

Сравнительный анализ устойчивости стального и полимерного трубопроводов на сейсмическое воздействие

В.И. Воляник, А.В. Переверзев, Е.А. Сиятсков, И.А. Томарева

*Институт архитектуры и строительства (ИАУС)
Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)*

Аннотация: Сейсмическая активность зон, через которые проложены трубопроводы, всегда вызывала серьезную озабоченность. Анализ аварийных ситуаций на трубопроводных системах, вызванных землетрясением, выявил факторы, влияющие на их устойчивость: продольное и поперечное смещение грунта, эффект разжижения грунта, разломы, в результате которых возникают открытые трещины и сдвиговые деформации. Для предотвращения повреждения трубопроводов при сейсмическом воздействии необходимо учитывать характер воздействия на конструкцию трубопровода, требуемый уровень безопасности для данного сейсмического воздействия. В настоящее время особое внимание уделяется конструктивным решениям и материалам, из которых выполнены трубопроводы. Проведенные исследования позволяют сформировать подход к оценке работоспособности полиэтиленовых и стальных трубопроводов в сейсмоопасных районах, и на основе сравнительного анализа их устойчивости дать рекомендации по применению трубопроводов в заданных условиях.

Ключевые слова: углеводороды, анализ, трубопровод, надежность, сейсмическое воздействие, деформация, композитные материалы.

Обеспечение надежности трубопроводных систем является задачей многофакторной. Необходимо учесть климатические, топографические, инженерно-геологические, гидрологические условия строительства, материал труб, методы укладки и т.д. [1].

Проведенный анализ аварийных ситуаций на трубопроводах, транспортирующих углеводороды в сейсмоактивных зонах, позволил выявить ряд причин, влияющих на устойчивость конструкции. На надежность конструкции влияние оказывают возникающие напряжения, вызывающие такие деформации трубы, как смятие, продольный изгиб и гофрообразование, а также пластические свойства материала труб [2, 3].

В таблице 1 представлены некоторые статистические данные о причинах возникновения аварий, повреждений и внешнего воздействия на трубопроводы в сейсмоопасных районах [4].

Таблица 1

Повреждения трубопроводов в результате сейсмического воздействия

Район землетрясения	Год	Магнитуда	Последствия сейсмического воздействия
Аляска (США)	1964	9.2	Произошел разрыв газопроводов в зонах разломов. Большая часть повреждений трубопровода произошла из-за оползней и растрескивания грунта
Эквадор	1987	6.9	Землетрясение привело к разрушению более 40 км Трансэквадорского газопровода, с доказательствами значительного ущерба из-за оползней и разжижения грунта
Чи Чи (Тайвань)	1999	7.7	Подземные газопроводы подверглись заглубленной деформации изгиба из-за смещения грунта
Вэньчуань (Китай)	2008	8.0	Стальные трубопроводы транспорта газа были сильно повреждены оползнями и селями в результате землетрясения

Актуальность исследования обусловлена необходимостью предотвратить возникновение аварийных ситуаций, способных нанести большой экономический и экологический урон [5, 6].

В настоящее время нефтегазовые компании по всему миру все больше внимания уделяют внедрению трубопроводных систем из композитных материалов (табл. 2) [7,8]. Трубы из полимеров обладают рядом преимуществ перед стальными: коррозионная стойкость, стойкость к циклическим нагрузкам, низкая стоимость производства и затрат на эксплуатацию, сниженный риск загрязнения окружающей среды. Однако, анализируя данные, представленные в таблице 2, необходимо отметить, что на данный момент полимерные трубы, выпускаемые в России, отстают по техническим характеристикам от зарубежных аналогов. Но заинтересованность в

применении трубопроводных систем из композитных материалов у российских нефтегазовых компаний возрастает с каждым годом, а это значит, что в самое ближайшее время данные трубопроводы смогут составить конкуренцию стальным.

Таблица 2

Основные производители композитных труб

Компания	Ассортимент	Давление, МПа	Температура, °С
NOV-Fiberspar NOV-Fiberspar (США)	Диаметр 50-254 мм, армирование высокопрочными нитями	до 13,8	до 104,4
FlexSteel (США)	Диаметр 50-203 мм, стальное армирование	от 5,0 до 20,6	до 80
America Flex (США)	Диаметр 50-157 мм, армирование нитями или сталью	от 0,2 до 0,3	до 45
Polyflow (США)	Диаметр 101-152 мм, армирование нитями	до 3,5	до 65
Soluforce (Нидерланды)	Диаметр 101-177 мм, армирование нитями	до 8,0	до 100
Airborne (Нидерланды)	Диаметр 25-101 мм, широкий ассортимент	до 20,2	до 95
IVG (Италия)	Инновационные материалы	до 1,0	до 70
ANACONDA (Россия)	Диаметр 74-160 мм, армирование трубы полиэфирными малоусадочными нитями с повышенной адгезией	от 1,2 до 4,0	до 65
Геотехнологии (Россия)	Диаметр 22-89 мм, армирование нитями с наружной полимерной оболочкой	от 1,0 до 2,0	до 70
СибМашПолимер (Россия)	Диаметр 50-600 мм, армирование с металлическим каркасом	до 4,0 от 1,0	до 80

В нашем исследовании мы провели сравнительный анализ трубопроводов, выполненных из стали и полимера, на устойчивость к сейсмическому воздействию, а именно, взаимодействию конструкции «трубопровод-грунт» при возникновении остаточного смещения и разжижения грунта, прохождения через разломы в сейсмоактивных зонах. Данные сейсмические нагрузки приводят к возникновению открытых трещин и сдвиговых деформаций, что особенно опасно для трубопроводов, уложенных под землей [9, 10].

Одна из задач, решаемая в рамках исследования, - это определение деформаций стального и полимерного трубопроводов с учетом эксплуатационных и сейсмических нагрузок.

Условием устойчивости трубопроводных систем в данном случае является:

$$\varepsilon_{\text{сейсм}} + \varepsilon_{\text{эксп}} \leq \varepsilon_{\text{допуст}} (\%), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{допуст}}$ - допустимая деформация трубы (10 %); $\varepsilon_{\text{сейсм}}$ - деформация трубы из-за сейсмического воздействия (%); $\varepsilon_{\text{эксп}}$ - эксплуатационная деформация трубы (%), которая равна:

$$\varepsilon_p + \varepsilon_t + \varepsilon_{\text{нагр}}, \quad (2)$$

где ε_p - деформация трубы из-за внутреннего давления (%); ε_t - температурная деформация трубопровода (%); $\varepsilon_{\text{нагр}}$ - деформация трубопровода от внешних нагрузок (%).

Для сравнительного исследования были приняты трубы диаметром 90 мм с толщиной стенки 8,2 мм при прочих равных условиях. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Проведенные исследования позволяют сформировать подход к оценке работоспособности полиэтиленовых и стальных трубопроводов в условиях землетрясений.

Таблица 3

Деформации трубопроводов из стали и композитного материала (полиэтилен) с учетом эксплуатационных и сейсмических нагрузок

Нагрузки	Стальной трубопровод		Полиэтиленовый трубопровод	
	Деформация от нагрузки, %	Полная деформация ($\varepsilon_{\text{эксп}} + \varepsilon_{\text{сейсм}}$), %	Деформация от нагрузки, %	Полная деформация ($\varepsilon_{\text{эксп}} + \varepsilon_{\text{сейсм}}$), %
Эксплуатационные	0,039		2,52	
Сейсмические:				
- продольное остаточное смещение грунта;	0,015	0,054	3,5	6,02
- поперечное остаточное смещение грунта	0,11	0,149	0,11	2,63
- разжижение грунта;	0,008	0,047	1,2	3,72
- сдвиговый разлом;	6,25	6,289	6,25	8,77
- разлом сброса	4,47	4,509	4,47	6,99

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что условие устойчивости трубопроводных систем выполняется, т.е. $\varepsilon_{\text{сейсм}} + \varepsilon_{\text{эксп}} < 10\%$. Следовательно, композитные трубопроводы в сейсмоопасных зонах обладают достаточной гибкостью и, наравне со стальными, не подвергаются разрушению под воздействием динамических нагрузок.

При сопоставимости результатов воздействия динамических (сейсмических) нагрузок со стальными трубопроводами, полиэтиленовые обладают рядом достоинств: экономичность, экологичность (существенное снижение риска загрязнения окружающей среды), высокая скорость и разнообразие используемых методов укладки, что позволяет рекомендовать их к применению в таких ответственных районах строительства, как сейсмоопасные зоны.

Литература

1. Онищенко А.О., Аль-Машвали С.М., Томарева И.А. Анализ технологий строительства подземных нефтегазопроводов в сейсмически опасных районах // Инженерный вестник Дона. 2021. № 6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7042.
 2. Напетваридзе Ш.Г., Гехман А.С. и др. Сейсмостойкость магистральных трубопроводов и специальных сооружений нефтяной и газовой промышленности. М.: Наука. 1980. 170 с.
 3. Котляревский В.А. Оценка прочности и надежности сейсмостойкости магистральных трубопроводов как упругих и упругопластических систем // Наука и безопасность. 2012. № 3. С. 127-152.
 4. Baum R.L., Devin L.G., Edwin L.H. Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines: open-file report. U.S. Geological Survey, 2008. 202 p.
 5. Александров А.А., Ларионов В.И., Гумеров Р.А. Методы анализа сейсмического риска с учетом вторичных техногенных аварий на объектах нефтегазового комплекса // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 4 (98). С. 165-175.
 6. Honegger D.G., Wijewickreme D. Seismic risk assessment for oil and gas pipelines // Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems, 10.1533/9780857098986.4.682, 2013, pp. 682-715.
 7. Гулин Д.А., Карпова К.Е., Глазков А.С., Насибуллин Т.Р. О применении труб из полимерных материалов для промысловых трубопроводов // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18, № 6. С. 107-115.
 8. Габова М.А. Применение композиционных материалов при добыче нефти и газа // Вестник университета. 2012. № 10. С. 88–92.
 9. Гехман А.С., Зайнетдинов Х.Х. Расчёт, конструирование трубопроводов в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1988. 184 с.
-

10. Андреева Е.В. Разработка методики оценки несущей способности подземных магистральных трубопроводов в сейсмически опасных зонах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.19. М., 2009. 24 с.

References

1. Onishhenko A.O., Al'-Mashvali S.M., Tomareva I.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2021/7042.
 2. Napetvaridze Sh.G., Gehman A.S. i dr. Sejsmostojkost' magistral'nyh truboprovodov i special'nyh sooruzhenij neftjanoy i gazovoj promyshlennosti [Seismic resistance of main pipelines and special structures of the oil and gas industry]. М.: Nauka. 1980. 170 p.
 3. Kotljarevskij V.A. Nauka i bezopasnost'. 2012. № 3. pp. 127-152.
 4. Baum R.L., Devin L.G., Edwin L.H. Landslide and Land Subsidence Hazards to Pipelines: open-file report. U.S. Geological Survey, 2008. 202 p.
 5. Aleksandrov A.A., Larionov V.I., Gumerov R.A. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov. 2014. № 4 (98). pp. 165-175.
 6. Honegger D.G., Wijewickreme D. Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems. 10.1533/9780857098986.4.682. 2013. pp. 682-715.
 7. Gulin D.A., Karpova K.E., Glazkov A.S., Nasibullin T.R. Neftegazovoe delo. 2020. T. 18, № 6. pp. 107-115.
 8. Gabova M.A. Vestnik universiteta. 2012. № 10. pp. 88–92.
 9. Gegman A.S., Zaynetdinov H.H. Raschet, konstuirovaniye i ekspluatatsiya truboprovodov v seismicheskikh rayonah [Calculation, design and operation of pipelines in seismic areas] М.: Stroyizdat, 1988. 184 p.
 10. Andreeva E.V. Razrabotka metodiki ocenki nesushhej sposobnosti podzemnyh magistral'nyh truboprovodov v seismicheskii opasnyh zonah [Development of a methodology for assessing the bearing capacity of underground
-



main pipelines in seismically hazardous areas]: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk:
25.00.19. М., 2009. 24 p.