigma_{\max}} = \sigma_{\max}$, $D_{\sigma_T} = (0.1M_{\sigma_T})^2$,
 $D_{\sigma_{\max}} = (0.1M_{\sigma_{\max}})^2$ согласно [10]. Результаты расчета представлены на рис. 6.

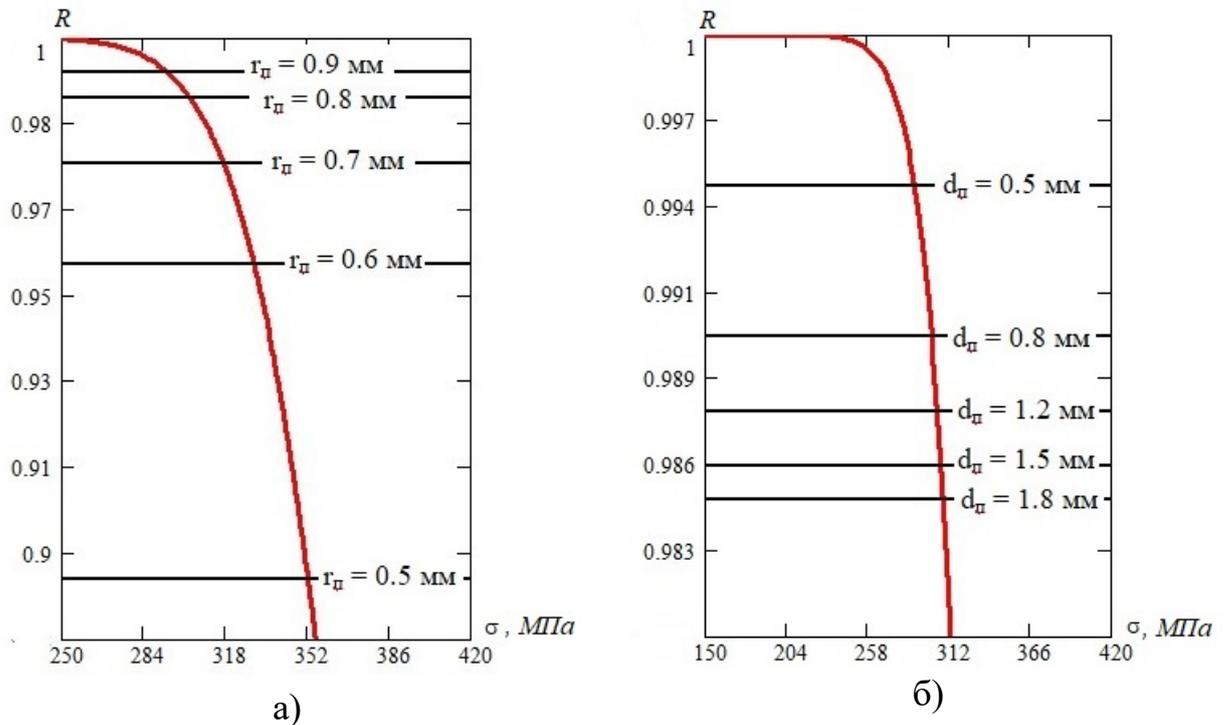


Рис. 6 – Графики зависимости вероятности безотказной работы сварного соединения: а) при наличии внешних подрезов; б) при наличии пор

Выводы. В работе проведено исследование влияния концентраторов напряжений сварного шва (внешних подрезов, внутренних подрезов и пор) на надежность сварного соединения. Произведено конечно-элементное моделирование сварных соединений и проведен расчет интенсивности действующих напряжений. Сварные швы сами по себе являются концентраторами напряжений, а если в материале шва присутствуют дефекты различного рода, то следует ожидать, что их наличие негативным образом скажется на вероятности безотказной работы. Так, для рассмотренных вариантов вероятность безотказной работы составила: для случаев наличия внешних подрезов – $R = 0.892$ (при радиусе подреза 0.5 мм), пор – $R = 0.985$ (диаметр поры 1.8 мм). Таким образом, как показывают результаты расчетов, рассмотренные дефекты являются достаточно опасными, в равной степени снижающими вероятность безотказной работы. Полученные данные могут быть использованы при проектировании и оптимизации элементов трубопроводных систем.

Литература

1. Анучкин М.П., Горицкий В.Н., Мирошниченко Б.И. Трубы для магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1986. 231 с.
2. Красовский А.Я., Красиго В.Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. Киев: Наук. думка, 1990. 176 с.
3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Книга по требованию, 2013. 312 с.
4. Иванцов О.М., Харитонов В.И. Надежность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1978. 166 с.
5. Скобцов И.Г. Оценка несущей способности устройства защиты оператора лесопромышленного трактора с позиций механики разрушения // Инженерный вестник Дона, 2015, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2889.
6. Скобцов И.Г., Шиловский В.Н., Любавский Н.А. Оценка вероятности безотказной работы трубопроводной арматуры энергетического применения // Инженерный вестник Дона, 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5243.
7. Pitukhin A.V. Fracture Mechanics and Optimal Design // Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. Volume 34, № 3. pp. 933-940.
8. Pitukhin A.V. Optimal Design Problems Using Fracture Mechanics Methods // Computers and Structures. 1997. Volume 65, № 4. pp. 621-624.
9. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
10. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 480с.

References

1. Anuchkin M.P., Gorickij V.N., Miroshnichenko B.I. Truby dlja magistral'nyh truboprovodov [Pipes for main pipelines]. Moskva: Nedra, 1986. 231 p.
2. Krasovskij A.Ja., Krasiko V.N. Treshhinostojkost' stalej magistral'nyh truboprovodov [Crack resistance of main pipeline steels]. Kiev: Nauk. dumka, 1990. 176 p.
3. Bolotin V.V. Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsij [Prediction of Machine and Construction Useful Life Span]. Moskva: Kniga po trebovaniju, 2013. 312 p.
4. Ivancov O.M., Haritonov V.I. Nadezhnost' magistral'nyh truboprovodov [Reliability of main pipelines]. Moskva: Nedra, 1978. 166 p.
5. Skobtsov I.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2889.
6. Skobtsov I.G., Shilovskiy V.N., Lubavskiy N.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5243.
7. Pitukhin A.V. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. 1992. Volume 34, № 3. pp. 933-940.
8. Pitukhin A.V. Computers and Structures. 1997. Volume 65, № 4. pp. 621-624.
9. Gmurman V.E. Teorija veroyatnostej i matematicheskaja statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moskva: Vysshaja shkola, 2003. 479p.
10. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneyderovich R.M. Nesushhaja sposobnost' i raschety detalej mashin na prochnost' [Load-carrying Capacity and Machine Element Strength Analysis]. Moskva, Mashinostroenie, 1975. 480 p.

Дата поступления: 14.04.25

Дата публикации: 25.05.25