

Т.И. Сулейманов (Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика), **Х.М. Насиров** (Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика)

ВОПРОСЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В СЕЙСМИЧЕСКИ ОПАСНОЙ ЗОНЕ

Tofiq I. Suleymanov (Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan Republic), Habib M. Nasirov (State Oil Company of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic)

OPTIMUM DESIGN OF UNDERGROUND PIPELINE NETWORK IN A SEISMICALLY HAZARDOUS AREA

Введение

Подземные трубопроводы могут быть подвергнуты воздействию как статических, так и динамических воздействий, в особенности на сейсмически активных участках. Реакция трубопровода на такое воздействие зависит от таких факторов, как жесткость материала; физико-механические характеристики земляной массы, покрывающей трубопровод; качество исполнения; взаимодействие структуры трубопровода и земляного массива и т.д. Подземные трубопроводы могут быть подвержены воздействию тяжелого транспорта, гидродинамического давления, а также сейсмического удара. Разрывы трубопроводов из-за сейсмических событий показывают, что они возникают вследствие действия сил, создающих продольное напряжение, таких как аксиальная компрессия или продольный изгиб из-за сгибающего момента или сдвигающей силы в поперечном сечении трубы. Все это приводит к появлению напряженности на стенке трубы.

Статья посвящена задаче оптимального проектирования подземных трубопроводных сетей в сейсмически опасных зонах.

Background

Underground pipelines can be subject to both static and dynamic influences, especially in seismically active areas. The pipeline's response to such an impact depends on factors such as the rigidity of the material, the physical and mechanical characteristics of the earth mass covering the pipeline, the quality of performance; the interaction of the pipeline structure and the earth mass, etc. Underground pipelines can be exposed to heavy traffic, hydrodynamic pressure, and seismic shock. Piping ruptures due to seismic events indicate that they are caused by forces that create longitudinal stress, such as axial compression or buckling due to a bending moment or shear force in the cross section of the pipe. All this leads to the appearance of tension on the pipe wall.

The article is devoted to the problem of optimal design of underground pipeline networks in seismically hazardous areas.

Цели и задачи

Задача исследования состоит в нахождении оптимальной функциональной зависимости диаметра и толщины стенки трубы, при которой специально сформированный функционал цели в виде определенного интеграла по всем возможным значениям толщин стенок трубопроводов сети достигает экстремальной величины.

Результаты

Показано, что при наложении некоторого интегрального ограничительного условия на функциональную зависимость между диаметром и толщиной стенки трубы применительно к трубопроводной сети, состоящей из множества трубопроводов с разной толщиной стенок, существует оптимальный вид указанной функциональной зависимости, при котором среднеинтегрированная величина напряженности в трубе при сжатии достигает минимальной величины. Обнаруженная закономерность может быть полезной при проектировании трубопроводов различного назначения.

Aims and Objectives

The study task is to find the optimal functional dependence of the diameter and thickness of the pipe wall, at which a specially formed functional of the target in the form of a certain integral over all possible values of the wall thicknesses of the network pipelines reaches an extreme value.

Results

It is shown that when a certain integral limiting condition is imposed on the functional relationship between the pipe diameter and the pipe wall thickness in relation to a pipeline network consisting of a plurality of pipelines with different wall thicknesses, there is an optimal form of the specified functional requirement dependence, at which the average integrated value of stress in the pipe during compression reaches a minimum value. The discovered pattern can be useful in the design of pipelines for various purposes.

Ключевые слова: трубопровод; оптимизация; сейсмическая опасность; диаметр трубы; сеть трубопроводов

Key words: pipeline; optimization; seismic hazard; pipe diameter; pipeline network

Введение

Подземные трубопроводы могут быть подвергнуты воздействию как статических, так и динамических нагрузок, особенно на сейсмически активных участках. Реакция трубопровода на такое воздействие зависит от таких факторов, как жесткость материала; физико-механические характеристики земляной массы, покрывающей трубопровод; качество исполнения; взаимодействие структуры трубопровода и земляного массива и т.д. Подземные трубопроводы могут быть подвержены воздействию тяжелого транспорта, гидродинамического давления, а также сейсмического удара [1, 2].

Разрывы трубопроводов из-за сейсмических событий показывают, что они возникают вследствие действия сил, создающих продольное напряжение, таких как аксиальная компрессия или продольный изгиб из-за сгибающего момента или сдвигающей силы в поперечном сечении трубы. Все это приводит к появлению напряженности на стенке трубы.

Из-за прогибающего момента, возникающего в длинной горизонтальной трубе, возникает вертикальное перемещение трубы.

Такое смещение, оцениваемое как $\frac{\Delta z}{D}$ по сути выражает овализацию трубного кольца и определяется формулой Рейсснера [3]:

$$\frac{\Delta z}{D} = \frac{1}{16} \left(\frac{D}{t} \right)^2 \left(\frac{D}{R} \right)^2,$$

где t - толщина стенки трубы;

Δz - показатель овализации;

D - номинальный диаметр трубы;

R - радиус продольной кривизны трубы.

Согласно работе [4], землетрясения могут вызвать такие виды смещения почвы, как оползни, разрывы почвы, разжижение почвы и др. Смещение почвы может создать значительную угрозу для нормального функционирования трубопровода. Типичный случай показан на рисунке 1. Здесь основными показателями пересечения направления движения почвы трассы трубопровода являются угол пересечения β и угол разрыва Ψ .

Технологии строительства трубопровода в отношении постоянных смещений почвы составляются с учетом напряженностей, используя свойство ковкости стали, применяемой для изготовления трубопровода.

Технологические нормы изготовления труб устанавливают верхний предел для напряжений растяжения и сжатия, чтобы избежать на практике случаев разрыва и локального искривления трубы. Этот порядок,

например, предусмотрен в нормативных актах таких организаций, как «American Lifetimes Alliance» (2005 г.) [5], «CEN» (2006 г.) [6], «Canadian Standarts Association» (2007 г.) [7], «Indian Institute of Technology Rfnpur and Gujarat Stste Disaster Management Authority» (2007 г.) [8].

Далее рассмотрим предел напряженности в трубе [5], считая наличие нулевого внутреннего давления. Предел напряженности растяжения принимаем равным $\varepsilon_t = 2\%$.

При этом напряженность при сжатии определяется по формуле:

$$\varepsilon_c = 0.5 \left(\frac{t}{D'} \right) - 0.0025, \quad (1)$$

где

$$D' = \frac{D}{1 - 3 \cdot \frac{(D - D_{\min})}{D}}, \quad (2)$$

где D - внешний диаметр трубы;

t - толщина стенки трубы;

D_{\min} - минимальный диаметр трубы, с учетом возможного приобретения формы овала.

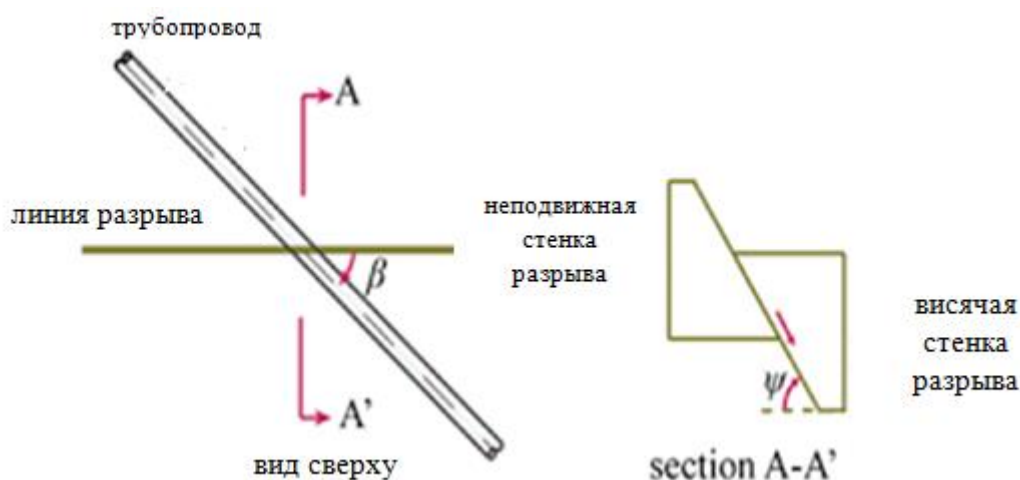


Рисунок 1. Общее представление разрыва трубопровода из-за смещения почвы

Материалы и метод

В настоящей статье рассматривается вся совокупная сеть трубопроводов, имеющаяся в сейсмически опасной зоне. Задача исследования состоит в нахождении такой функциональной зависимости

$$D = f(t), \quad (3)$$

при которой интегрированная величина ε_c по всем возможным значениям t , имеющейся во всей сети трубопроводов, достигла бы экстремальной величины. Математически задача формируется следующим образом.

Имеется упорядоченное множество

$$T = \{t_i\}, \quad (4)$$

где $t_i = t_{i-1} + \Delta t$; $\Delta t = \text{const}$, $i = \overline{1, n}$; $t_0 = 0$.

Также имеется упорядоченное множество

$$D = \{D_j\}, \quad (5)$$

где $D_j = D_{j-1}$; $\Delta D = \text{const}$, $i = \overline{1, n}$; $D = 0$.

При этом на дискретную функцию $D_j = f(t_i)$ наложено ограничение F_1 , где

$$F_1 = \sum_{i=1}^n f(t_i) = C; C = \text{const}. \quad (6)$$

В непрерывной форме ограничение F_1 имеет вид:

$$F_1 = \int_0^{t_{\max}} f(t) dt = C. \quad (7)$$

Сформируем целевой функционал оптимизации на базе формул (1) и (2).

С учетом (2) выражение (1) перепишем в виде:

$$\varepsilon_c = 0.5 \left[\frac{t \left[1 - 3 \left(\frac{D - D_{\min}}{D} \right) \right]}{D} \right] - 0.0025. \quad (8)$$

Выражение (8) можно привести к форме

$$\varepsilon_c = \frac{0.5t}{D} \left[\frac{3D_{\min}}{D} - 2 \right] - 0.0025. \quad (9)$$

С учетом (3), (9), (7) сформируем интегральный целевой функционал F_2 оптимизации

$$F_1 = \int_0^{t_{\max}} \left\{ \frac{0.5t}{f(t)} \left[\frac{3D_{\min}}{f(t)} - 2 \right] - 0.0025 \right\} dt + \lambda \left[\int_0^{t_{\max}} f(t) dt - C \right], \quad (10)$$

где λ - множитель Лагранжа.

Дадим модельное решение оптимизационной задачи (10).

Модельное решение

Согласно условиям уравнения Эйлера - Лагранжа, решение оптимизационной задачи (10) должно удовлетворить условию [9]:

$$d \left\{ \frac{0.5t \left[\frac{3D_{\min}}{f(t)} - 2 \right] - 0.0025 + \lambda \cdot f(t)}{df(t)} \right\} = 0. \quad (11)$$

Из условия (11) можно получить следующее алгебраическое уравнение

$$f^3(t) + \frac{f_3(t) \cdot t}{\lambda} - \frac{3D_{\min} \cdot t}{\lambda} = 0. \quad (12)$$

Далее используя алгебраические методы вычисления $f(t)$ в виде

$$f(t) = \varphi(\lambda, t, D_{\min}), \quad (13)$$

вычисляется величина λ , используя формулы (7) и (11)

$$\int_0^{t_{\max}} \varphi(\lambda, t, D_{\min}) dt = C \quad (14)$$

Из условия (14) легко вычисляется величина множителя Лагранжа, вычисленную величину далее обозначении как λ_0 .

Таким образом, решение (13) приобретает вид:

$$\varphi(t) = \varphi(\lambda_0, t, D_{\min}) \quad (15)$$

Следовательно, при решении (15) функционал цели (10) достигает экстремума.

Для определения типа экстремума вычислим следующую величину:

$$d \left\{ \frac{0.5t \left[\frac{3D_{\min}}{f(t)} - 2 \right] - 0.0025 + \lambda \cdot f(t)}{df(t)^2} \right\} = \quad (16)$$

$$= \frac{d \left\{ -\frac{2 \cdot 1.5 \cdot t \cdot D_{\min}}{f^3(t)} + \frac{t}{f^2(t)} + \lambda \right\}}{df(t)} = \frac{3tD_{\min}}{f^4(t)} - \frac{t}{f^3(t)}$$

Следовательно, если

$$\frac{3tD_{\min}}{f^4(t)} > \frac{t}{f^3(t)} \quad (17)$$

или

$$3D_{\min} > D \quad (18)$$

то целевой функционал (10) достигает минимума. Очевидно, что условие (18) обеспечивается практически всегда, следовательно, при условии (18) интегральная величина ε_c достигает минимума.

Выводы

Показано, что при наложении некоторого интегрального ограничительного условия на функциональную зависимость между диаметром и толщиной стенки трубы применительно к трубопроводной сети, состоящей из множества труб с разной толщиной стенок, существует оптимальный вид указанной функциональной зависимости, при котором среднеинтегрированная величина напряженности в трубе при сжатии достигает минимальной величины.

Обнаруженная закономерность может быть полезной при проектировании трубопроводных систем различного назначения.

Список литературы

1. Ryu Y., Kwag S., Ju B.S. Fragility Assessments of Multi-Story Piping Systems Within a Seismically Isolated Low-Rise Building // *Sustainability*, 2018, Vol. 10, P. 3775. DOI: 10.3390/su10103775.
2. Meniconi S., Brunone D., Frisinghelli M. On the Role of Minor Branches? Energy Dissipation and Small Defects in the Transient Response of Transmission Mains // *Water*, 2018, Vol. 10, P. 187. DOI: 10.3390/w10020187.
3. Ancas A.D., Atanasiu G.M. Seismic Risk Management Considering the Urban Lifeline Existing System, Business Excellence // *Business Excellence: Materials of the 6th International Conference*. Brasov, Romania, 2011, P. 20-23.
4. Chris J.G., Vasileios E.M. Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture // *Frontiers in Built Environment*, 2016, Vol. 2, Article 34. DOI: 10.3389/fbuil.2016.00034.
5. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe. American Lifelines Alliance, 2005. 76 p.

References

1. Ryu Y., Kwag S., Ju B.S. Fragility Assessments of Multi-Story Piping Systems Within a Seismically Isolated Low-Rise Building. *Sustainability*, 2018, Vol. 10, pp. 3775. DOI: 10.3390/su10103775.
2. Meniconi S., Brunone D., Frisinghelli M. On the Role of Minor Branches? Energy Dissipation and Small Defects in the Transient Response of Transmission Mains. *Water*, 2018, Vol. 10, pp. 187. DOI: 10.3390/w10020187.
3. Ancas A.D., Atanasiu G.M. Seismic Risk Management Considering the Urban Lifeline Existing System, Business Excellence. *Materials of the 6th International Conference «Business Excellence»*. Brasov, Romania, 2011, pp. 20-23.
4. Chris J.G., Vasileios E.M. Evaluation of Seismic Protection Methods for Buried Fuel Pipelines Subjected to Fault Rupture. *Frontiers in Built Environment*, 2016, Vol. 2, Article 34. DOI: 10.3389/fbuil.2016.00034.
5. *Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe*. American Lifelines Alliance, 2005. 76 p.

6. CEN. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake resistance. Part 4: Silos, Tanks and Pipelines. Brussels: European Committee for Standard, Vol. 3. 2005. 83 p.

7. CSA Z662-07 Oil and Gas Pipeline Systems. Toronto: CSA Group, 2020. 923 p.

8. IITK-GSDMA Guideline for Seismic Design of Buried Pipelines. Kanpur: National Information Center of Earthquake Engineering, 2007. 105 p.

6. *CEN. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake resistance. Part 4: Silos, Tanks and Pipelines.* Brussels, European Committee for Standard, Vol. 3. 2005. 83 p.

7. *CSA Z662-07 Oil and Gas Pipeline Systems.* Toronto, CSA Group, 2020. 923 p.

8. *IITK-GSDMA Guideline for Seismic Design of Buried Pipelines.* Kanpur, National Information Center of Earthquake Engineering, 2007. 105 p.

Авторы

• Сулейманов Тофиг Ибрагим оглы, д-р техн. наук, профессор
Национальное аэрокосмическое агентство
Азербайджана
Заместитель генерального директора
AZ 1115, Азербайджан, г. Баку, Бинагадинский район, ул. С.С. Ахундова, 1
e-mail: suleymanov55@mail.ru

• Насиров Хабиб Миргалиб оглы
Государственная нефтяная компания
Азербайджанской Республики
Старший специалист Управления экологии,
Департамент биоразнообразности
AZ 1033, Азербайджан, г. Баку,
пр. Гейдара Алиева, 121
e-mail: nasirovhabib@mail.ru

The Authors

• Suleymanov Tofiq I., Doctor of Engineering Science, Professor
Azerbaijan National Aerospace Agency
Deputy General Director
1, S.S. Akhundov str., Binagady district, Baku,
AZ 1115, Republic of Azerbaijan
e-mail: suleymanov55@mail.ru

• Nasirov Habib M.
Ecology Directorate of SOCAR
SOCAR
Senior Specialist of Ecology Directorate,
Department of Biovariability,
121, Heydar Aliyev av., Baku, AZ 1033,
Republic of Azerbaijan
e-mail: nasirovhabib@mail.ru