

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-84-92

УДК 622.691.4:053:533.6(252.6)

**ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБО-
ПРОВОДА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСНОЙ
НАГРУЗКИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ AUTODESK INVENTOR**

**THE STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF A COMPLEX FORM PIPELINE EX-
POSED TO THE ACTION OF A COMPLEX LOAD BY THE FINITE ELEMENT
METHOD USING AUTODESK INVENTOR SOFTWARE PROGRAMME**

Бурков Петр Владимирович^{1,2},

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

Petr V. Burkov^{1,2}, Dr.Sc, Professor

Бурков Владимир Петрович¹, ассистент, e-mail: vpbl@tpu.ru

Vladimir P. Burkov¹, Assistant

Дедеев Павел Олегович¹, магистрант, e-mail: burkovpv@mail.ru

Pavel O. Dedeev¹, Master's student

Тимофеев Вадим Юрьевич¹, кандидат технических наук, доцент, e-mail: tv-ytitpu@mail.ru

Vadim Yu. Timofeev¹, Ph.D, Associate Professor

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, ул. Ленина, 30

¹National Research Tomsk Polytechnic University, 30 street Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2

²Tomsk State University of Architecture and Engineering, 2 Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation

Аннотация: Во время технической эксплуатации трубопроводов возможны случайные комбинации внешних воздействий, которые могут привести к возникновению вибраций в технических системах газопроводов сложной формы. Это имеет особенно важное значение на нефтегазовых предприятиях, так как вибрации ведут к нагреву легковоспламеняющихся жидкостей или к возможности воспламенения газовых смесей. В настоящей статье описан численный эксперимент моделирующий поведение фитинга газоперекачивающей установки, при воздействии силы тяжести, ветровой нагрузки, момента сил от ветровой нагрузки, а также воздействию внутреннего давления перекачиваемого газа. Описанный численный эксперимент проведен с помощью программного обеспечения AUTODESK INVENTOR, в котором методом конечных элементов были определены суммарные эквивалентные перемещения от внешних воздействий и модальная частота трубопровода – собственная частота колебаний данной системы. При проведении численного эксперимента граничные условия предполагали фиксацию свободных краев трубопровода, что соответствует реальным условиям эксплуатации газопровода. Результаты моделирования дают основание сделать предположение, что при полученном значении собственной частоты колебаний системы в данном газопроводе не возникнут резонансные эффекты, а также что заданное значение момента сил настолько велико, что может привести к деформации трубопровода.

Ключевые слова: газопровод, ветровая нагрузка, весовая нагрузка, метод конечных элементов, AUTODESK INVENTOR, численный эксперимент, частота собственных колебаний, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные перемещения.

Исследуемый газопровод



Fig. 1. The studied section of the gas pipeline: a) general view; b) node diagram

Abstract: During the technical operation of pipelines, there may be accidental combinations of external influences that can lead to vibrations in technical systems. This is particularly important in oil and gas industries, as vibrations lead to heating of flammable liquids or to the possibility of ignition of gas mixtures. This article describes a numerical experiment that simulates the behavior of the fitting of the gas pumping unit subjected to the action of gravity, wind load, moment of force from the wind load as well as to the internal pressure of the pumped gas. The numerical experiment was conducted with the help of AUTODESK INVENTOR software, where the equivalent displacements from external influences and the modal frequency of the pipeline – the eigen frequency of the system were defined by the finite element method. During the numerical experiment, the boundary conditions assumed the fixation of the free edges of the pipeline, they were fixed from moving in the axial and radial directions. The simulation results suggest that with the obtained eigen frequency of the system oscillations in the given gas pipeline, no resonance effects will arise, and that the specified value of the moment of forces is so high that it can lead to pipeline deformation.

Key words: gas pipeline, wind load, weight load, finite element method, AUTODESK INVENTOR, numerical experiment, eigen frequency of the system, stress-strain state, equivalent displacements.

Актуальность работы (The urgency of the discussed issue):

Интенсивность отказов в газопроводном транспорте из-за вибрационных эффектов довольно высока [1, 2], также причиной большинства нештатных являются именно резонансные колебания газопроводных систем [3-7]. Основными причинами возникновения вибраций являются действия вращающихся частей машин и механизмов, случайные воздействия ветра и сейсмической активности, пульсирующие потоки двухфазных жидкостей и т.п. [1-4]. В настоящее время задача определения нагрузочной способности газопрово-

да при воздействии комплексной нагрузки (силовых воздействий, воздействий высокочастотных колебаний и т.д.) является актуальной научно-практической задачей.

На сегодняшний день в газовой промышленности отсутствует отраслевой документ нормирующий величину вибрации и частоты собственных колебаний (ЧСК) технологических трубопроводных обвязок (ТПО) поршневых компрессоров (ПК). Основным источником вибрации газопроводов, является пульсирующий поток транспортируемого газа [8]. При бездефектном состоянии ПК и их ТПО, включая конфигурацию трубопроводов и

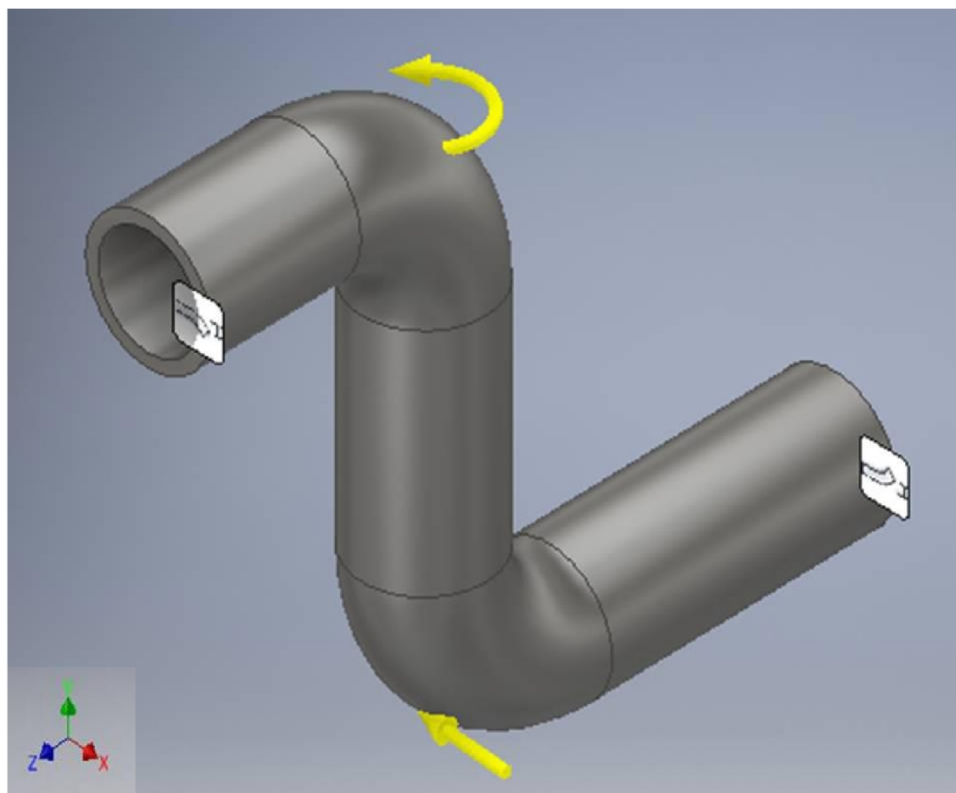


Рис. 2. Твёрдотельная модель исследуемого фитинга газопровода с приложенными силами и заданными ограничениями

Fig. 2. A solid model of the studied fitting of the pipeline with the applied forces and the predetermined limits

Таблица. 1. Основные параметры исследуемого фитинга газопровода
 Table. 1. Main parameters of the studied gas pipeline fitting

Параметр	Единицы измерения	Значение
Материал трубы	-	09Г2С
Модуль упругости материала трубы	МПа	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	-	0,3
Коэффициент линейного расширения	-	1
Предел текучести (при температуре 20 °С)	МПа	300
Предел текучести (при температуре 300 °С)	МПа	220
Допускаемое напряжение при расчете эквивалентных напряжений (при температуре 20 °С)	МПа	227,5
Допускаемое напряжение при расчете эквивалентных напряжений (при температуре 300 °С)	МПа	166,8
Диаметр трубы	мм	159
Тип трубы	-	бесшовная
Толщина стенки трубы	мм	10
Прибавка на коррозию к толщине стенки трубы	мм	1
Расчётная температура	°С	176,5
Давление испытания	МПа	15,5
Масса (вес) погонного метра трубы	кг (Н)	36,6 (358,9)
Масса (вес) погонного метра изоляции	кг (Н)	21,24 (208,3)
Коэффициент прочности сварного соединения на изгиб	-	0,9
Коэффициент релаксации	-	0
Коэффициент усреднения	-	0

техническое состояние опор, низкочастотная пульсация газа и, следовательно, вибрация труб малы, т.к. мала энергия низкочастотных колебаний генерируемых компрессором. Почти вся колебательная энергия, генерируемая ПК, сосредоточена в области так называемых «лопаточных» частот вибраций [8].

Цель работы (The main aim of the study):

Целью данной работы является проведение численного эксперимента для изучения напряженно-деформированного состояния участка газопровода сложной формы при воздействии комплексной нагрузки, а также определения его ЧСК методом конечных элементов (МКЭ).

Методы исследования и эксперимент (The methods used in the study and the experiment):

Для проведения численного эксперимента использовалось специализированное программное обеспечение – AUTODESK INVENTOR. Выбор данного программного обеспечения обусловлен его широкими возможностями по проведению структурного частотного (модального) анализа моделей с целью определения ЧСК моделей объектов [9, 10].

Объектом исследования является участок газопровода на газоперекачивающем агрегате (ГПА), включающем в себя набор фитинговых соединений и труб сложной формы и служащий

для подачи газа в регулятор давления. На рисунке 1 показан фактический участок газопровода, взятый в качестве объекта численного эксперимента (рисунок 1а), и узловая схема участка, на котором исследуемый объект расположен (рисунок 1б).

Для проведения численного эксперимента была создана твердотельная модель исследуемого фитинга газопровода, как наиболее нагруженного и ответственного элемента. К данной модели были приложены силы, соответствующие нагрузке, и заданы граничные условия, соответствующие опорам газопровода (рисунок 2).

Согласно схеме участок исследуемый фитинг газопровода лежит на скользящей опоре коэффициент трения в которой составляет 0,3 [11]. Основные параметры исследуемого газопровода представлены в таблице 1 [12, 13].

Одним из этапов численного эксперимента по изучению напряженно-деформированного состояния фитинга трубопровода является создание сетки конечных элементов на твердотельной модели (рисунок 3) [14]. Параметры сетки конечных элементов представлены в таблице 2.

Величина сил и крутящих моментов, полученных от действия ветровой нагрузки [15], а также их векторные составляющие, приложенные к численной модели фитинга, представлена в таблице 3.

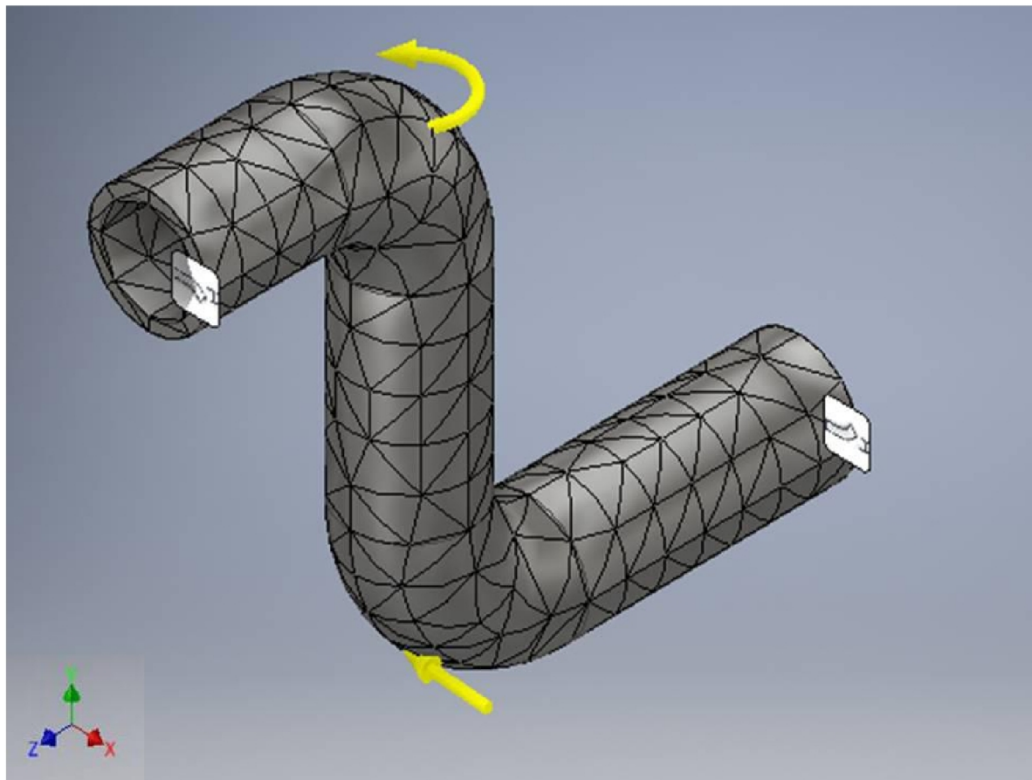


Рис. 3. Твёрдотельная модель исследуемого фитинга газопровода с сеткой конечных элементов
 Fig. 3. A solid model of the studied pipeline fitting with the applied forces and the finite element mesh

Таблица. 2. Основные параметры сетки конечных элементов модели
 Table. 2. Main parameters of the finite element mesh of the model

Параметр	Единицы измерения	Величина
Средний размер элемента (дробное значение от диаметра модели)	-	0,8
Минимальный размер элемента (дробное значение от среднего размера)	-	0,2
Коэффициент разнородности	-	1,5
Максимальный угол поворота	градусы	60
Наличие изогнутых элементов сетки	-	да

Таблица. 3. Величина сил и крутящих моментов приложенных к модели фитинга
 Table. 3. The value of the forces and torques applied to the fitting model

	Величина	Векторные составляющие сил и крутящих моментов		
		ось X	ось Y	ось Z
Крутящий момент, Н·мм	100	0	100	0
Силовая нагрузка от ветрового воздействия, Н	1000	-998.544	52.191	-13.665
Сила тяжести фитинга, Н	9810	0	-9810	0

После создания модели, приложения сил и задания граничных условий был проведен ряд численных экспериментов, в результате которых были получены: ЧСК фитинга газопровода; эпюры эквивалентных напряжений и перемещений.

Результаты (The results):

В ходе проведения численных экспериментов

был получен ряд графических эпюр эквивалентных перемещений элементов газопровода. На рисунке 4 показана характерная эпюра с максимальными, из полученных в результате численных экспериментов, эквивалентными перемещениями. Эпюра показывает направление эквивалентных перемещений и условное положение элементов газопровода при максимальной комплексной нагрузке, а также величину эквивалентных пере-

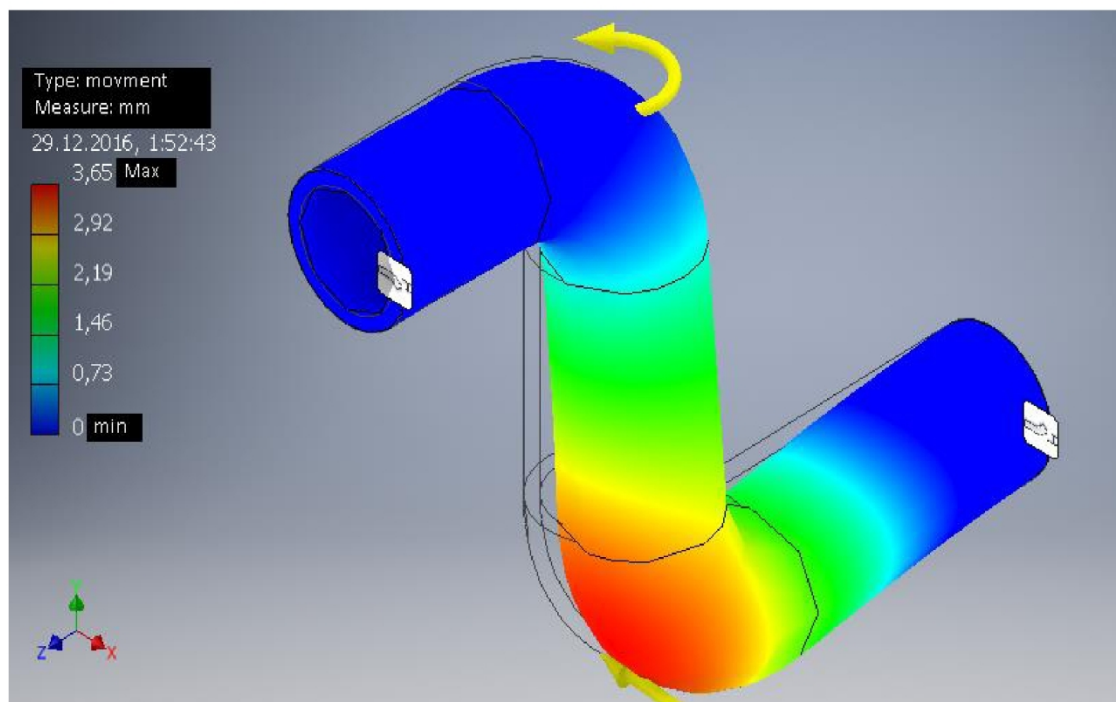


Рис. 4. Эпюра эквивалентных перемещений в численной модели фитинга
 Fig. 4. Diagram of equivalent displacements in the numeric model of fitting

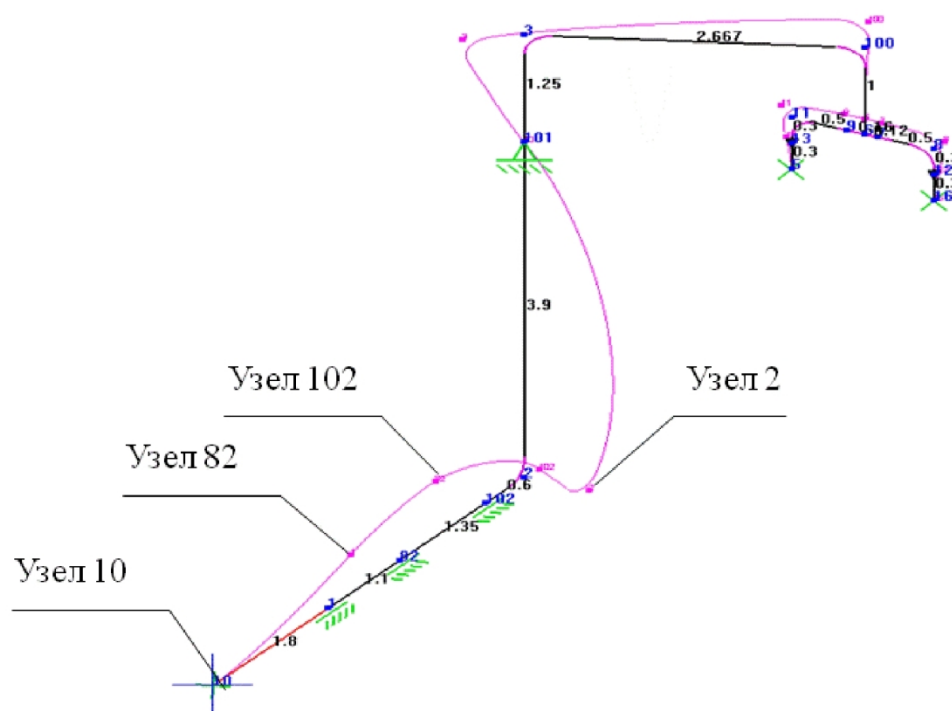


Рис. 5. Схема смещения оси газопровода в узлах под действием комплексной нагрузки
 Fig. 5. Scheme of displacement of the gas pipeline axis in the nodes under the action of the integrated load

мещений градиентной расцветкой.

Из результатов численного эксперимента видно, что при воздействии комплексной нагрузки на фитинг имеет место деформация, направление которой совпадает с направлением приложенной силы, и в максимуме достигает значения в 3,65 мм

(рисунок 4).

Возможности программного обеспечения AUTODESK INVENTOR позволяет определить величину отклонения оси газопровода от проектного положения при воздействии приложенных комплексных нагрузок. На рисунке 5 показана

Таблица 4. Эквивалентные напряжения в модели фитинга.
Table 4. Equivalent stresses in the fitting model.

Участок газопровода	Эквивалентные напряжения от весовой нагрузки, МПа		Эквивалентные напряжения от комплексной нагрузки, МПа	
	расчетное	допустимое	расчетное	допустимое
Узел 10	63,99	166,8	73,99	227,5
Узел 82	63,96		141,60	
Узел 102	64,13		250,10	
Узел 2	63,92		71,98	

схема смещений оси газопровода в его узлах под действием комплексной нагрузки.

Из рисунка 5 видно, что наибольшее перемещение в узле №102 в рабочем состоянии составляет –10,4 мм по оси X, и +0,2 мм по оси Y. Смещение оси в пространстве – разнонаправленное.

В ходе проведения численных экспериментов также был получен ряд эпюр эквивалентных напряжений по критерию Мизеса. Результаты обработки полученных результатов представлены в таблице 4.

Вычисленное с помощью модального анализа в AUTODESK INVENTOR значение ЧСК газопровода в рабочем режиме под воздействием комплексной нагрузки составляет 6951,12 Гц.

Выводы (Conclusion):

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы: воздействие комплексных нагрузок на фитинг газопровода в рабочем режиме приводит к его деформации (что подтверждается эквивалентными перемещениями) величина которых не превышает 3,65 мм, что составляет менее 3% от диаметра фитинга. Соответственно, комплексная нагрузка не является лимитирующим фактором по данному критерию. Отклонение оси газопровода в рабочем режиме при воздействии комплексной нагрузки составило до 10,4 мм и пространственно носит разнонаправленный характер, что увеличивает вероятность преждевременного выхода газопровода из строя. Анализ напряженно-деформированного состояния газопровода показал, что в узле 102 (см. таблицу 4) эквивалентные напряжения превышают допустимые более чем на 10%, что говорит о критиче-

ской величине заданной комплексной нагрузки. Полученное значение ЧСК газопровода в рабочем режиме под воздействием комплексной нагрузки (составляющее порядка 7000 Гц) можно принимать в качестве предельного значения при проектировании аналогичных газопроводных систем, что позволит не допустить резонансное разрушение фитинга.

Следует отметить, что возможность проведения модального анализа в AUTODESK INVENTOR позволяющая вычислять собственную частоту колебаний технической системы – крайне полезная функция, позволяющая уже на этапе проектирования оценивать надежность разрабатываемой системы. В общем, применение данного программного обеспечения позволило наметить направления технических решений по устранению выявленных недостатков, а также получить критерии для создания оптимальных вариантов конструкций. На взгляд авторов, наиболее перспективными направлениями совершенствования конструкции рассматриваемой участка газопровода будут меры по устранению вибрации и увода оси трубопровода, а именно: монтаж дополнительных устройств снижающих вибрацию трубопроводов (гасители пульсации, компенсаторы, гибкие вставки и т.п.); изменение геометрии ТПО с целью оптимизации газодинамического режима; исключение из схемы отводов с углом сочленения в 90°; а также комбинация указанных вариантов. В дальнейшем полученные варианты новых технических решений будут проанализированы в AUTODESK INVENTOR, что в конечном итоге, существенно сократит время проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bi K., Hao H. Using pipe-in-pipe systems for subsea pipeline vibration control // Engineering Structures. 2016. Vol. 109. P. 75–84.
2. 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.
3. Norton J. D., Tonkins W., Flanders B. Alyeska remedies TAPS'pipeline vibrations at Thompson Pass // Oil and Gas Journal. 1998. Vol. 96. No 22. P. 58–64.
4. Li, C., Hao, H., Li, H., Bi, K. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at sea-floor // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. Vol. 77. P. 220–225.
5. 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.

6. 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.

7. Соколинский Л.И. Оценка вибрационного состояния технологических трубопроводов поршневых компрессоров // Газовая промышленность. – 2015. – №. 3. – С. 98-100.

8. Гамера, Ю.В., Бурутин, О.В., Овчаров, С.В., Петрова, Ю.Ю., Ягупова, Л.В. Логико-вероятностный метод прогнозирования ожидаемой частоты аварий на проектируемых компрессорных станциях магистральных газопроводов // Вести газовой науки. – 2017. – №. 1 (29).

9. Autodesk Knowledge Network [Электронный ресурс]. URL: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/RUS/Inventor/files/GUID-ADEAAB90-A0B9-4663-A066-2C124827DB8D-htm.html> (дата обращения: 06.07.2018).

10. Бурков П.В., Буркова С.П., Тимофеев В.Ю., Ащеулова А.А., Брюханов Б.Д. Определение и анализ напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара от влияния ветровой нагрузки методом конечных элементов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – №. 6 (100). – С. 136-138.

11. Pozhproekt.ru [Электронный ресурс]. URL: http://pozhproukt.ru/nsis/Snip/Pril/2-04-07-86_08pr.htm (дата обращения: 12.07.2018).

12. Metallicheckiy-portal.ru [Электронный ресурс]. URL: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/09G2S (дата обращения: 07.08.2018).

13. ГОСТ Р 52079-2003. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктов. Технические условия. М., 2003. II, 28 с.

14. Концевич В.Г. Твердотельное моделирование машиностроительных изделий в Autodesk Inventor. – М.: Litres, 2017. – 67 с.

15. СП 33.13330.2012 Расчет на прочность стальных трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 2.04.12-86 (с Изменением N 1) / Министерство регионального развития Российской Федерации. – Введ. 2012. – М., 2012. – 28 с.

REFERENCES

1. Bi K., Hao H. Using pipe-in-pipe systems for subsea pipeline vibration control // Engineering Structures. 2016. Vol. 109. P. 75–84.

2. 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.

3. Norton J. D., Tonkins W., Flanders B. Alyeska remedies TAPS'pipeline vibrations at Thompson Pass // Oil and Gas Journal. 1998. Vol. 96. No 22. P. 58–64.

4. Norton J. D., Tonkins W., Flanders B. Alyeska remedies TAPS'pipeline vibrations at Thompson Pass // Oil and Gas Journal. 1998. Vol. 96. No 22. P. 58–64.

5. 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.

6. 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.

7. Sokolinskij L.I. Ocenka vibracionnogo sostoyaniya tekhnologicheskikh truboprovodov porshnevnykh kompressorov [Evaluation of the vibration state of technological pipelines of piston compressors]. Gazovaya promyshlennost' [Gas industry]. 2015. No. 3. P. 98-100.

8. Gamera, Yu.V., Burutin, O.V., Ovcharov, S.V., Petrova, Yu.Yu., Yugupova, L.V. Logiko-veroyatnostnyj metod prognozirovaniya ozhidaemoj chastoty avarij na proektiruemykh kompressornykh stanciyah magistral'nykh gazoprovodov [Logical-probabilistic method of predicting the expected frequency of accidents at the projected compressor stations of main gas pipelines.]. Vesti gazovoj nauki [News of gas science]. 2017. No 1 (29).

9. Autodesk Knowledge Network [Modal'nyj analiz i analiz napryazhenij detali]. URL: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/inventor-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/RUS/Inventor/files/GUID-ADEAAB90-A0B9-4663-A066-2C124827DB8D-htm.html> (accessed: 06.07.2018).

10. Burkov P.V., Burkova S.P., Timofeev V.YU., Ashcheulova A.A., Bryuhanov B.D. Opredelenie i analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vertikal'nogo stal'nogo rezervuara ot vliyaniya vetrovoj nagruzki metodom konechnykh ehlementov [Determination and analysis of the stress-strain state of the vertical steel tank from the influence of wind load by finite element method]. Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Kuzbass state technical University]. 2013. No. 6(100). P. 30-33.
11. Pozhproekt.ru [SNiP 2.04.07-86 (Prilozhenie 8)]. URL: http://pozhpriekt.ru/nsis/Snip/Pril/2-04-07-86_08pr.htm (accessed: 12.07.2018).
12. Metallichekiy-portal.ru [Stal' marki 09G2S]. URL: http://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/09G2S (accessed: 07.08.2018).
13. GOST R 52079-2003. Truby stal'nye svarnye dlya magistral'nyh gazoprovodov, nefteprovodov i nefteproduktov. Tekhnicheskie usloviya [Welded steel pipes for main gas pipelines, oil pipelines and oil products. Technical conditions]. Moscow, 2003. 28 P.
14. Koncevich V.G. Tverdotel'noe modelirovanie mashinostroitel'nyh izdelij v Autodesk Inventor [Solid modeling of engineering products in Autodesk Inventor]. Moscow, Litres, 2017. 671 P.
15. SP 33.13330.2012. Raschet na prochnost' stal'nyh truboprovodov. Aktua-lizirovannaya redakciya SNiP 2.04.12-86 (s Izmeneniem N 1) [Calculation of strength of steel pipelines. The updated edition of SNiP 2.04.12-86 (Change 1 N)]. Moscow, Ministry of regional development of the Russian Federation, 2012. 28 P.

Поступило в редакцию 21.08.2018

Received 21 August 2018