

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-1-80-86

УДК 622.691.4:053:533.6(252.6)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ
ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ****SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE MAIN PIPELINE
TAKING INTO ACCOUNT REAL INTERNAL DEFECTS****Бурков Петр Владимирович^{1,2},**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: burkovpv@mail.ru

Petr V. Burkov^{1,2}, Dr. Sc. in Engineering, Professor**Бурков Владимир Петрович¹,**

ассистент, e-mail: vpb1@tpu.ru

Vladimir P. Burkov¹, Assistant**Николаенко Сергей Николаевич¹,**

аспирант, e-mail: burkovpv@mail.ru

Sergey N. Nikolaenko¹, Postgraduate**Тимофеев Вадим Юрьевич¹,**

канд. техн. наук, доцент, e-mail: tv-ytitpu@mail.ru

Vadim Yu. Timofeev¹, C.Sc. in Engineering, Associate Professor¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30¹National Research Tomsk Polytechnic University, 30 street Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation²Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2²Tomsk State University of Architecture and Building, 2 Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation**Аннотация:**

В статье описывается исследование напряженно-деформированного состояния магистрального нефтепровода, подверженного коррозионным повреждениям. Объектом исследования являлся участок магистрального трубопровода из стали марки 17Г2С с параметрами моделируемого участка: наружный диаметр – 1240 мм, длина участка трубы – 16,8 км, толщина стенки трубы – 10 мм. Исходные данные для моделирования дефектов трубопровода получены методом внутритрубной диагностики (ВТД). Моделирование трубопровода и расчет напряженно-деформированного состояния выполнялись с помощью программной системы конечно-элементного анализа Autodesk Inventor. Получены значения максимального и минимального смещения и напряжения по Мизесу, а также коэффициенты запаса прочности. Полученные алгоритм и модель позволяют прогнозировать изменение прочностных характеристик трубопроводов с различными параметрами.

Ключевые слова: трубопровод, метод конечных элементов, Autodesk Inventor, численный эксперимент, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, эквивалентные деформации, потеря металла, дефект.

Abstract:

The article describes the study of the stress-strain state of the main oil pipeline prone to corrosion damage. The object of the study was a section of the main pipeline made of steel grade 17G2S with the following parameters of the simulated section: outer diameter – 1240 mm, pipe section length – 16.8 km, pipe wall thickness - 10 mm. Initial data for modeling pipeline defects were obtained by the method of in-line diagnostics. Modeling of the pipeline and calculation of the stress-strain state were carried out using the Autodesk Inventor finite element

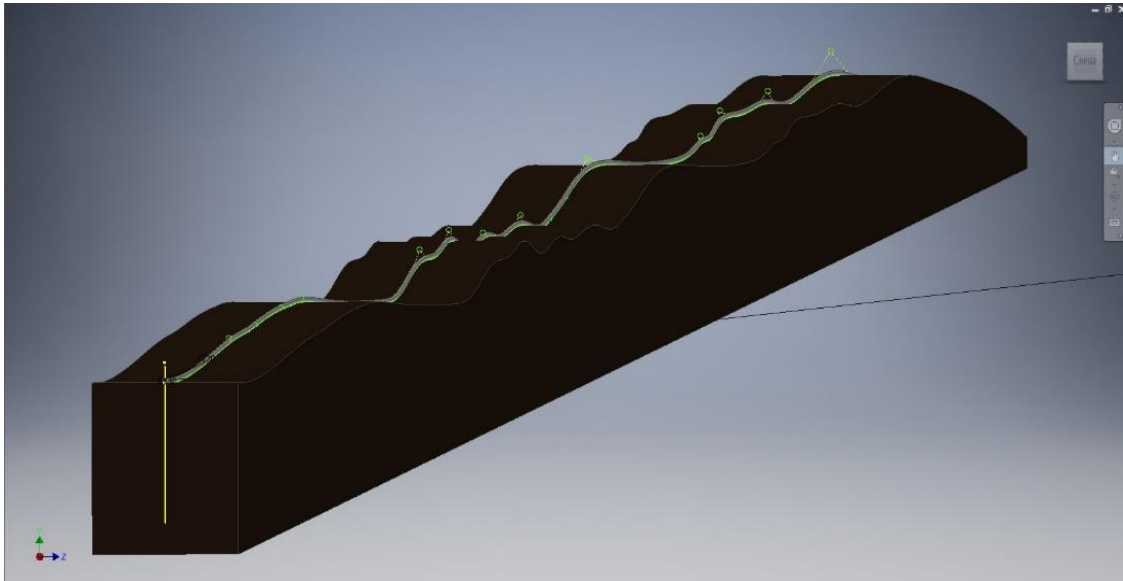


Рис. 1. Цифровая модель трубопровода и участка прокладки.
 Fig. 1. Digital model of the pipeline and the laying area.

№ особенности	№ секции трубопровода	Дистанция, м	Описание особенности	Глубина дефекта, в % от наружного диаметра	Длина дефекта, мм	Ширина дефекта, мм	Угол расположения дефекта, °	Тип
12	210	159,6	Потеря металла	1,5	36	100	212	внутренний
13	210	159,8	Потеря металла, производственный дефект	1,3	21	44	220	внутренний
14	210	160,1	Потеря металла, производственный дефект	1,5	15	22	229	внутренний
15	210	160,8	Потеря металла	1,2	24	61	244	внутренний

analysis software. The values of the maximum and minimum displacement and stress according to von Mises, as well as safety factors are obtained. The obtained algorithm and data model will make it possible to predict changes in the strength characteristics of pipelines with different parameters.

Key words: pipeline, finite element method, Autodesk Inventor, numerical experiment, stress-strain state, equivalent stresses, equivalent strains, metal loss, defect.

Актуальность работы (The urgency of the discussed issue):

В настоящее время для транспортировки углеводородного сырья широко используется трубопроводный транспорт, в связи с чем возрастает необходимость в проведении исследований трубопроводов на прочность. Для исследования свойств реальных трубопроводов одним из распространенных методов является внутритрубная диагностика (ВТД), для исследования и прогнозирования свойств вновь проектируемых трубопроводов используется

метод конечных элементов (МКЭ) и специализированное программное обеспечение его реализующее. Одним из лидеров рынка программного обеспечения, реализующего МКЭ, является Autodesk Inventor, данная программа давно и успешно используется для проектирования и расчета трубопроводного транспорта.

Нагрузки на нефтепровод во время его работы зависят от множества различных факторов, предусмотреть влияние которых зачастую нелегко, поэтому его эксплуатационная надежность напрямую зависит от учета как можно большего

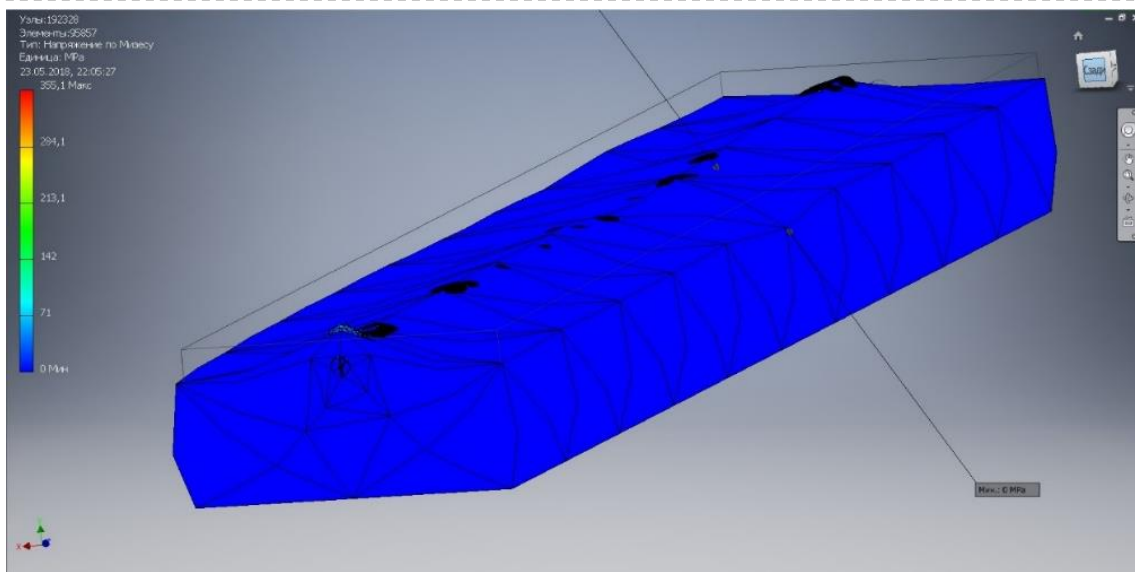


Рис. 2. Цифровая модель дефектов трубопровода.
Fig. 2. Digital model of pipeline defects.

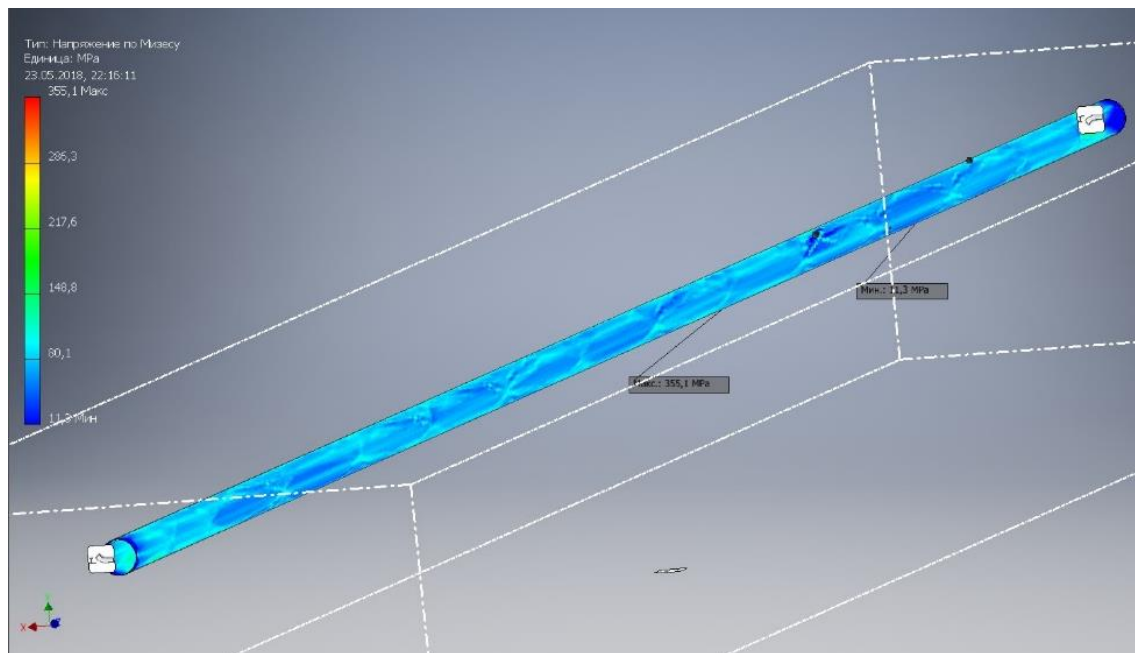


Рис. 3. Эпюра напряженно-деформированного состояния участка трубопровода
Fig. 3. Diagram of the stress-strain state of the pipeline

числа условий еще на стадии проектирования. В данной работе предлагается методика исследования проблемного участка магистрального трубопровода на основании цифровой модели трубопровода в программном комплексе Autodesk Inventor, максимально приближенной к реальным условиям эксплуатации. Приближение к реальным условиям эксплуатации подразумевает учет в цифровой модели не только различного рода нагрузок на трубопровод, его геометрических параметров, рельефа местности, но и дефектов, возникших в трубопроводе в процессе его эксплуатации. К таким дефектам относятся в основном

коррозионные дефекты типа «вмятина», «потеря металла» и т.д. Данные о величине и количестве дефектов, полученные на основании внутритрубной диагностики (ВТД), определили области расположения и размеры коррозионных дефектов в цифровой модели. Особенностью полученной цифровой модели является ее параметризация, она может быть обновлена в случае изменения любых параметров, в том числе и граничных условий. Результаты, полученные в ходе численного эксперимента, могут быть использованы для усовершенствования мер по снижению аварийности магистральных нефтепроводов [3-9].

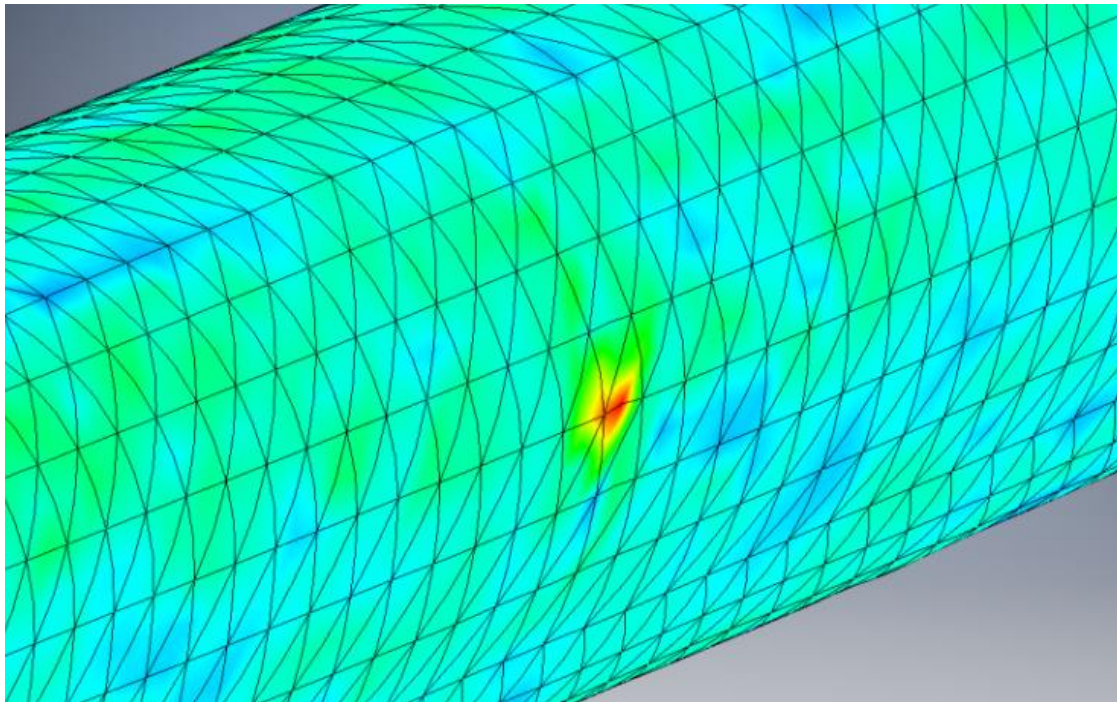


Рис. 4. Эпюра локального максимального напряжения в районе дефекта
Fig. 4. Diagram of local maximum stress in the defect area

Цель работы (The main aim of the study).

Целью данной работы является изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) участка трубопровода с целью определения коэффициента запаса прочности с учетом дефектов трубопровода в цифровой модели.

Методы исследования (The methods used in the study)

В качестве объекта исследования использовался трубопровод диаметром 1240 мм, толщина стенки трубы – 10 мм, длина участка прокладки – 16,8 км, давление в трубопроводе – 9,0 МПа. В работе использованы следующие методы науки: эмпирические – численный эксперимент, метод конечных элементов, и теоретические – сравнение, анализ. Цифровое моделирование трубопровода и расчет его напряженно-деформированного состояния выполнялись с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа Autodesk Inventor.

Эксперимент (The experiment):

Цифровая параметрическая модель трубопровода строилась совместно с моделью участка его прокладки в масштабе 1:1 (рисунок 1). Для построения траектории было использовано сплайн-интерполирование точек – значений высот участка прокладки, результатом которого стала непрерывная траектория трубопровода, после чего в модель были добавлены трубопровод и грунт.

Для увеличения степени приближения модели к реальным условиям эксплуатации использовались данные ВТД, которые были внесены в цифровую модель. В таблице 1 представлена выдержка из протокола ВТД участка

трубопровода на расстоянии 159 м от начала.

Из таблицы 1 видно, что на участке 159,6-160,8 м присутствует ряд внутренних типовых дефектов различного происхождения, размеров и расположения. Для интеграции дефектов в цифровую модель используем изогнутые элементы сети и назначаем граничные условия (рис. 2).

Кроме давления внутри трубопровода, цифровая модель позволяет учитывать силу давления на грунт от веса трубопровода и транспортируемого вещества, а заданные свойства грунта участка прокладки позволяют симулировать его смещение при проседании от воздействия силы давления. В данном случае после проведения численного эксперимента были получены эпюры НДС трубопровода, которые показывают, что на рассматриваемом участке (159 м) и его окрестностях сила веса трубопровода не оказывает существенного влияния на его НДС (рис. 3).

Средняя величина эквивалентных напряжений по Мизесу, согласно результатам численного эксперимента, составляет от 80,1 до 148,8 МПа (рис. 3). Максимальные эквивалентные напряжения проявляются на эпюрах напряженно-деформированного состояния в местах расположения дефектов (рис. 4).

Результаты эксперимента (The results of the experiment):

Значения, полученные в результате численного эксперимента, представлены в таблице 2.

Таблица. 2. Результаты численного эксперимента
Table. 2. Results of numerical experiment

Значение параметра Relevance	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа	Эквивалентные деформации, 10^4 м/м
0	187,9	9,3949
40	187,01	9,3504
60	187,009	9,3499
80	187,008	9,3496
100	187,008	9,3495

Согласно полученным результатам, при величине конечных элементов установленной программой по умолчанию (параметр Relevance равен 0) величина максимальных эквивалентных напряжений достигает $1,879 \cdot 10^8$ Па, а величина максимальных эквивалентных деформаций достигает $9,3949 \cdot 10^4$ м/м на локальных участках внутренней поверхности участка трубопровода. При изменении относительной плотности сетки конечных элементов (при изменении параметра Relevance в пределах от 40 до 100) величина максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в зоне кольцевого дефекта изменяется от $1,8701 \cdot 10^8$ Па до $1,87008 \cdot 10^8$ Па, а величина максимальных эквивалентных деформаций изменяется от $9,3504 \cdot 10^4$ м/м до $9,3495 \cdot 10^4$ м/м. Величина погрешности результатов моделирования при изменении размеров сетки конечных элементов (т.е. при изменении параметра Relevance) не превышает 0,5%, что говорит о незначительности влияния данного параметра на точность расчетов. Сравнивая полученные значения напряжений с кольцевыми напряжением, полученным аналитическим путем (1), можно сделать вывод о сопоставимости этих значений. Учитывая, что предел текучести материала исследуемого участка трубопровода равен 340 МПа, коэффициент запаса прочности составит 1,9, что является допустимым значением для

трубопроводов данного типа.

Заключение (The conclusion):

В результате численного эксперимента с использованием программной среды ANSYS получены эпюры эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных деформаций в участке трубопровода диаметром 820 мм из стали марки 09Г2С с кольцевым дефектом, нагруженного внутренним давлением 5,4 МПа, и внешним воздействием грунта с удельным весом $17,5 \text{ кН/м}^3$. Сравнительный анализ эпюр показал, что локализация максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных перемещений определяется в месте кольцевого дефекта с увеличением параметра Relevance свыше 40 единиц, однако увеличение данного параметра существенно не повышает точность результатов численного эксперимента.

Величина внутренних кольцевых напряжений, полученных аналитическим путем, составила 179,1 МПа. Величина эквивалентных напряжений, полученных экспериментальным путем, составила 187 МПа. Исходя из полученного распределения напряжений по Мизесу, которое способно дать информацию о возможности разрушения данной трубы, можно сделать вывод, что труба выдержит заданные нагрузки, а коэффициент запаса прочности составит 1,9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trifonov O.V., Cherniy V.P. Analytical model versus numerical model in stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements //III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Corfu, Greece, May. – 2011. – С. 26-28.
2. Завойчинская, Э.Б. Усталостное масштабнo-структурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения : дис. ... д-р техн. наук – МАИ, Москва, 2018.
3. Рудаченко А.В. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов / Рудаченко А.В., Саруев А.Л. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 136 с.

4. Моделирование трубопроводов с помощью ANSYS – Обзор возможностей [Электронный ресурс] <https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/299-modelirovanie-truboprovodov-s-pomoshchyu-ansys-obzor-vozmozhnostej.html>. (дата обращения: 10.10.2019).
5. Trifonov O.V., Cherniy V.P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2012. – Т. 33. – №. 1. – С. 54-62.
6. Бурков П.В., Буркова С.П., Тимофеев В.Ю., Ащеулова А.А., Ключ О.В. Анализ напряженно-деформированного трубопровода в условиях вечной мерзлоты // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2013. – №. 6 (100). – С. 76-79.
7. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов / Быков Л.И. Мустафин Ф.М., Рафиков С.К., Нечваль А.М., Лаврентьев А. Е. – С.-Петербург : Недра, 2006. – 243 с.
8. Bi K., Hao H. Numerical simulation on the effectiveness of using viscoelastic materials to mitigate seismic induced vibrations of above-ground pipelines // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 123. P. 1-14.
9. ГОСТ Р 52079-2003. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктов. Технические условия. М., 2003. II, 28 с.
10. СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы / Миннефтегазстрой Российской Федерации. – Введ. 1986. – М., 1985. – 60 с.
11. Акимов М.Ю., Вельмисов П.А., Милушева С.Д. О динамических и статических деформациях трубопровода // *Proceedings of the XXII Summer School "Application of Mathematics in Engineering"*. Technical University of Sofia. Bulgaria, Sozopl. – 1996.
12. Bi K., Hao H. Numerical simulation on the effectiveness of using viscoelastic materials to mitigate seismic induced vibrations of above-ground pipelines // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 123. P. 1-14.
13. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / Бряука В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. – Самара: Самар. гос. техн. университет, 2010. – 271 с.

REFERENCES

1. Trifonov O. V., Cherniy V. P. Analytical model versus numerical model in stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements // *III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece. 2011. P. 26-28.
2. Zavoychinskaya, E. B. *Ustalostnoye masshtabno-strukturnoye razrusheniye i dolgovechnost' konstruktsiy pri proporsional'nykh protsessakh nagruzheniya* [Fatigue scale-structural failure and durability of structures under proportional loading processes]. Moscow, Publishing of the Moscow Aviation Institute, 2018. 303 P.
3. Rudachenko A. V., Saruyev A. L. *Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovodov* [Studies of stress-strain state of pipelines]. Tomsk, Publishing of the Tomsk Polytechnic University, 2011. 136 P.
4. [Ansys.soften.com.ua \[Modelirovaniye truboprovodov s pomoshch'yu ANSYS\] URL: https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/299-modelirovanie-truboprovodov-s-pomoshchyu-ansys-obzor-vozmozhnostej.html](https://www.ansys.soften.com.ua/about-ansys/blog/299-modelirovanie-truboprovodov-s-pomoshchyu-ansys-obzor-vozmozhnostej.html). (accessed: 10.10.2019).
5. Trifonov O. V., Cherniy V. P. Elastoplastic stress-strain analysis of buried steel pipelines subjected to fault displacements with account for service loads // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2012. No. 33. P. 54-62.
6. Burkov P.V., Burkova S.P., Timofeyev V.YU., Ashcheulova A.A., Klyus O.V. *Analiz napryazhenno-deformirovannogo truboprovoda v usloviyakh vechnoy merzloty* [Analysis of stress-strain pipeline in permafrost]. *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. 2013. No. 6 (100). P. 76-79.
7. *Tipovyye raschety pri sooruzhenii i remonte gazonefteprovodov* [Typical calculations for the construction and repair of gas and oil pipelines]. S.-Peterburg, Publishing Nedra, 2006. 243 P.
8. Bi K., Hao H. Numerical simulation on the effectiveness of using viscoelastic materials to mitigate seismic induced vibrations of above-ground pipelines // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 123. P. 1-14.

9. GOST R 52079-2003. Truby stal'nyye svarnyye dlya magistral'nykh gazoprovodov, nefteprovodov i neftepro-duktoy. Tekhnicheskiye usloviya. [Welded steel pipes for gas pipelines, oil pipelines and petroleum products. Technical conditions]. Moscow, 2003. 28 P.
10. SNiP 2.05.06-85*. Magistral'nyye truboprovody [Trunk pipelines]. Moscow, Minneftegazstroy of the Russian Federation, 1985. 60 P.
11. Akimov M.Yu., Vel'misov P.A., Milusheva S.D. O dinamicheskikh i staticheskikh deformatsiyah truboprovoda // Proceedings of the XXII Summer School "Application of Mathematics in Engineering". Technical University of Sofia. Bulgaria, Sozopl. – 1996.
12. Bi K., Hao H. Using pipe-in-pipe systems for subsea pipeline vibration control // Engineering Structures. 2016. Vol. 109. P. 75-84.
13. Bruyaka V. A., Fokin V. G., Soldusova Ye. A., Glazunova N. A., Adeyanov I. Ye. Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench [Engineering analysis in ANSYS Workbench]. Samara, Publishing of the Samara state technical University, 2010. 271 P.

Поступило в редакцию 10.01.2021

Received 10 January 2021