



ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПОДЗЕМНОГО НЕФТЕГАЗОПРОВОДА ПО КРИТЕРИЮ УСТОЙЧИВОСТИ

В.И.Кучерявый, В.Л.Савич, С.Н.Мильков

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия;

Evaluation of the Reliability of the Underground Oil and Gas Pipeline on Stability Criterion

V.I.Kucheryavy, V.L.Savich, S.N.Milkov

Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

Abstract

As a result of a probabilistic solution of the stability condition, using the quadratic approximation method, an expression is obtained for the mathematical expectation of the diameter of the core axisymmetric shell used in the oil and gas industry, according to the required standard reliability condition, when the soil bed ratio, Young's modulus and diameter are random variables and obey the normal distribution law. The influence of the variability of the design parameters on the reliability of the core axisymmetric shell (oil and gas pipeline) by the criterion of stability is investigated. The algorithm allows at the design stage of the object in question to evaluate the design position of the oil and gas pipeline in weakly bearing soils, which will reduce the risk of accidents due to possible loss of stability.

Keywords:

Oil and gas pipeline;
Stability; Reliability;
Weakly bearing soil;
Pipeline, Emergency risks;
Pivotal (core) axisymmetric shell.

© 2018 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

В северных районах магистральные нефтегазопроводы прокладываются в сложных инженерно-геологических и климатических условиях, вследствие чего стержневые системы осесимметричной оболочки занимают непроектные положения в виде всплытия, оголения, а также образования различных искривлений. Потеря продольной устойчивости рассматриваемого объекта в виде различных искривлений возникает на грунтах, которые расположены в заболоченных местах или обладают перенасыщенным содержанием влаги. В результате опорная поверхность для нефтегазопровода становится неустойчивой. Технические службы, выводящие трубопроводы на капитальный ремонт сталкиваются с их непроектным положением в виде искривлений. Также к образованию рисков возникновения аварийных ситуаций вследствие непроектного расположения рассматриваемого объекта относятся и субъективные причины – это нарушение технологии укладки его в траншею при их сооружении. Из приведенного анализа видно, что наибольшая потеря устойчивости нефтегазопроводов происходит на слабонесущих грунтах и их низкой

вертикальной реакции сопротивления в виде коэффициента постели. Большие сжимающие усилия испытывают трубопроводы от температуры транспортируемого продукта.

В этой ситуации для обеспечения устойчивости подземных трубопроводов необходимо развить вероятностные методы расчета основных параметров стержневой осесимметричной оболочки, что является целью настоящей статьи.

Обоснованность развития указанного подхода подтверждена работами [1-9].

Вследствие значительной изменчивости условий эксплуатации подземных нефтегазопроводов все исходные расчетные параметры (коэффициент постели грунта, модуль Юнга и диаметр) представляем случайными величинами, подчиненными нормальному закону распределения. При этом, модуль Юнга принимается случайной величиной по совокупности однотипных элементов, которые имеют реализационное рассеивание. Базируясь на этом положении, оценку надежности нефтегазопровода по критерию устойчивости выполним в стохастической постановке, применяя теорию преобразований случайных величин, а также используем за основу детерминированную формулу нахождения критической силы.

*E-mail: 010601mdtt@bk.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20180400372>

В качестве показателя продольной устойчивости нефтегазопровода в вертикальной плоскости принимаем вероятность неразрушения R . Это вероятность события, что действующая сжимающая сила на нефтегазопровод \tilde{N} меньше критической \tilde{N}_* .

$$R = \text{Pr ob}(\tilde{N} \leq \tilde{N}_*) = \text{Pr ob}[(\tilde{N}_* - \tilde{N}) = \tilde{y} \geq 0], \quad (1)$$

где \tilde{N}_* , \tilde{N} – случайные величины соответственно критическая и действующая силы; \tilde{y} – случайная величина, обозначающая разностный параметр предельного состояния нефтегазопровода по критерию устойчивости.

В нашем случае прямолинейный участок нефтегазопровода – это длинный стержневой элемент, теряющий устойчивость положения в грунтовой среде от действия сжимающих сил. Допускаем, что в вероятностном условии (1) \tilde{N} и \tilde{N}_* – это независимые случайные величины с соответствующими одинаковыми по типу плотностями распределения вероятностей $f(N)$ и $f(N_*)$ по множеству однотипных участков газонефтепровода. В этом случае общее выражение для показателя надежности нефтегазопровода, учитывающее перекрытие плотностей распределения вероятностей, имеет вид [8, с.140, 146-150]:

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} f(N_*) \left[\int_0^{N_*} f(N) dN \right] dN_*. \quad (2)$$

Многочисленные опытные данные по отказам нефтепроводов, по причине нарушения продольной устойчивости, показывают, что \tilde{N} и \tilde{N}_* имеют плотности распределения нормального закона [6, с.126-132]. При этом условии в предположении, что отсутствует корреляция между \tilde{N} и \tilde{N}_* , выражение (2) приводится к известному виду:

$$R = \Phi(Z), \quad (3)$$

$$Z = (\bar{N}_* - \bar{N}) \cdot (S_*^2 + S^2)^{-1/2},$$

где \bar{N}_* , S_*^2 – математическое ожидание и дисперсия критической силы; \bar{N} , S^2 – математическое ожидание и дисперсия действующего усилия;

$\Phi[Z] = (\sqrt{2\pi})^{-1} \cdot \int_{-\infty}^Z \exp(-x^2/2) dx$ – функция нормированного нормального распределения (среднее ноль, дисперсия единица); Z – её аргумент.

Вычисление несобственного интеграла (3) осуществляем численно по отдельной подпрограмме, а выражение для Z в (3) представляет собой уравнение связи. Формула (3) показывает, что при одном и том же коэффициенте запаса устойчивости $n = \bar{N}_*/\bar{N}$ приходим к различным оценкам для показателя надежности R , который меняется в весьма широких пределах, из-за рассеивания расчетных исходных параметров. Этого факта не учитывают детерминированные методы расчета на устойчивость длительно эксплуатируемых нефтегазопроводов.

В работе [6, с.126-132] на основе теоретических и экспериментальных исследований получена детерминированная формула для определения критической силы, входящей в (3). В этой формуле аргументы представляем независимыми и некоррелированными случайными величинами. Формулу представляем в преобразованном виде [6]:

$$\begin{aligned} \tilde{N}_* &= f(\tilde{k}, \tilde{E}, \tilde{d}) = r \cdot \sqrt{\tilde{k} \cdot \tilde{E} \cdot \tilde{d}^2}, \\ r &= 4^{-1} \cdot \sqrt{\pi \cdot (1-\alpha)^4}, \end{aligned} \quad (4)$$

где \tilde{k} – коэффициент постели грунта при его сжатии, МН/м³, \tilde{E} – модуль Юнга трубной стали, МПа; \tilde{d} – внешний диаметр трубы, м; α – коэффициент отношения внутреннего диаметра к внешнему; r – величина постоянная.

Коэффициент α введен вследствие того, что осесимметричная оболочка имеет соответствующую толщину стенки, поэтому необходимо ввести внешний и внутренний диаметр рассматриваемого объекта.

Из (4) видно, что критическая сила \tilde{N}_* представляет собой нелинейную функцию трех случайных аргументов \tilde{k} , \tilde{E} , \tilde{d} . Допускаем, что по множеству однотипных труб она обладает распределением близким к нормальному закону.

С учетом вышесказанного определяем их математические ожидания \bar{k} , \bar{E} , \bar{d} и соответственно средние квадратические отклонения (стандарты) S_1 , S_2 , S_3 . На стадии проектирования вследствие недостаточного объема статистических данных, средние значения и стандарты указанных аргументов находим по правилу теории вероятностей «трех стандартов» [7-8], используя возможные экстремумы случайных аргументов. Их размах представлен в справочниках, связанных с расчетами трубопроводов на прочность и устойчивость.

Для дальнейшей реализации алгоритма вероятностного расчета устойчивости нефтегазопровода требуется установить основные числовые характеристики критического усилия как: математическое ожидание \bar{N}_* и дисперсию S_*^2 , применяя формулу (4). Однако строго аналитическим методом решить поставленную задачу представляется затруднительным, так как возникают несобственные интегралы, которые возможно решать только численными методами. Поэтому интересующие нас характеристики \bar{N}_* и S_* определим приближенным методом, используя метод квадратичной аппроксимации теории вероятностей [7,8].

Для этого функцию трех случайных аргументов (4), раскладываем в окрестности их математических ожиданий в ряд Тейлора до членов третьего порядка включительно. К полученному разложению используем теоремы о вероятностных числовых характеристиках, отбросив при этом остаточный член ряда.

В результате математических преобразований

общие выражения для \bar{N}_* и S_*^2 будут представлены в виде:

$$\bar{N}_* = f(\bar{k}, \bar{E}, \bar{d}) + 2^{-1} \cdot [(\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{k}^2) \cdot S_1^2 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{E}^2) \cdot S_2^2 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{d}^2) \cdot S_3^2], \quad (5)$$

$$S_*^2 = (\partial \bar{N}_* / \partial \bar{k})^2 \cdot S_1^2 + (\partial \bar{N}_* / \partial \bar{E})^2 \cdot S_2^2 + (\partial \bar{N}_* / \partial \bar{d})^2 \cdot S_3^2 + 2^{-1} \cdot [(\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{k}^2)^2 \cdot S_1^4 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{E}^2)^2 \cdot S_2^4 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{d}^2)^2 \cdot S_3^4 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{k} \cdot \partial \bar{E})^2 \cdot (S_1 \cdot S_2)^2 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{E} \cdot \partial \bar{d})^2 \cdot (S_2 \cdot S_3)^2 + (\partial^2 \bar{N}_* / \partial \bar{k} \cdot \partial \bar{d})^2 \cdot (S_1 \cdot S_3)^2]. \quad (6)$$

В выражениях (5)-(6) стандартное отклонение диаметра задаем в виде $S_3 = (\beta/3) \cdot \bar{d}$, где β – допуск в относительных единицах, равный некоторой доле среднего внешнего диаметра нефтегазопровода \bar{d} .

Основным преимуществом представлений \bar{N}_* и S_*^2 в виде формул (5) и (6) заключается в том, что они позволяют определить числовые характеристики критического усилия приближенно без использования плотности распределения критического усилия.

Для предварительного анализа оценки надежности нефтегазопроводов по критерию устойчивости на стадии проектирования, когда отсутствует соответствующий объем статистической информации, представленный метод является не только обоснованным, но и достаточным, обеспечивая требуемую точность расчетов.

Применив к формуле (4), преобразования (5), (6) получаем развернутые выражения для математического ожидания \bar{N}_* и дисперсии S_*^2 критического усилия, действующего на нефтегазопровод в слабонесущем грунте.

$$\bar{N}_* = \alpha_3 \cdot \bar{N}, \quad S_*^2 = 4^{-1} \cdot \alpha_4 \cdot \bar{N}^2, \quad (7)$$

$$\alpha_3 = 1 + 8^{-1} \cdot [15 \cdot \beta^2 - (S_1 \cdot \bar{k})^2 - (S_2 \cdot \bar{E})^2],$$

$$\alpha_4 = m_1 + m_2,$$

$$m_1 = 25 \cdot \beta^2 + (4^{-1} \cdot 25 \cdot \beta^2 + 1) \cdot [(S_2 \cdot \bar{E})^2 + (S_1 \cdot \bar{k})^2],$$

$$m_2 = 8^{-1} \cdot [(S_1 / \bar{k})^4 + 15^2 \cdot 8^{-1} \cdot \beta^4 + 4^{-1} \cdot (S_1 \cdot S_2 / 4 \cdot (\bar{k} \cdot \bar{E}))^2].$$

Подставляя (7) в уравнение связи (3) получаем квадратное уравнение для определения математического ожидания критического усилия \bar{N}^*

$$\bar{N}^2 = (\alpha_3 - 4^{-1} \cdot Z^2 \cdot b) - 2 \cdot \alpha_3 \cdot \bar{N}_* + \bar{N}^2 - (S \cdot Z)^2 = 0. \quad (8)$$

Решая квадратное уравнение (8) относительно \bar{N}_* (большой корень), находим математическое ожидание внешнего диаметра осесимметричной оболочки

$$\bar{d} = \sqrt[3]{\bar{N}_*^2 \cdot (\bar{r}^2 \cdot \bar{E} \cdot \bar{k})}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого участка трубопровода

вероятностное условие устойчивости задаем в виде $R \geq R_*$, где расчетный показатель надежности, определяемый по (3), с учетом (7)-(9); R_* – минимально допускаемый нормативный уровень надежности, который предлагаем определять соответственно по условию $R_* = 1/[1+(\alpha_1/\alpha_2)]$, где α_1, α_2 – соответственно затраты на планово-профилактическую и аварийную замены поврежденных труб.

Рассмотрим в качестве примера реализацию вышеизложенного алгоритма по оценке надежности участка нефтепровода по критерию потери продольной устойчивости, который проложен в слабонесущем торфяно-влажном грунте.

Трубы изготовлены из ресурсной стали 19Г. в реальных условиях эксплуатации искривление продольной оси нефтепровода измерялось с помощью пропуска профилометра-топографа НП-500, используя значение текущего радиуса искривления на длине 200 м. Числовые значения математических ожиданий и стандартных отклонений исходных аргументов равны:

$$k = 0.75 \text{ МН/м}^3, \quad S_1 = 0.015 \text{ МН/м}^3, \quad \bar{E} = 206000 \text{ МПа}, \\ S_2 = 4120 \text{ МПа}, \quad \bar{N} = 8 \text{ МН}, \quad S_3 = 0.16 \text{ МН}, \\ \alpha = 0.974, \quad \beta = 0.01$$

Рассматриваемый участок нефтепровода является объектом повышенного риска, поскольку его аварийный отказ может вызвать выход нефти. В связи с этим плановую профилактику нефтепровода, а отношение затрат α_1/α_2 принимаем в вышеуказанной формуле 0.01. Тогда нормативная надежность участка нефтепровода по критерию устойчивости будет равна $R_* = 0.999$ которой соответствует аргумент $Z_* = 3.1$. По этим данным в результате численного решения уравнения связи (3), с учетом (7) - (9), найдено требуемое значение математического ожидания внешнего диаметра $\bar{d} = 0.527$ м равное который округляем до стандартного значения 0.530 м. При найденном \bar{d} и неизменных исходных данных по вышеуказанным моделям исследована зависимость параметра надежности R от допуска β и изменения математического ожидания коэффициента постели грунта \bar{k} . Данные представлены в таблице 1.

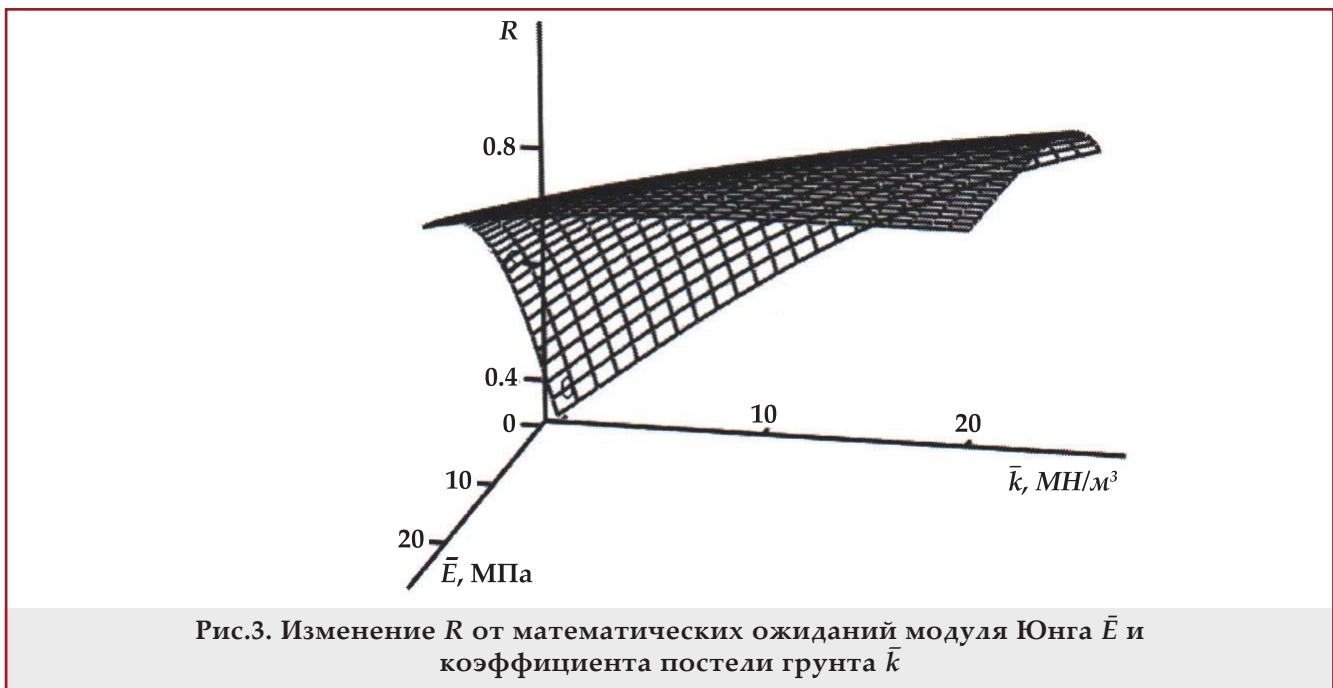
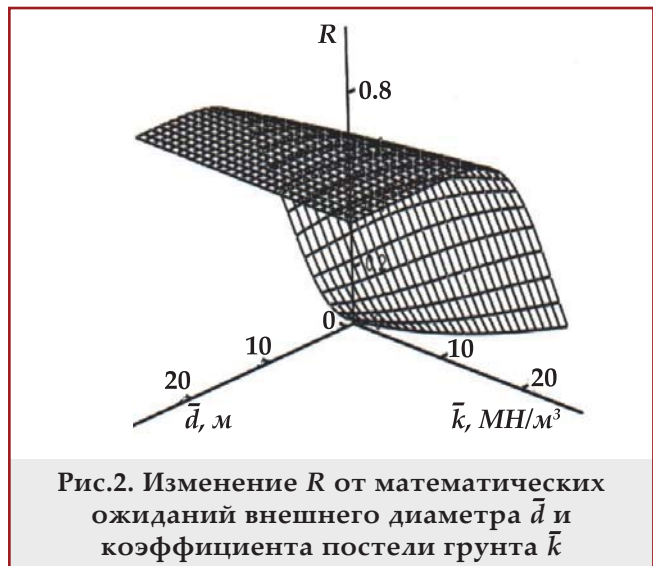
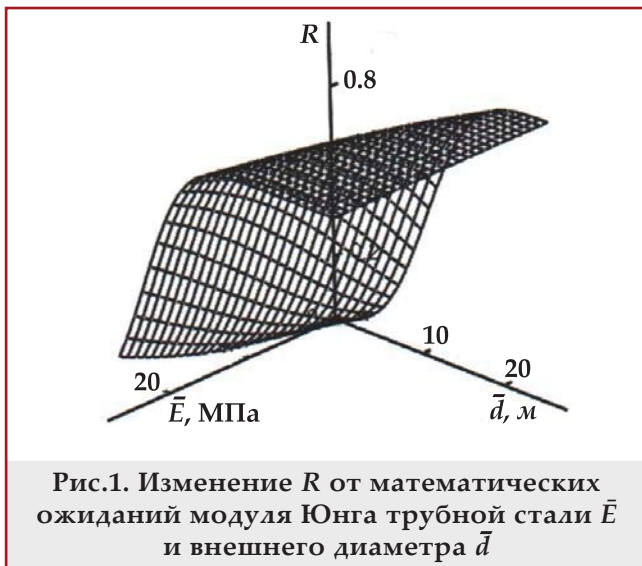
Также построены графики следующих функций, в виде поверхностей: изменение R от математических ожиданий модуля Юнга трубной стали \bar{E} и внешнего диаметра \bar{d} (рис.1); изменение параметра надежности R от математических ожиданий внешнего диаметра \bar{d} и коэффициента постели грунта \bar{k} (рис.2); изменение показателя надежности R от математических ожиданий модуля Юнга \bar{E} и коэффициента постели грунта \bar{k} (рис.3). Данные зависимости построены по (3), с учетом (7) – (9).

Из представленных рисунков видно, что наибольшее влияние на показатель надежности оказывает математическое ожидание коэффициента постели грунта \bar{k} и его дисперсия S_1^2 . Следовательно, на более плотных грунтах надежность трубопровода по критерию потери устойчивости R существенно повышается.

Таблица 1

Результаты исследования зависимости параметра надежности R от допуска β и изменения математического ожидания коэффициента постели грунта k

| B | Z_β | Z_β | Z_β | Z_k | R_k |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 0.01 | 2.554671 | 0.99686 | 0.5000 | -2.738359 | 0.003087 |
| 0.03 | 1.126014 | 0.870047 | 0.5255 | -2.002222 | 0.022630 |
| 0.05 | 0.718465 | 0.7637650 | 0.5510 | -1.305254 | 0.095903 |
| 0.07 | 0.542117 | 0.706131 | 0.5765 | -0.644116 | 0.259750 |
| 0.09 | 0.44870 | 0.673187 | 0.6020 | -0.015860 | 0.493673 |
| 0.11 | 0.393593 | 0.653192 | 0.6275 | 0.582136 | 0.719763 |
| 0.13 | 0.360154 | 0.640634 | 0.6530 | 1.152207 | 0.875382 |
| 0.15 | 0.338966 | 0.632682 | 0.6785 | 1.696442 | 0.955099 |
| 0.17 | 0.325913 | 0.627755 | 0.7040 | 2.216718 | 0.986679 |
| 0.19 | 0.318381 | 0.624902 | 0.7295 | 2.714727 | 0.996683 |
| 0.21 | 0.314743 | 0.623522 | 0.7550 | 3.191998 | 0.999294 |
| 0.23 | 0.313929 | 0.623212 | 0.7805 | 3.649916 | 0.999869 |
| 0.25 | 0.315207 | 0.623698 | 0.8060 | 4.089740 | 0.999978 |
| 0.27 | 0.318059 | 0.624780 | 0.8315 | 4.512620 | 0.999997 |



Представленный алгоритм позволяет выполнить оценку надежности нефтегазопровода и в том случае, когда исходные расчетные переменные подчинены и аномальному закону распределения. Но в этом случае решение несобственного интеграла (3) и все последующие преобразования выполняем численно.

Разработанный алгоритм, пакеты вычислительных программ, графики поверхностей, позволяют выполнить оценку надежности нефтегазопровода по критерию устойчивости на стадии проектирования, что приводит к снижению ремонтных работ нефтегазопроводов в процессе их длительной эксплуатации. Установлено, что нормативный параметр

надежности нефтегазопровода должен быть 0.999 и выше, что приводит к снижению функции риска, связанной с потерей продольной устойчивости нефтегазопровода. На основании выполненных расчетных исследований разработаны практические рекомендации по балластировке и закреплению нефтегазопроводов, позволившие минимизировать риски аварийных отказов по причине нарушения устойчивости в слабонесущих грунтах. При этом снижены объемы ремонтных работ по исправлению непроектного положения нефтегазопроводов северного технического коридора, что привело к повышению их надежности эксплуатации и безаварийной работы.

Литература

1. Р.Ф.Ганиев. Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А.Благонравова. Ч.1 //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2010. - №1. - С. 1-20.
2. Р.Ф.Ганиев. Проблемы механики машин и технологий. Перспективы развития Института машиноведения им. А.А. Благонравова. Ч.II //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2011. - №2. - С. 3-17.
3. В.П.Когаев, Ю.Н.Дроздов. Прочность и износостойкость деталей машин. - М.: Высшая школа, 1991.
4. Н.А.Махмутов. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести машин и человеко-машинных комплексов //Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. - №5. - С. 23-26.
5. Н.А.Махмутов, В.Н.Пермяков. Гофрообразование на магистральных трубопроводах //Транспорт и подземное хранение газа. - 1986. – Выпуск 8. -С. 13-15.
6. П.П.Бородавкин, В.Л.Березин. Сооружение магистральных трубопроводов. - М.: Недра, 1987.
7. Е.С.Вентцель. Теория вероятностей. -М.: Наука, 1969.
8. К.Кapur, Л.Ламберсон. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. М.: Мир, 1980.
9. С.Я.Кушнир, С.А.Пульников, Ю.С.Сысоев. Пространственная устойчивость подземного магистрального газопровода на обводненных участках трассы //Известия вузов «Нефть и газ». - 2012. - №1. -С. 72-76.

References

1. R.F.Ganiev. Problems of machine mechanics and technology. Prospects of the development of the Blagonravov Institute of Engineering Science. Part I //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2010. – No. 1. - P. 1-20.
2. R.F.Ganiev. Problems of machine mechanics and technology. Prospects of the development of the Blagonravov Institute of Engineering Science. Part II //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2011. – No. 2. - P. 3-17.
3. V.P.Kogaev, Yu.N.Drozhdov. Durability and wear resistance of machine parts. -M.: Vysshaya shkola, 1991.
4. N.A.Makhmutov. A Criterion base for assessment of strength, lifetime, reliability, survivability, and security of machines and man-machine systems //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2013. – No.5 - P. 23-26.
5. N.A.Makhmutov, V.N.Permyakov. Corrugation on trunk pipelines //Transport and Underground Gas Storage. – 1986. – Issue 8. - P. 13-15.
6. P.P.Borodavkin, V.L.Berezin. The construction of pipelines. -M.: Nedra, 1987.
7. E.S.Wentzel. Probability theory. M.: Nauka, 1969.
8. K.C.Kapur, L.R.Lamberson. Reliability in engineering design. NY: John Wiley & Sons, 1977.
9. S. Ya. Kushnir, S. A. Pulnikov, Yu. A. Sysoev. Spatial stability of main underground gas pipeline in the watered sections of the route //The journal «Oil and Gas Studies». - 2012. – No. 1. – P. 72-76.

Оценка надежности подземного нефтегазопровода по критерию устойчивости

В.И.Кучерявый, В.Л.Савич, С.Н.Мильков

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия;

Реферат

В результате вероятностного решения условия устойчивости, методом квадратичной аппроксимации, получено выражение для математического ожидания диаметра стержневой осесимметричной оболочки, используемой в нефтегазовой отрасли, по требуемому нормативному условию надежности, когда коэффициент постели грунта, модуль Юнга и диаметр представляют собой случайные величины и подчиняются нормальному закону распределения. Исследовано влияние изменчивости расчетных параметров на надежность стержневой осесимметричной оболочки (нефтегазопровода) по критерию устойчивости. Алгоритм позволяет на стадии проектирования рассматриваемого объекта оценить проектное положение нефтегазопровода в слабонесущих грунтах, что позволит снизить риски возникновения аварийных ситуаций вследствие возможной потери устойчивости.

Ключевые слова: устойчивость, надежность, стержневая осесимметричная оболочка, нефтегазопровод, трубопровод, аварийные риски, слабонесущий грунт.

Yeraltı neft-qaz kəmərinin etibarlılığının dayanıqlılıq meyarı üzrə qiymətləndirilməsi

V.İ.Kuçeryavy, V.L.Saviç, S.N.Milkov

Uxta Dövlət Texniki Universiteti, Uxta, Rusiya

Xülasə

Dayanıqlılıq şərtinin kvadrat approksimasiya üsulu ilə ehtimal olunan həlli nəticəsində, neftqaz sahəsində istifadə olunan oxboyu simmetrik milli örtüyün diametrinin riyazi gözləməsi üçün normativ etibarlılıq şərtinə əsasən (bu şərtə əsasən süxur qatı əmsalı, Yunq modulu və diametr təsadüfi kəmiyyətlər təşkil edir və normal paylanma qanununa tabe olur) ifadə alınmışdır.

Hesablama parametrlərinin dəyişkənliyinin (neft-qaz kəmərinin) oxboyu simmetrik milli örtüyün etibarlılığına təsiri dayanıqlılıq meyarına əsasən tədqiq edilmişdir. Alqoritm baxılan obyektin layihələndirilməsi mərhələsində zəif quruluşlu süxurlarda neft-qaz kəmərinin layihə vəziyyətini qiymətləndirməyə imkan verir ki, bu da dayanıqlılıq itkisi nəticəsində baş verə biləcək qəza risklərini azaltmağa imkan verəcəkdir.

Açar sözlər: dayanıqlılıq, etibarlılıq, oxboyu simmetrik milli örtük, neft-qaz kəməri, boru kəməri, qəza riskləri, zəif quruluşlu süxur.