

**Х.М. Насиров** (Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика)

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРУБОПРОВОДА ПО МЕТОДИКЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

**Habib M. Nasirov** (State Oil Company of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan Republic)

### PROCEDURE FOR DETERMINING THE MAIN GEOMETRIC INDICATORS OF THE PIPELINE BY THE MULTI-CRITERIAL OPTIMIZATION METHOD

#### **Введение**

Толщина стенки магистрального трубопровода в основном определяется путем расчета на внутреннее давление. Необходимость уточнения существующей методики расчета связана наличием некоторых природных и антропогенных опасностей механического повреждения трубопровода из-за различного типа механических воздействий. Существующие методики определения толщины стенки труб в российских и американских нормативных документах определяют зависимость кольцевых напряжений от внутреннего давления с помощью формулы Барлоу. При этом допускается, что распределение кольцевых напряжений по толщине стенки трубы равномерное, а радиальные напряжения не учитываются. Между тем, применительно к зонам повышенной опасности при наличии внешних механических воздействий (землетрясения, оползни, сели и другие разрушительные явления) проектирование трубопроводных линий требует оптимального учета этих воздействий.

#### **Background**

The wall thickness of the main pipeline is mainly determined by calculating the internal pressure. The need to clarify the existing calculation methodology is associated with the presence of some natural and anthropogenic hazards of mechanical damage to the pipeline due to various types of mechanical influences. The existing methods for determining pipe wall thickness in Russian and American regulations determine the dependence of hoop stresses on internal pressure using the Barlow formula. It is assumed that the distribution of hoop stresses over the pipe wall thickness is uniform, and radial stresses are not taken into account. Meanwhile, in relation to areas of increased danger in the presence of external mechanical influences (earthquakes, landslides, mudflows and other destructive phenomena), the design of pipeline lines requires optimal consideration of these effects.

### Цели и задачи

Целью работы является изучение вопроса о разработке методики определения основных геометрических показателей трубопровода с использованием метода многокритериальной оптимизации.

### Результаты

Разработан метод ударно-механического воздействия для вычисления оптимальной толщины стенки трубопровода. Предполагается, что ударное воздействие оказывает зуб ковша землеройного экскаватора. Предложенный критерий оптимизации является скалярной сверткой двух частных критериев, первый из которых определяет сопротивляемость трубы к проколу, а второй – сопротивляемость к распространению появившейся трещины.

Показано, что оптимальная величина толщины стенки трубы прямо пропорциональна диаметру трубы и кольцевому напряжению и обратно пропорциональна минимальной величине предела текучести, длине и ширине воздействующего на трубопровод зубца.

### Aims and Objectives

The aim of the work is to study the issue of developing a methodology for determining the main geometric parameters of the pipeline using the method of multicriteria optimization.

### Results

A method of shock-mechanical action for calculating the optimal thickness of the pipeline wall has been developed. It is assumed that the impact is exerted by the bucket teeth of an earth-moving excavator. The proposed optimization criterion is a scalar convolution of two particular criteria, the first of which determines the resistance of the pipe to puncture, and the second, the resistance to the propagation of the emerging crack.

It is shown that the optimal value of the pipe wall thickness is directly proportional to the pipe diameter and hoop stress and inversely proportional to the minimum value of the yield stress, the length and width of the tooth acting on the pipeline.

---

---

**Ключевые слова:** толщина стенки; трубопровод; трещина; многокритериальная оптимизация; кольцевое напряжение

---

---

**Key words:** wall thickness; pipeline; crack; multi-criteria optimization; hoop stress

---

---

### *Введение*

Как отмечается в работе [1], толщина стенки магистрального трубопровода в основном определяется путем расчета на внутреннее давление. Необходимость уточнения существующей методики расчета связана с наличием некоторых природных и антропогенных воздействий, связанных с опасностью механического повреждения трубопровода. Существующие методики определения толщины стенки труб в российских [1] и американских нормативных документах определяют зависимость кольцевых напряжений от внутреннего давления с помощью формулы Барлоу. При этом допускается, что распределение кольцевых напряжений по толщине

стенки трубы равномерное, а радиальные напряжения не учитываются. Между тем, применительно к зонам повышенной опасности при наличии внешних механических воздействий (землетрясения, оползни, сели и другие разрушительные явления) проектирование трубопроводных линий требует оптимального учета этих воздействий.

Механические разрушительные воздействия, существующие в зоне прокладки трубопровода, могут привести к таким последствиям, как растрескивание стенки трубы, образование вмятин или отверстий.

Потенциальными причинами могут быть землетрясения, приводящие к смещению породы в обе стороны разрыва на мак-

симальную величину  $\Delta_m$ , определяемую следующим образом [2]:

$$\Delta_m(m) = 10^{-4.8+0.69M_w}, \quad (1)$$

где  $M_w$  - магнитудный момент сейсмического события.

Согласно работе [3], механические повреждения трубопровода возникают по следующим причинам: внешние воздействия (49.6 %); дефекты, допущенные при производстве труб (16.5 %); коррозия (15.3 %); смещения почвы при землетрясениях (7.3 %); другие причины (11.3 %).

Как отмечается в работе [4], в течение 20 лет, с 1995 г. по 2014 г., в США 16.4 % всех повреждений газопроводов возникали из-за механических воздействий экскаваторов, осуществляющих рытье траншеи. При этом различают повреждения, возникающие сразу после внешнего механического воздействия, а также такие повреждения, которые образуются с задержкой, через некоторое время после такого воздействия. Так, например, согласно [5], из-за внешних механических воздействий, приложенных к водопроводам, немедленные повреждения образовывались при 83 % всех случаев повреждений, а в газопроводах этот показатель достигал 96 %.

Вышеуказанная статистика подтверждает важность и актуальность разработки новых методик по выбору таких основных показателей, как толщина стенки трубы, диаметр трубы, учитывающих возможные ударно-механические воздействия.

#### *Существующий метод*

Во многих стандартах и рекомендациях США и Канады при строительстве трубопроводов основным показателем считается кольцевое напряжение трубы  $\sigma_n$ , определяемое как [7]:

$$\sigma_n = \frac{p \cdot D}{2t} \leq f \cdot \sigma_y, \quad (2)$$

где  $p$  - внутреннее давление;

$D$  - диаметр трубы;

$t$  - толщина стенки труб;

$f$  - фактор дизайна;

$\sigma_y$  - установленный минимальный предел текучести.

Высокое значение фактора дизайна получается из-за таких причин, как разнообразие или изменчивость материалов, практика построения, неопределенность в условиях загрузки трубопровода, а также различие условий обслуживания и технического сервиса.

В общем случае, целостность функционирования трубопроводной системы зависит от многих объективных предсказуемых факторов, а также от непредсказуемых факторов, к числу последних можно отнести ударное механическое воздействие.

#### *Метод расчета ударно-механического воздействия*

Ударно-механическое воздействие может привести к таким последствиям, как разрыв стенки трубы или растрескивание и дальнейшее распространение трещины. Рассмотрим вышеуказанные последствия ударно-механического воздействия.

Согласно [8], Европейская Группа по исследованию трубопроводов в результате многолетних исследований явлений механического прокола трубопроводов предложила формулу для вычисления сопротивления проколов трубопровода  $R$ :

$$R = \left[ 1.17 - 0.0029 \left( \frac{D}{t} \right) \right] (\ell + w) \cdot t \cdot \sigma_v, \quad (3)$$

где  $t$  - толщина стенки трубы;

$D$  - внешний диаметр трубы;

$\ell$  - длина зубца экскаватора, оказавшего ударное воздействие на трубы;

$w$  - ширина того же зубца;

$\sigma_v$  - предел прочности на растяжение.

При этом существующая статистика показывает, что трубопроводы с большой тол-

щиной стенки трубы имеют меньшую частотность механических повреждений [9].

Другим широко распространенным последствием ударно-механического воздействия на трубопровод является растрескивание трубы и дальнейшее распространение трещины.

Согласно [7], распространение трещины возникает в газопроводах, так и в многофазных трубопроводах, а трещина может распространиться на достаточно большое расстояние.

Для оценки возможности распространения трещины на стенке трубы используется уравнение Бателле для вычисления требуемой жесткости, обеспечивающей предотвращение распространения трещины:

$$C_v = 2.836 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_n^2 \cdot D^{\frac{1}{3}} \cdot t^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где  $C_v$  - показатель ударной вязкости по Шарпи;

$\sigma_n$  - кольцевое напряжение;

$D$  - диаметр трубы;

$t$  - толщина стенки трубы.

При этом, с увеличением  $C_v$  надежность трубы уменьшается, т.е. трубы с большим напряжением и диаметром считаются ненадежными в плане предотвращения распространения трещины.

Предлагаемый метод определения оптимальной величины толщины трубной стенки является многокритериальным. Хорошо известно [9], что задачи многокритериальной оптимизации могут быть представлены в виде скалярной свертки используемых частных критериев  $K_1(t)$  и  $K_2(t)$ , а также весовых коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  в виде

$$K_0(t) = \beta_1 \cdot K_1(t) + \beta_2 \cdot K_2(t), \quad (5)$$

где  $\beta_1 + \beta_2 = 1$ .

В рассматриваемом случае частные критерии  $K_1(t)$  и  $K_2(t)$  с учетом (3) и (4) определяются следующим образом:

$$K_1(t) = a_1 \cdot t^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

где

$$a_1 = 2.836 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_n^2 \cdot D^{\frac{1}{3}}; \quad (7)$$

$$K_2(t) = D_0 - \left(a_1 - \frac{a_3}{t}\right) \cdot a_4 \cdot t, \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= const \\ a_2 &= 1.17 \\ a_3 &= 0.0029D \\ a_4 &= \sigma_n(\ell + w) \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

С учетом (5)-(9) скалярный целевой функционал (5) приобретает следующий вид:

$$K_0(t) = \beta_1 \cdot a_1 t^{\frac{1}{3}} + \left[ D_0 - \left(a_2 - \frac{a_3}{t}\right) a_4 \cdot t \right] (1 - \beta_1). \quad (10)$$

Исследуем (10) на экстремум от  $t$ . Имеем

$$\frac{dK_0(t)}{dt} = \frac{1}{3} \beta_1 \cdot a_1 t^{-\frac{2}{3}} - (1 - \beta_1) \left[ \frac{a_3 \cdot a_4 t}{t^2} + a_4 \left( a_2 - \frac{a_3}{t} \right) \right], \quad (11)$$

при  $\frac{dK_0(t)}{dt} = 0$  из (11) получим

$$\frac{1}{3} \beta_1 \cdot a_1 t^{\frac{1}{3}} = (1 - \beta_1) \cdot a_2 a_4 t. \quad (12)$$

Из выражения (12) окончательно найдем:

$$t = \sqrt{\left( \frac{\beta_1 \cdot a_1}{3(1 - \beta_1) \cdot a_4 \cdot a_2} \right)^2}. \quad (13)$$

Таким образом, при толщине стенки трубопровода, вычисленной по формуле (13), принятый многокритериальный показатель  $K_0(t)$  достигает экстремума. Легко можно показать, что этот экстремум является максимумом.

С учетом (7) и (9) выражение (13) пере-  
пишем как

$$t_{opt} = \sqrt[3]{\left( \frac{\beta_1 \cdot 2.836 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_n \cdot D^{\frac{1}{3}}}{3(1-\beta_1) \cdot \sigma_n (\ell + w) \cdot 1.17} \right)^2}, \quad (14)$$

при  $\beta_1 = 0.5$  выражение (14) можно пе-  
реписать как

$$t_{opt} = \sqrt[3]{\left[ \frac{0.81 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma_n \cdot D^{\frac{1}{3}}}{\sigma_n (\ell + w)} \right]^2}. \quad (15)$$

Таким образом, согласно предлагае-  
мому методу ударно-механического воздей-  
ствия оптимальная толщина  $t_{opt}$  может быть  
вычислена по выражениям (14) и (15).

### Выводы

Предложен метод вычисления толщи-  
ны стенки трубопровода при ударно-  
механическом воздействии. Критерий опти-  
мизации, предложенный в этом методе опти-  
мального выбора толщины стенки трубы, яв-  
ляется скалярной сверткой двух частных кри-  
териев, первый из которых характеризует со-  
противляемость трубы к проколу, а второй -  
сопротивляемость к распространению трещи-  
ны.

Согласно полученному результату, оп-  
тимальная величина толщины стенки трубы  
прямо пропорциональна диаметру трубы и  
кольцевому напряжению и обратно пропор-  
циональна минимальной величине предела  
текучести, длине и ширине воздействующего  
на трубопровод зубца.

### Список литературы

1. Айнбиндер А. Методика определения тол-  
щины стенки трубопровода от внутреннего дав-  
ления на основе критерия предельных состояний  
(предложение по изменению норм проектирова-  
ния) // Наука и техника в газовой промышленно-  
сти. 2010. № 4 (44). С. 111-116.
2. Destombes B., Chassagneux D., Zarea M.,  
Mouroux P., Pruvost D. Seismic Hazard Assessment  
and Design Methodology for Steel Buried Pipelines //  
Earthquake Engineering: Materials of 12th World  
Conference. Auckland, New Zeland. 2000. P. 0697.
3. Vilkys T., Rudzinsk V., Prentkovskis O., Tretja-  
kovas J., Visniakov N., Maruschak P. Evaluation of  
Failure Pressure for Gas Pipelines with Combined  
Defects // Metals. 2018. Vol. 8. Issue 5. P. 346. DOI:  
10.3390/met8050346.
4. Ma J., Zhang F., Desjardins G. Risk-Based Mit-  
igation of Mechanical Damage // Materials of 11th  
International Pipeline Conference. Calgary, Alberto,  
Canada. 2016. IPC2016-64040. DOI:  
10.1115/IPC2016-64040.
5. Kiefner J.F. Pipeline Incidents Caused by Me-  
chanical Damage. Houston: Mechanical Damage  
Technical Workshop, 2006. 16 p.
6. Hopkins P. High Design Factor Pipelines: In-  
tegrity Issues // The Journal of Pipeline Integrity.  
2005. No. 2. P. 69-97.
7. Chatain P. An Experimental Evaluation of  
Punctures and Dents in Transmission Pipelines //  
Linepipe Research: Materials of PRC/EPRG Ninth

### References

1. Ainbinder A. Metodika opredeleniya tolshchiny  
stenki truboprovoda ot vnutrennego davleniya na os-  
nove kriteriya predel'nykh sostoyanii (predlozhenie  
po izmeneniyu norm proektirovaniya) [Method for De-  
termining the Thickness of the Pipeline Wall from In-  
ternal Pressure Based on the Criterion of Limit States  
(Proposal for Changing Design Standards)]. *Nauka i  
tekhnika v gazovoi promyshlennosti - Science and  
Technology in the Gas Industry*, 2010, No. 4 (44), pp.  
111-116. [in Russian].
2. Destombes B., Chassagneux D., Zarea M.,  
Mouroux P., Pruvost D. Seismic Hazard Assessment  
and Design Methodology for Steel Buried Pipelines.  
*Materials of 12th World Conference «Earthquake En-  
gineering»*. Auckland, New Zeland, 2000, pp. 0697.
3. Vilkys T., Rudzinsk V., Prentkovskis O., Tretja-  
kovas J., Visniakov N., Maruschak P. Evaluation of  
Failure Pressure for Gas Pipelines with Combined  
Defects. *Metals*, 2018, Vol. 8, Issue 5, pp. 346. DOI:  
10.3390/met8050346.
4. Ma J., Zhang F., Desjardins G. Risk-Based Mit-  
igation of Mechanical Damage. *Materials of 11th In-  
ternational Pipeline Conference*. Calgary, Alberto,  
Canada, 2016, IPC2016-64040. DOI:  
10.1115/IPC2016-64040.
5. Kiefner J.F. *Pipeline Incidents Caused by Me-  
chanical Damage*. Houston, Mechanical Damage  
Technical Workshop, 2006. 16 p.
6. Hopkins P. High Design Factor Pipelines: In-  
tegrity Issues. *The Journal of Pipeline Integrity*, 2005,

Joint Biennial Technical Meeting. Houston, Texas, USA, 1993.

8. Greenwood R. Pipeline Integrity Data: Management and Application // Materials of AGA Operations Conference. Dallas, Texas, USA, 2001.

9. Ларионов И.П., Хорев П.Б. Парето-оптимизация в области принятия решений при проектировании комплексной системы защиты предпринятая // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 2 (33). С. 113. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN216.pdf> (дата обращения: 02.11.2020). DOI: 10.15862/118TVN216.

No. 2, pp. 69-97.

7. Chatain P. An Experimental Evaluation of Punctures and Dents in Transmission Pipelines. *Materials of PRC/EPRG Ninth Joint Biennial Technical Meeting «Linepipe Research»*. Houston, Texas, USA, 1993.

8. Greenwood R. Pipeline Integrity Data: Management and Application. *Materials of AGA Operations Conference*. Dallas, Texas, USA, 2001.

9. Larionov I.P., Khorev P.B. Pareto-optimizatsiya v oblasti prinyatiya reshenii pri proektirovaniya kompleksnoi sistemy zashchity predprinyataya [Pareto-Optimization in Decision-Making for Complex Information Security System Engineering]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie» - Internet Journal «Naukovedenie»*, 2016, Vol. 8, No. 2 (33), pp. 113. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/118TVN216.pdf> (accessed 02.11.2020). DOI: 10.15862/118TVN216. [in Russian].

#### Автор

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

#### The Author

• 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