

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-5-5-13

УДК 622.691.4:053:533.6(252.6)

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА С КОЛЬЦЕВЫМ ДЕФЕКТОМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS

THE STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF THE PIPELINE WITH THE ANNULAR DEFECT BY FINITE ELEMENT METHOD USING ANSYS SOFTWARE

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

Вахитов Дамир Линурович¹,

магистрант, e-mail: burkovpv@mail.ru

Damir L. Vakhitov¹,

Undergraduate

Тимофеев Вадим Юрьевич¹,

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

Vadim Yu. Timofeev¹,

C. Sc. in Engineering, 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 Building, 2 Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation

Аннотация:

При монтаже стыка двух участков трубопровода, предназначенного для транспортирования углеводородов, или при воздействии на него внешних факторов есть вероятность возникновения кольцевого механического дефекта. Механический дефект подобного типа снижает нагрузочную способность трубопровода как механической конструкции, обеспечивающей взаимодействие с грунтом, что может привести к непредсказуемым и катастрофическим последствиям. В настоящей статье описан численный эксперимент, моделирующий поведение участка трубопровода с кольцевым дефектом, при воздействии нагрузки от грунта и внутреннего давления. Численный эксперимент определяет величину эквивалентных напряжений и деформаций на участке толстостенного трубопровода типового проектного решения. Также приведено сравнение результатов, полученных численным моделированием с типовым проектным расчетом в соответствии с нормативами. При проведении численного эксперимента нагрузки и граничные условия соответствуют реальным условиям эксплуатации газопровода. Также было выявлено, что важным параметром при моделировании является размер сетки конечных элементов. Результаты

моделирования дают основание предполагать, что при полученных значениях эквивалентных напряжений и деформаций участок трубопровода не подвергнется разрушению под действием заданных нагрузок.

Ключевые слова: трубопровод, метод конечных элементов, ANSYS, численный эксперимент, напряженно-деформированное состояние, эквивалентные напряжения, эквивалентные деформации.

Abstract:

When two sections of the pipeline intended for transportation of hydrocarbons are jointed, or when this joint is exposed to external factors, there is a possibility of a mechanical defect in the annular welding joints. A mechanical defect of this type reduces the load capacity of the pipeline as a mechanical structure providing interaction with the soil, which can lead to unpredictable and catastrophic consequences. This article describes a numerical experiment that simulates the operation of a pipeline section with a ring defect under the influence of soil load and internal pressure. The numerical experiment determines the value of equivalent stresses and strains in the thick-walled pipeline section of a typical design solution. The comparison of the results obtained by numerical modeling with a typical design calculation in accordance with the standards is also given. During the numerical experiment, the loads and boundary conditions correspond to the actual operating conditions of the gas pipeline. It was also found that an important parameter in the simulation is the size of the finite element grid. The simulation results give reason to assume that with obtained values of the equivalent stress and strain section of the pipeline will not be subjected to destruction under the action of given loads.

Key words: pipeline, finite element method, ANSYS, numerical simulation, stress-strain state, equivalent stress, equivalent strain.

Актуальность работы (The urgency of the discussed issue):

Обеспечение безопасной и надежной работы трубопроводного транспорта углеводородов является одной из важнейших задач, решение которой повысит экологическую безопасность, снизит риск возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций, а также снизит величину невозвратимых утечек [1]. Одним из факторов увеличивающих риск возникновения нештатных ситуаций это наличие дефектов, в том числе кольцевых. Кольцевые дефекты могут иметь разные причины возникновения и различную локализацию, а размеры таких дефектов могут колебаться от небольших локальных до кольцевой трещины [2]. Воздействие грунтовой нагрузки на участок трубопровода с кольцевым дефектом, а также интенсивные режимы эксплуатации могут привести к катастрофическим последствиям [3], поэтому одной из главных задач является предусмотреть необходимые коэффициенты запаса прочности трубопровода еще на этапе его проектирования.

В настоящее время благодаря прогрессу вычислительной техники получили развитие численные методы, позволяющие значительно повысить уровень решаемых задач за счет более полного учета реальных условий нагружения и свойств используемых материалов [1]. При решении расчетных задач наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ), а также программное обеспечение его реализующее [3]. Одним из самых известных расчетных комплексов, предназначенным для моно- и многодисциплинарных расчетов является ANSYS [4]. Данный программный комплекс давно и широко используется для проектирования объектов нефте- и газотранспортной отрасли [3-6].

Цель работы (The main aim of the study).

Целью данной работы является проведение численного эксперимента в программном комплексе ANSYS для изучения напряженно-деформированного состояния участка подземного трубопровода с кольцевым дефектом с целью определения коэффициента запаса прочности.

Методы исследования (The methods used in the study)

Поземные трубопроводы, предназначенные для транспортировки углеводородов при эксплуатации, подвергается воздействию внешних и внутренних нагрузок. Внешние нагрузки – это давление от вышележащего слоя грунта, а внутренние – это давление в трубопроводе. Давление грунта можно разделить на две составляющие. Первая составляющая вызвана весом вышележащего грунта, и она увеличивается по мере увеличения глубины заложения. Вторая составляющая – дополнительная сила, вызванная наземной нагрузкой, и она уменьшается по мере увеличения глубины заложения. Для подземного трубопровода предполагается, что распределение вертикального давления грунта обратной засыпки одинаково на любой глубине, а верхняя образующая трубопровода несет всё давление грунта [7]. Так как трубопровод представляет собой оболочку то, когда на поперечном сечении трубопровода появляется большая деформация, принцип суперпозиции не может быть использован для описания взаимодействия осевой деформации и деформации изгиба [1-3]. В этой области могут возникать остаточные напряжения и концентрации напряжений, и таким образом трудно определить реакцию трубопровода аналитическим методом [3]. В таком случае возможности метода конечных элементов и программного комплекса

Таблица. 1. Основные параметры исследуемого трубопровода
 Table. 1. The main parameters of the pipeline under study

Наружный диаметр трубопровода, D_n , мм	Толщина стенки трубы, δ , мм	Ширина дефекта, мм	Глубина дефекта, мм	Предел текучести материала трубопровода, МПа
820	12	1,5	6	340

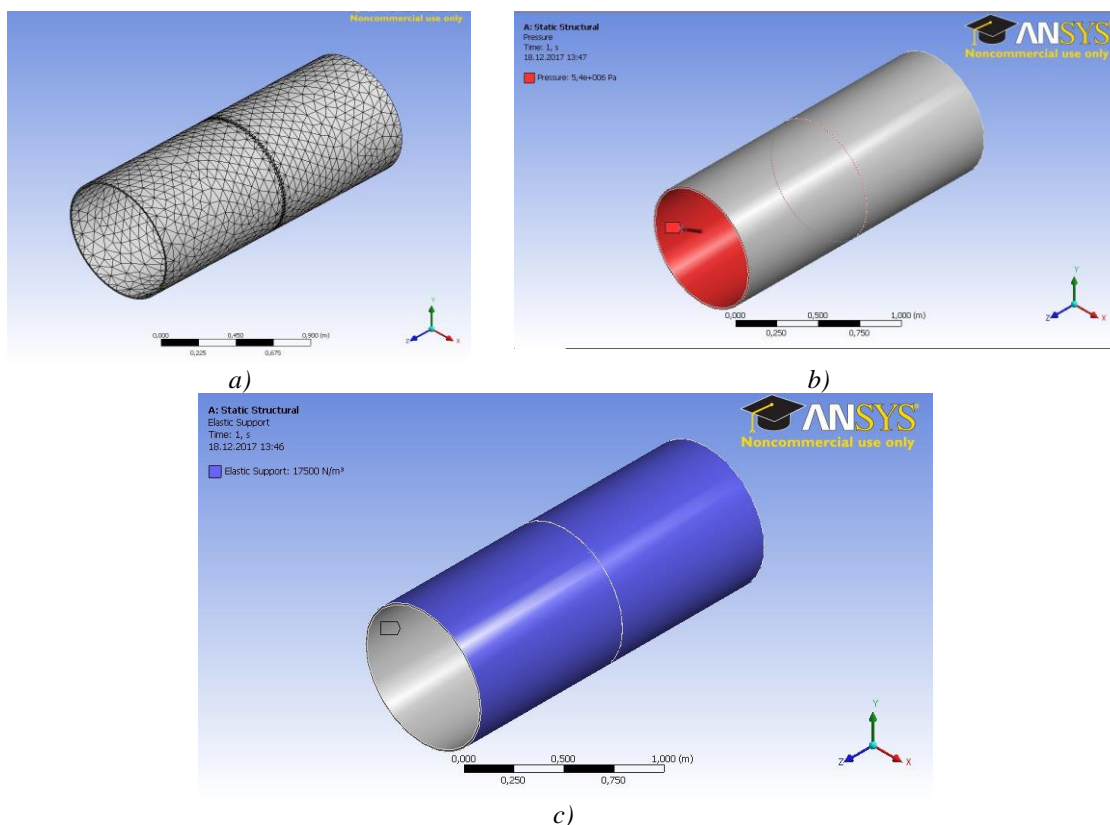


Рис. 1. Трехмерная модель участка трубопровода с кольцевым дефектом
 a) с сеткой конечных элементов (параметр Relevance 0); b) с приложенной внутренней нагрузкой;
 c) с приложенной внешней нагрузкой.

Fig. 1. Three-dimensional model of pipeline section with ring defect
 a) with finite element mesh (Relevance parameter 0); b) with applied internal load;
 c) with external load applied.

ANSYS полностью удовлетворяют для решения возникающей задачи.

Разработка численной модели взаимодействия подземного трубопровода с грунтом необходима для проведения численного эксперимента, но создание этой модели сопряжено со сложностью описания свойств грунта имеющимися в ANSYS средствами. В реальности грунт обладает большим разнообразием свойств и параметров учесть которые полностью практически невозможно и поэтому при разработке численных моделей взаимодействия необходимо будет задаться условностями и упрощениями [1, 3, 7-8].

Нелинейное материальное поведение стального трубопровода и окружающего его грунта, взаимодействие между грунтом и трубопроводом, а также изменение формы поперечного сечения

трубопровода и деформация окружающего грунта моделируются в эквивалентной нагрузке, поэтому критерии эффективности исследуемого участка трубопровода будут определены с высокой степенью точности.

Эксперимент (The experiment):

В качестве исходных данных для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния участка трубопровода используется типовое проектное решение, основанное на технических требованиях СНиП 2.05.06-85. Объектом исследования является участок трубопровода под давлением 5,4 МПа, изготовленный из стали 09Г2С. Толщина стенки трубопровода определена в соответствии со СНиП 2.05.06-85 и принята в соответствии с ГОСТ Р 52079-2003. Кольцевой дефект представляет собой поперечную трещину по

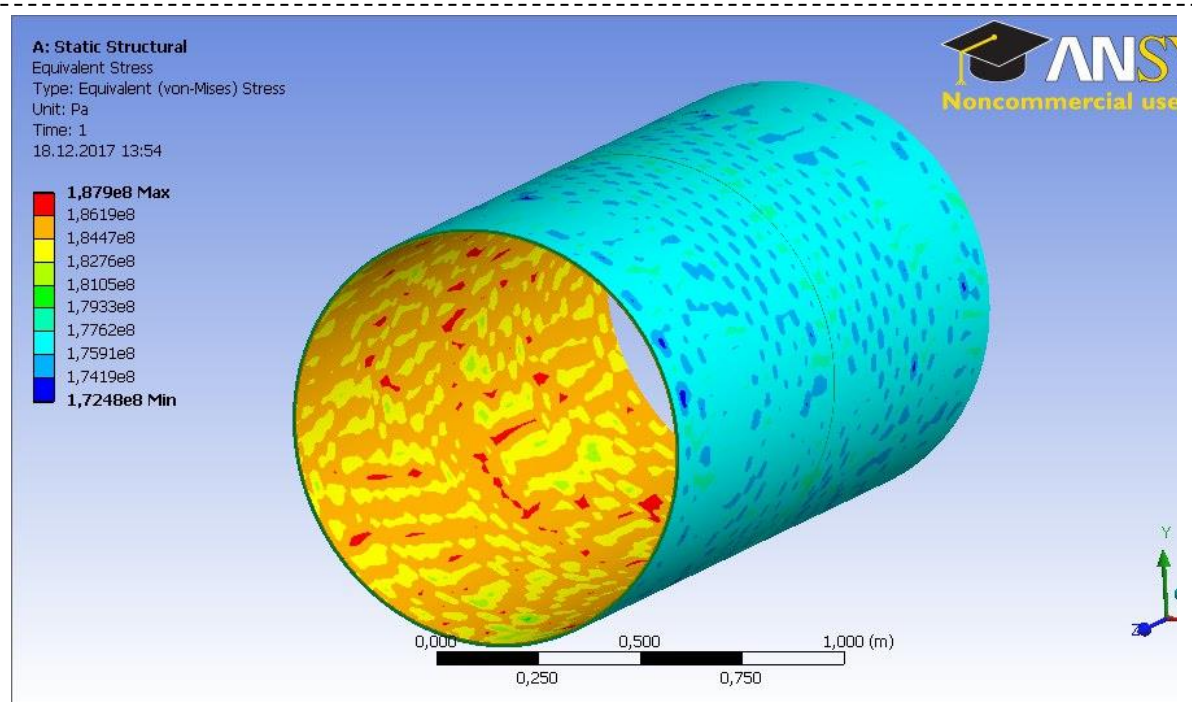


Рис. 2. Эюра эквивалентных напряжений по Мизесу.
 Fig. 2. Mises equivalent stress plot.

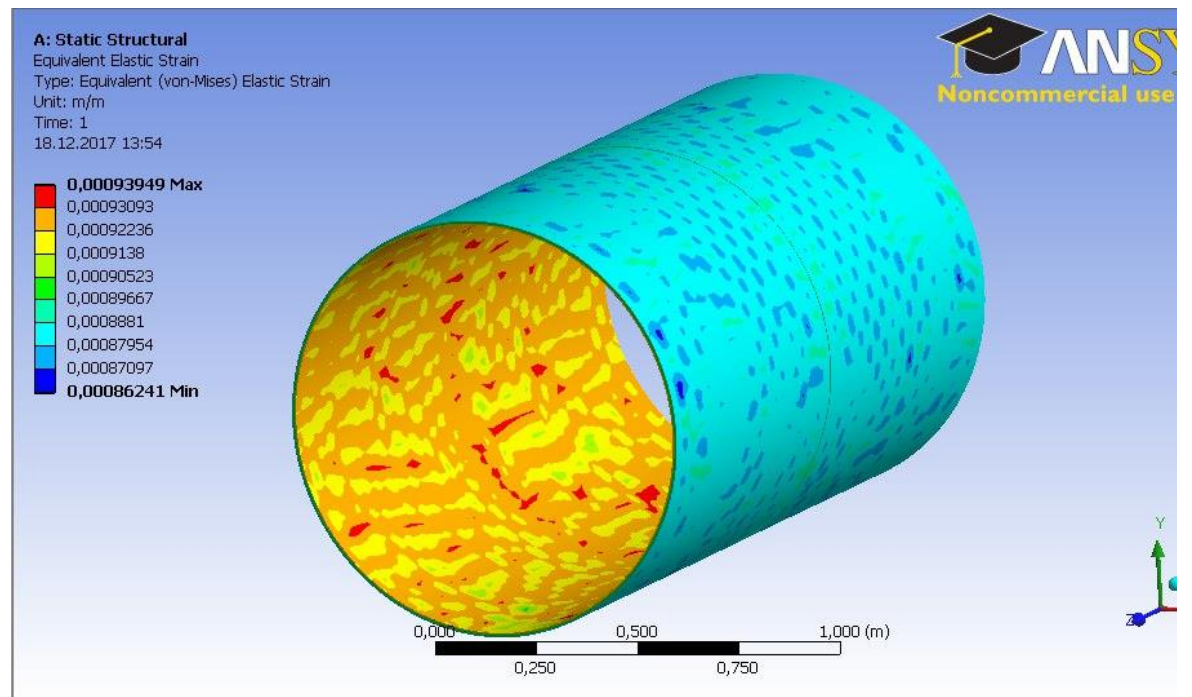


Рис. 3. Эюра эквивалентных деформаций.
 Fig. 3. Equivalent elastic strain plot.

всему периметру. В качестве грунта принимается глина с удельным весом $17,5 \text{ кН/м}^3$. Основные параметры представлены в таблице 1 [9].

Кольцевые и продольные напряжения ($\sigma_{\text{кц}}$ и $\sigma_{\text{пр}}$) в стенке трубопровода определяют его напряженно-деформированное состояние и напрямую влияют на его возможное разрушение [10]. Кроме того, кольцевые и продольные напряжения

являются важным аспектом при эксплуатации трубопроводов, т.к. они являются опасными с точки зрения увеличения коррозионного растрескивания [10]. Для экспериментальной модели величина кольцевых напряжений составит:

$$\sigma_{\text{кц}} = \frac{P \cdot (D_{\text{в}} - 2 \cdot \delta)}{2 \cdot \delta} = \frac{5,4 \cdot (820 - 2 \cdot 12)}{2 \cdot 12} = 179,1 \text{ МПа} \quad (1)$$

где P – давление в трубопроводе, МПа;

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

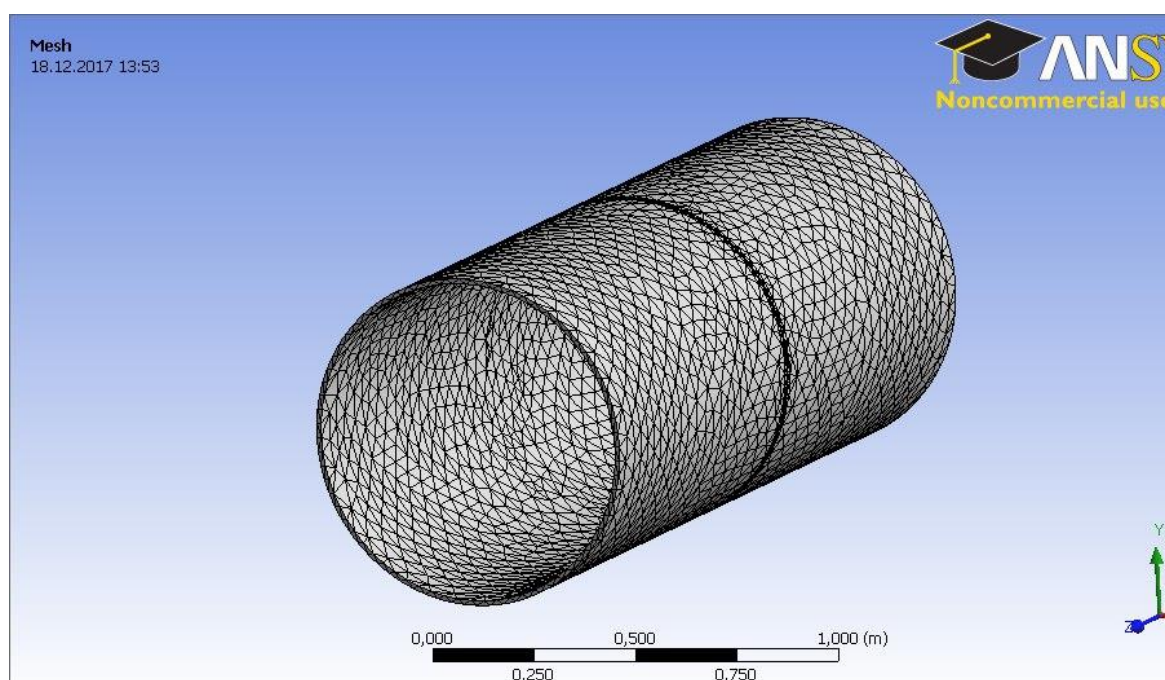


Рис. 4. Трехмерная модель участка трубопровода с кольцевым дефектом с сеткой конечных элементов (параметр Relevance 40).

Fig. 4. Three-dimensional model of a pipeline section with a ring defect with a finite element mesh (Relevance parameter 40).

D_n – наружный диаметр трубопровода, мм;
 δ – толщина стенки трубопровода, мм.

Расчетные продольные напряжения в трубопроводе, в общем случае:

$$\sigma_n = 0,5 \cdot \sigma_{ки} = 0,5 \cdot 179,1 = 89,55 \text{ Мпа} \quad (2)$$

Для численного эксперимента механическое поведение грунта представлено эластично-совершенной пластической Мор-Кулоновской конститутивной моделью, которая в свою очередь характеризуется когезией c , углом трения φ , модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν . Угол расширения принимается равным нулю, а окружающий грунт и грунт засыпки одинаковые, когезия принимается равной $c=15$ кПа, угол трения составляет

$\varphi=15^\circ$, модуль упругости $E=20$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$, а плотность $\rho=1840$ кг/м³. В модели пластичности материала стального трубопровода была использована линейная изотропная модель деформационного упрочнения [1]. При взаимодействии трубопровода и грунта деформации подземного трубопровода и окружающего грунта влияют друг на друга. Напряжение и деформация подземного трубопровода вызваны совместным действием внутреннего давления и окружающей почвы. Эффект выдавливания окружающего грунта должен воздействовать на внешнюю поверхность трубопровода. Поэтому в модели конечных элементов граница раздела между внешней поверхностью трубопровода и окружающим грунтом

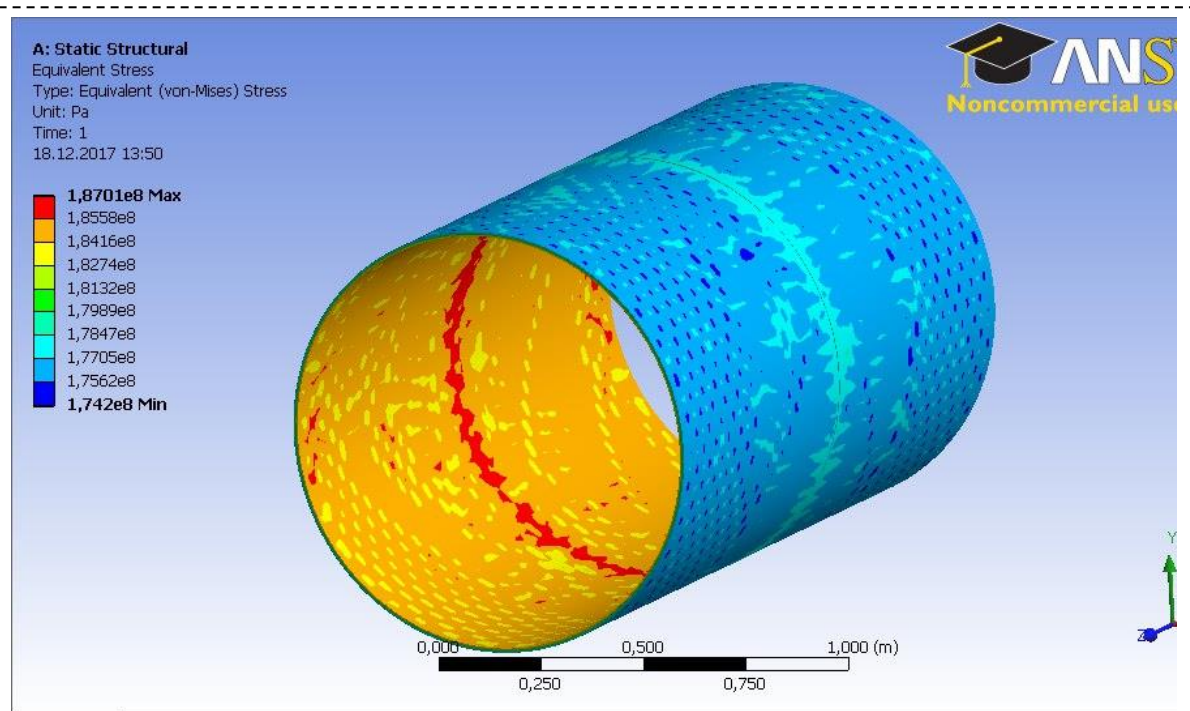


Рис. 5. Эюра эквивалентных напряжений.
Fig. 5. Mises equivalent stress plot.

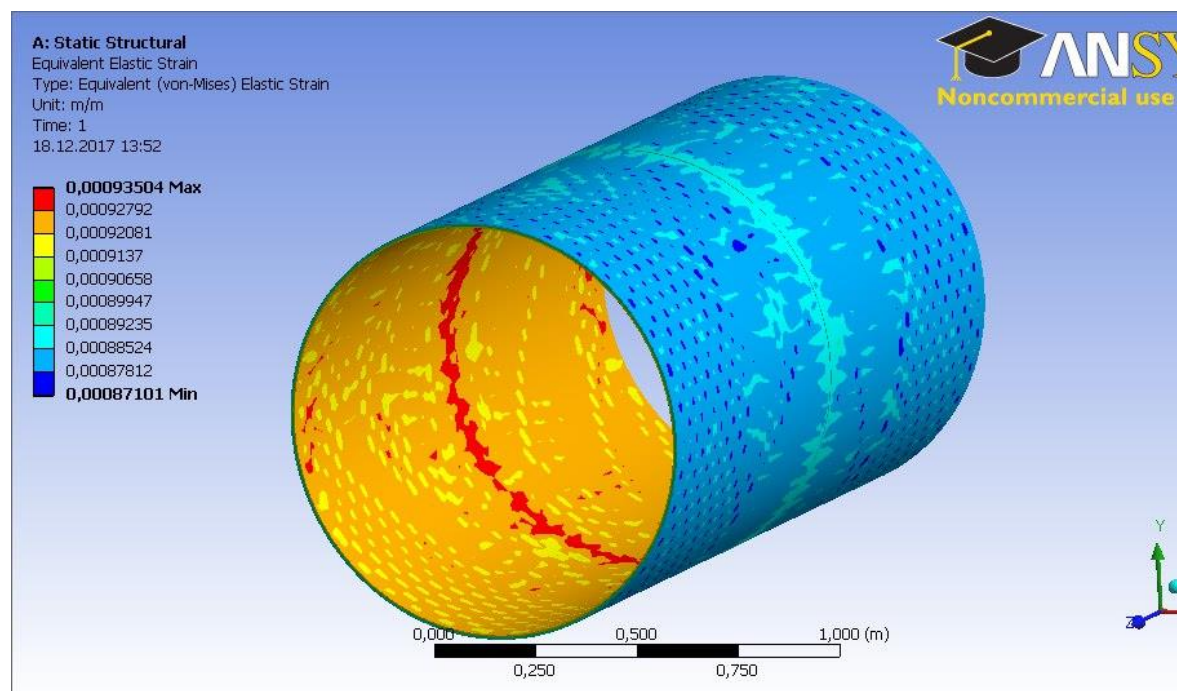


Рис. 6. Эюра эквивалентных деформаций.
Fig. 6. Equivalent elastic strain plot.

имитируется с помощью контактного алгоритма, который позволяет разделить трубопровод и грунт с учетом трения на границе раздела [1, 11-12]. Изотропное кулоновское трение применяется через соответствующий коэффициент трения μ , в данном случае принимаем равным $\mu=0,5$.

На рисунке 1а показана твердотельная трехмерная модель участка трубопровода с кольцевым

дефектом с наложенной сеткой конечных элементов созданная в программном комплексе ANSYS. Сетка конечных элементов построена в автоматическом режиме (параметр Relevance 0). Параметр Relevance определяет относительную плотность сетки конечных элементов. На рисунке 1б показано нагружение модели участка трубопровода расчетной нагрузкой – внутренним давлением величиной

5,4 МПа. На рисунке 1с показано нагружение модели внешним давлением, создаваемым грунтом.

По результатам численного эксперимента в программном комплексе ANSYS определены величины максимального значения эквивалентных напряжений по Мизесу и максимального значения величины эквивалентных деформаций (рисунки 2 и 3).

Результаты численного эксперимента с измененными параметрами сетки представлены рисунках 5 и 6.

При дальнейшем увеличении параметра Relevance в программном комплексе ANSYS с 40 до величины равной 100 с шагом 20 величина эквивалентных напряжений по Мизесу и величина эквивалентных деформаций практически не изменяется. Из эпюры видно, что уменьшение размеров элементов сетки, позволяет выявить зоны концентрации напряжений в трубе, а также что максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу и максимальные эквивалентные деформации расположены в зоне кольцевого дефекта.

Результаты эксперимента (The results of the experiment):

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

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 несущественности влияния данного параметра на точность расчетов. Сравнивая полученные значения напряжений с кольцевыми напряжениями 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 масштабное-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 / Бряжя 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' konstruksiy 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>. (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. ГОСТ Р 52079-2003. Трубы стал'ные сварные для магистрал'ных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктов. Технические условия. [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 17.10.2019

Received 17 October 2019