

Обеспечение прочности конструктивного решения при прокладке газопроводов в сейсмоопасных районах

Т.В. Ефремова, С.Э. Баландин

Волгоградский Государственный технический университет

Аннотация: В статье рассмотрено влияние сейсмической нагрузки при различной балльности на подземные полиэтиленовые газопроводы в зонах возможных землетрясений. Выявлено, что сейсмическая нагрузка является основной нагрузкой, воздействующей на подземные газопроводы. Исследовано критическое отношение радиуса изгиба к диаметру газопровода. Доказано, что при значении радиуса изгиба не менее 25 диаметров трубы газопровод сохраняет прочность в зонах с повышенной сейсмической опасностью.

Ключевые слова: подземные газопроводы, сейсмическая активность, нагрузки, радиус изгиба, прочность конструктивного решения.

Одним из критериев нормальной работы подземных инженерных сетей является устойчивость трубопроводов к различным нагрузкам за счет прочностных качеств труб. С развитием инфраструктуры малых населенных пунктов инженерные сети зачастую прокладываются в труднодоступных районах, где эксплуатация и ремонт сетей вызывают определенные трудности [1]. Поэтому в настоящее время уделяется внимание определению прочностных характеристик трубопроводов на этапе проектирования. Зачастую расчеты на прочность выполняются без учета сейсмической нагрузки.

Согласно карте общего сейсмического районирования России ОСР-16 вероятность расчетная сейсмическая интенсивность для южных регионов России варьируется от 7 (10 % вероятности) до 9 баллов (1 % вероятности) в течение 50 лет [2]. Поэтому при расчете механической прочности таких коммуникаций, как газопровод, необходимо учитывать сейсмическую нагрузку до 9 баллов.

Подземные газопроводы из полиэтилена, несмотря на присущую материалу эластичность, при типовом проектировании без анализа сейсмического воздействия уязвимы к динамическим деформациям

грунтового основания [3]. Разрушение таких систем при сейсмических событиях провоцирует экстремально опасные сценарии [4]:

- утечки и взрывы горючего газа из-за разрывов, трещин или повреждения соединений трубопровода;
- распространение пожара в результате воспламенения выходящего газа;
- прекращение подачи газа к критически важным объектам (больницы, МЧС, котельные);
- создание вторичных очагов опасности (пожары, взрывы) на пути эвакуации или спасательных работ.

Исследования показывают, что значительная часть ущерба от землетрясений связана именно с повреждениями инженерных сетей, включая газопроводы, а их восстановление часто требует больших затрат и времени, чем ремонт несущих конструкций [5].

Для подземных газопроводов ключевым сейсмическим воздействием является не горизонтальная нагрузка, как для надземных конструкций, а смещения и деформации самого грунта (сдвиги, разжижение, проседания). Поэтому при проектировании полиэтиленовых газопроводов в сейсмоопасных районах критически важны [6]:

- оценка сейсмических рисков площадки: тщательный анализ геологических условий, места прохождения трассы, потенциальных смещений грунта и уровня сейсмической опасности;
- учет сейсмических воздействий: проектирование должно обеспечивать необходимый запас прочности трубопровода для сохранения устойчивого положения при максимально прогнозируемых деформациях грунта в течение всего срока службы. Это включает выбор трассы газопровода с минимумом пересечений активных разломов и зон потенциального разжижения грунта; применение

специальных конструктивных решений (монтаж защитных футляров в зонах повышенного риска);

- учет свойств полиэтилена (гибкость, линейное удлинение при разрыве) и правильный подбор материалов (марка полиэтилена, толщина стенки трубы) для обеспечения необходимой деформационной способности.

Наибольшую сложность при определении нагрузок и воздействий на подземный газопровод представляет сейсмическая нагрузка, зависящая от нескольких критериев как постоянного, так и переменного значения [7]. Для количественной оценки применяется специализированная инженерная формула, учитывающая комплекс факторов, включая: коэффициент заземления газопровода в грунте, скорость распространения продольной сейсмической волны и сейсмическое ускорение.

$$\sigma_c = 0,04 \cdot E(t_g) \cdot \frac{m_0 a_c}{v_c}, \quad (1)$$

где $E(t_g)$ - модуль ползучести материала труб для срока службы газопровода 50 лет, МПа; m_0 - коэффициент заземления газопровода в грунте; a_c - сейсмическое ускорение, см/с²; v_c - скорость распространения продольной сейсмической волны, км/с.

Наибольшее сейсмическое воздействие на газопровод при всех остальных равных условиях возникает в песчаных грунтах (рисунок 1).

Помимо сейсмической нагрузки на подземный газопровод оказывают воздействие давление грунта, вес трубы и транспортируемого газа [8]. Расчеты показывают, что в процентном соотношении сейсмическая нагрузка составляет от 60 (при 7 баллах) до 85 (при 9 баллах) процентов от общей нагрузки на подземный газопровод и незначительно изменяется при изменении параметров газопровода и условий прокладки. То есть нагрузка от возможных деформаций почвы в результате сейсмической активности

является преобладающей. Поэтому, если инженерно-геологические изыскания содержат данные о сейсмичности исследуемого участка, то эту нагрузку необходимо включать в расчеты.

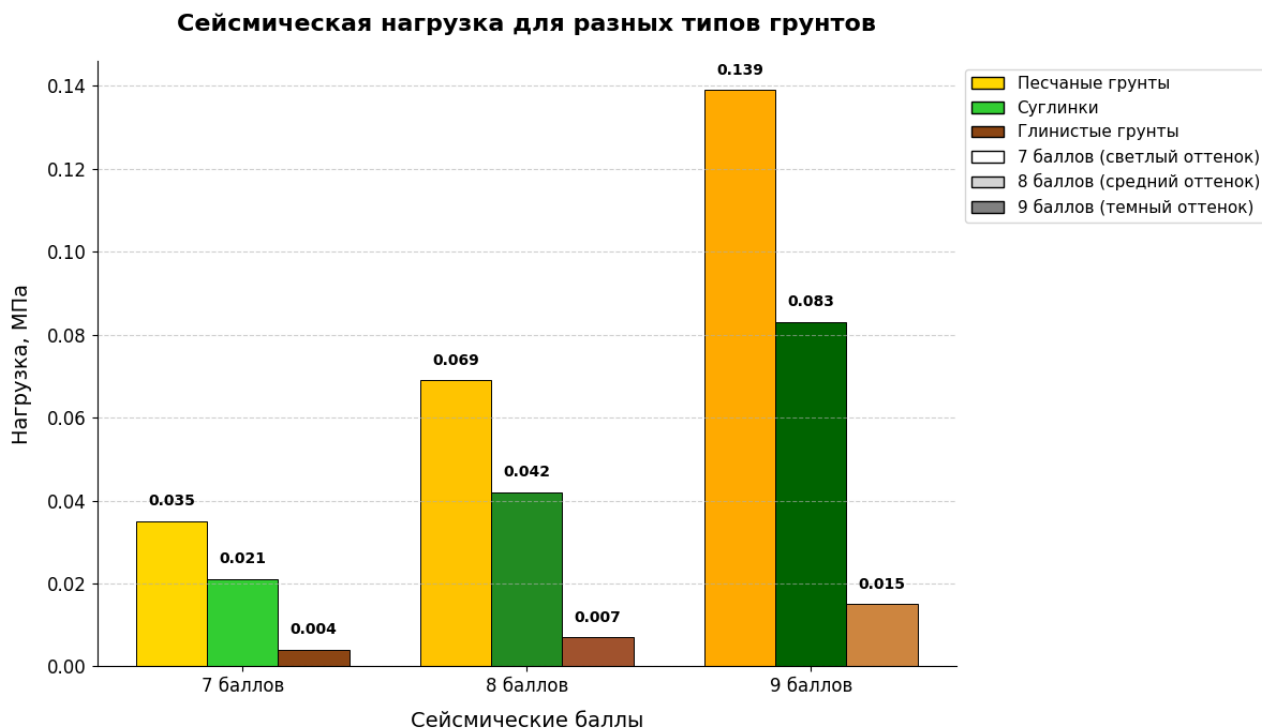


Рисунок 1. Сейсмическая нагрузка для разных типов грунтов

Проверка прочности принятого конструктивного решения согласно СП 42-103-2003 определяется по выражению:

$$\sigma_{\text{прS}} = \left[\frac{2\mu p}{\left[1 - \frac{2}{SDR}\right]^2} - \alpha E(t_e) \Delta t \right] + \frac{E(t_e) d_e}{2\rho} + \sigma_c, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона материала труб (для полиэтилена равен 0,43); p – рабочее давление в газопроводе, МПа; SDR – стандартное размерное отношение номинального наружного диаметра к номинальной толщине стенки трубы; α – коэффициент линейного теплового расширения материала труб (для полиэтилена $2,2 \cdot 10^{-4}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)); Δt – диапазон

температуры эксплуатации, °C; d_e – наружный диаметр трубы, м; ρ – радиус изгиба трубы, м.

Для выполнения условия прочности необходимо выполнение условия

$$\sigma_{npS} \leq MRS, \quad (3)$$

где MRS – показатель минимальной длительной прочности полиэтилена, использованного для изготовления труб, МПа (для полиэтилена ПЭ 100 равен 10,0).

Наибольшее влияние на прочность подземной конструкции помимо сейсмической нагрузки оказывает радиус изгиба газопровода. Газопровод при прокладке подземным способом может иметь изгибы как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях [9]. Изгибы в горизонтальной плоскости наблюдаются при выполнении углов поворота трассы свободным изгибом. Вертикальные изгибы выполняются или при резком изменении геодезических отметок трассы, или при прокладке газопровода закрытым способом методом наклонно-направленного бурения (ННБ). В любом случае при изгибе должно соблюдаться неравенство $\rho \geq 25d_e$, то есть радиус изгиба должен быть больше диаметра, не менее чем в 25 раз [10].

Исследования условий, обеспечивающих прочность конструктивного решения с учетом сейсмической нагрузки, показывают, что при различных крайних условиях прокладки газопровода в зонах с различной сейсмической балльностью минимальное соотношение радиуса изгиба и диаметра равно 16,4 (рисунок 2), то есть запас прочности составляет 34,4 процента. При этом расчеты произведены для следующих условий:

- 1) давление 1,2 МПа, грунт – суглинок, 7 баллов сейсмичности,

$$\sigma_c = 0,021 \text{ МПа};$$

2) давление 1,2 МПа, грунт – песок, 9 баллов сейсмичности,
 $\sigma_c = 0,139$ МПа;

3) давление 1,2 МПа, грунт – глина, 7 баллов сейсмичности,
 $\sigma_c = 0,004$ МПа.

Соотношение p/d_e при различных значениях сейсмической нагрузки sigma

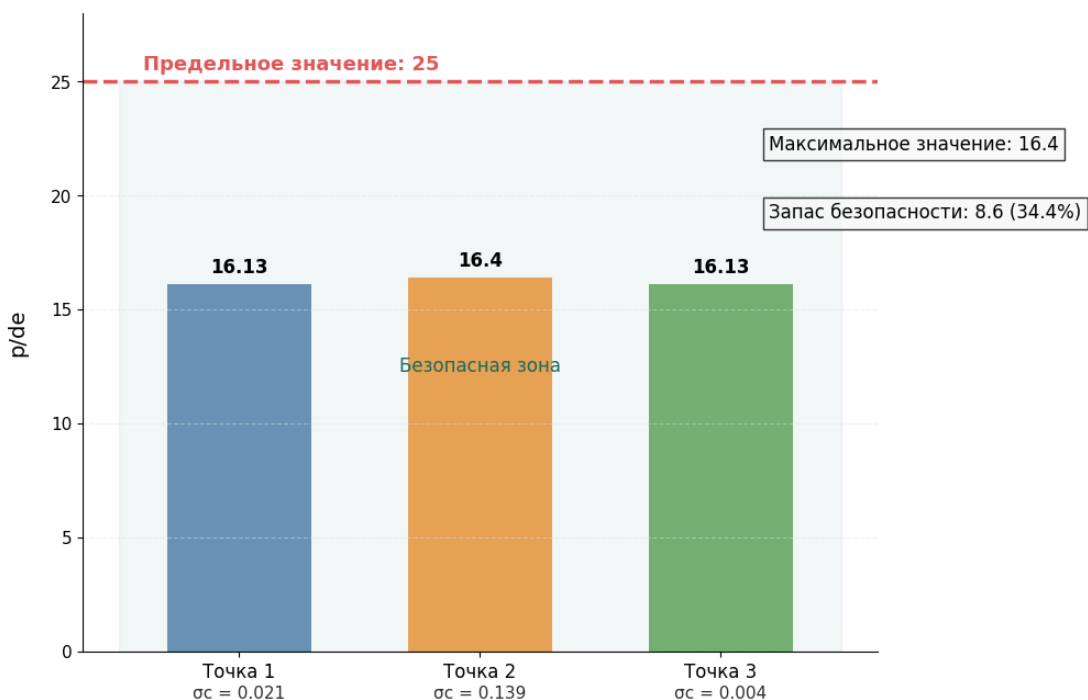


Рисунок 2. Минимальное значение $\frac{p}{d_e}$ для обеспечения прочности

газопровода с учётом сейсмической нагрузки

Таким образом, исследование показало, что нормируемое значение радиуса поворота трубопровода $25d_e$ обеспечивает прочность полиэтиленового трубопровода при транспортировке природного газа давлением до 1,2 МПа в сейсмоопасных зонах с прогнозируемым землетрясением до 9 баллов при прокладке в песчаных грунтах.

Литература

1. Alaska Pipeline Explosion! Earth Island Journal. 1998. Т. 14. № 1. p. 21. URL: elibrary.ru/keyword_items.asp?id=1744963&show_option=0.
2. Наваррете, Д.Д.Х. Особенности строительства трубопроводов в районах с высокой сейсмичностью: дис. канд. техн. наук: 05.03.13 / Д.Д.Х. Наваррете. – Уфа, 2013. – 163 с.
3. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Гаптлисламова К.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104
4. Гостинин И. А., Вирясов А. Н., Семенова М. А. Анализ аварийных ситуаций на линейной части магистральных газопроводов // Инженерный вестник Дона, 2013, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1618
5. Гумеров, Р.А. Научно-методическое обоснование системы автоматизированного мониторинга магистральных нефтепроводов на сейсмоопасных участках: дис. канд.техн. наук: 28.04.17 / Р.А. Гумеров. – Уфа: УГНТУ, 2017. – 174 с.
6. Lamkie A.J., Davis D. Night Into Day: The Edison, New Jersey, Gas Pipeline Explosion. Fire Engineering Journal. 1995. Т.148. № 5. p.p. 34-42. URL: elibrary.ru/item.asp?id=2367660.
7. Ефремова Т.В., Богиян Д.С. Определение сейсмической нагрузки при воздействии на надземные стальные газопроводы // Инженерный вестник Дона, 2023, № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8488
8. Zimmer H.I. Calculating optimum pipeline operations. Technical Report Presented at the 1975 AGA Transmission Conference, El Paso Natural Gas Company, 1975. 324 p.

9. Каргин В.Ю., Бухин В.Е., Вольнов Ю.Н. Полиэтиленовые газовые сети: Материалы для проектирования и стр-ва; ГипроНИИГаз. - Саратов: Приволж. кн. изд-во, 2001. – 399 с.
10. Фигаров Э.Н. Разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния трубопровода в зонах активных тектонических разломов с целью обеспечения его безопасной эксплуатации: дис. канд.техн. наук: 19.02.15 / Э.Н. Фигаров. – М.: РГУ им. Губкина, 2014. – 127 с.

References

1. Alaska Pipeline Explosion! Earth Island Journal. 1998. Т. 14. № 1. p. 21. URL: [elibrary.ru keyword_items.asp?id=1744963&show_option=0](http://elibrary.ru/keyword_items.asp?id=1744963&show_option=0).
2. Navarrete, D.D.H. Osobennosti stroitel'stva truboprovodov v rajonah s vysokoj sejsmichnost'yu [Features of pipeline construction in areas with high seismic activity]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.03.13 D.D.H. Navarrete. Ufa, 2013. 163 p.
3. Prokopov A.Yu., Akopyan V.F., Gaptlislamova K.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 4. URL: [ivdon.ru ru magazine archive n4y2013 2104](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104)
4. Gostinin I. A., Viryasov A. N., Semenova M. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 2. URL: [ivdon.ru ru magazine archiv n2y2013 1618](http://ivdon.ru/ru/magazine/archiv/n2y2013/1618)
5. Gumerov, R.A. Nauchno-metodicheskoe obosnovanie sistemy avtomatizirovannogo monitoringa magistral'nyh nefteprovodov na sejsmoopasnyh uchastkah [Scientific and methodological justification of the automated monitoring system for main oil pipelines in seismically hazardous areas]: dis. kand.tekhn. nauk: 28.04.17 R.A. Gumerov. Ufa: UGNTU, 2017. 174 p.
6. Lamkie A.J., Davis D. Fire Engineering Journal. 1995. Т.148. № 5. pp. 34-42. URL: [elibrary.ru item.asp?id=2367660](http://elibrary.ru/item.asp?id=2367660).
7. Efremova T.V., Bogiyan D.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 6. URL: [ivdon.ru ru magazine archive n6y2023 8488](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8488)
- 8 Zimmer H.I. Calculating optimum pipeline operations. Technical Report



Presented at the 1975 AGA Transmission Conference, El Paso Natural Gas Company, 1975. 324 p.

9 Kargin V.Yu., Buhin V.E., Vol'nov Yu.N. Polietilenovye gazovye seti: Materialy dlya proektirovaniya i str-va [Polyethylene gas networks: Materials for design and construction]; GipronIIgaz. Saratov: Privolzh. kn. izd-vo, 2001. 399 p.

10 Figarov Je.N. Razrabotka metodiki ocenki naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija truboprovoda v zonah aktivnyh tektonicheskikh razlomov s cel'ju obespechenija ego bezopasnoj jekspluatacii [Development of a methodology for assessing the stress-strain state of a pipeline in areas of active tectonic faults in order to ensure its safe operation]: dis. kand.tehn. nauk: 19.02.15 Je.N. Figarov. M.: RGU im. Gubkina, 2014. 127 p.

Дата поступления: 17.06.2025

Дата публикации: 26.07.2025