

ПОВЕДЕНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНОВОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ: МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Юрий Хрустов, Евгений Бутринов,
Владислав Коврига

Землетрясения могут вызывать серьезные повреждения подземных трубопроводов. Можно привести ряд примеров крупных землетрясений – в Лома Приета (Калифорния) в 1989 г., в Кобе (Япония) в 1995 г. и др., – которые нанесли большой урон системам водо- и газоснабжения и канализации, но в то же время выявили преимущества полиэтиленовых труб.

Поэтому Группа ПОЛИПЛАСТИК начала работу по созданию Стандарта организации (СТО) на полиэтиленовые трубы и фитинги, которые можно применять в сейсмоопасных районах, и Руководящих технических материалов (РТМ) по расчету полиэтиленовых трубопроводов при работе в сейсмических районах, основанных на действующих европейских стандартах и стандартах других стран. Были изучены зарубежные нормативные документы и источники, содержащие рекомендации по проектированию и строительству трубопроводов в сейсмоопасных районах [1-5].

В этих стандартах выделены основные виды нагружения, характерные для подземных трубопроводов в условиях землетрясения, описаны основные факторы воздействия на трубопроводы и существующие методы учета сейсмических воздействий при проектировании. Ниже приводятся упрощенные описания процедур оценки эффекта сейсмического воздействия на подземный трубопровод.

Изученные стандарты позволяют сформировать подход к оценке работоспособности полиэтиленовых трубопроводов в условиях землетрясений.

Трубопроводы, как и другие объекты строительства, представляют собой конструкции, которые рассчитываются на сохранение работоспособности в условиях землетрясения – либо полной, либо частичной, в зависимости от категории объекта. Поэтому для обеспечения живучести трубопроводов необходимо не только подобрать материалы с необходимым комплексом свойств, но и обеспечить проектировщика необходимыми данными о свойствах полиэтиленовых труб, позволяющими спроектировать работоспособный в конкретных условиях проекта (виды грунтов, глубина заложения и т.д.) трубопровод. Эта задача выполняется в разрабатываемом СТО.

Факторы, воздействующие на подземные трубопроводы в сейсмических районах

Основные сейсмические опасности, которые оказывают непосредственное воздействие на трубопровод, связаны либо с воздействием сейсмических волн, либо со смещениями грунта. Смещения грунта могут быть следствием разломов либо оползневых явлений и оказывают более существенное воздействие на трубопроводы, чем сейсмические волны.

Стойкость трубопровода к осевой нагрузке во многом зависит от его конструкции. Трубопроводы, соединяемые сваркой (стальные, полиэтиленовые) обладают высоким сопротивлением к осевым нагрузкам, и при оценке их устойчивости к смещениям грунта рассматривают деформации труб. Для трубопроводов с раструбными соединениями (чугунные, ПВХ) рассматривают относительное смещение труб. В данной статье рассматриваются только сварные напорные полиэтиленовые трубопроводы.

При проектировании трубопроводных систем должны быть учтены все возможные сейсмические опасности. Деформация трубопровода не должна превышать допустимых значений, определяемых по формуле:

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

где

$\varepsilon_{\text{допуст}}$ – допустимая деформация трубопровода (%);

$\varepsilon_{\text{сейсм}}$ – деформация трубопровода из-за сейсмической опасности (%);

$\varepsilon_{\text{эксп}}$ – эксплуатационная деформация трубопровода (%), равная $\varepsilon_p + \varepsilon_t + \varepsilon_{\text{нагр}}$ где

ε_p – деформация трубопровода из-за внутреннего давления (%);

ε_t – деформация трубопровода из-за температурного изменения (%);

$\varepsilon_{\text{нагр}}$ – деформация трубопровода от внешних нагрузок (%).

Анализ взаимодействия трубопровода с грунтом предполагает, что грунт не разрушается, но его смещения вызовут силы трения в зоне взаимодействия трубопровода с грунтом.

Упруго-пластическая модель, предложенная О'Роурке в 1995 г. [5], которая часто принимается при оценке деформирующей силы в зоне трубопровода и грунта, полностью определена двумя параметрами: максимальной осевой силой, действующей на единицу длины трубопровода, и смещением трубопровода относительно грунта. Относительное смещение мало, и поэтому им пренебрегают.

Максимальная осевая сила, действующая на единицу длины трубопровода (t_u , кН/м), зависит от типа вмещающего грунта. Она может быть вычислена по формуле [1]:

$$t_u = \pi D c \alpha + \pi D H \bar{\gamma} \frac{1 + K_0}{2} \tan \delta' \quad (\text{кН/м}), \quad (2)$$

где

D – наружный диаметр трубопровода (м);
 c – коэффициент сцепления грунта траншеи (кПа);
 H – высота от оси трубопровода до поверхности земли (м);
 $\bar{\gamma}$ – эффективный удельный вес грунта (кН/м³);
 α – коэффициент адгезии, равный:

$$\alpha = 0,608 - 0,123c - \frac{0,274}{c^2 + 1} + \frac{0,695}{c^2 + 1}, \quad (3)$$

где c имеет размерность кПа/100;
 δ' – угол трения между трубой и грунтом ($^\circ$), равный $\phi \cdot f$;
 ϕ – угол внутреннего трения грунта ($^\circ$);
 f – коэффициент трения между трубой и грунтом, который зависит от материала трубы (для полиэтилена $f = 0,6$);
 K_0 – коэффициент бокового давления грунта на трубопровод, равный $K_0 = 1 - \sin \phi$

Оползневые смещения грунта могут приводить к образованию структур растяжения, таких как открытые трещины в головной (вверх по склону) части разрушенного участка, сдвиговых деформаций в краевых частях и структур сжатия, таких как продольный изгиб, во фронтальной части области разрушения. При пересечении трубопроводом такой зоны необходимо определить длину участка трубопровода в пределах области деформаций, а также направление движений грунта и их распределение по величине вдоль трассы трубопровода.

Трубопровод может пересечь зону оползня в любом направлении, однако при проектировании трубопровода необходимо рассмотреть два крайних случая – когда направление смещения грунта параллельно оси трубопровода (продольное смещение) и перпендикулярно ей (поперечное смещение).

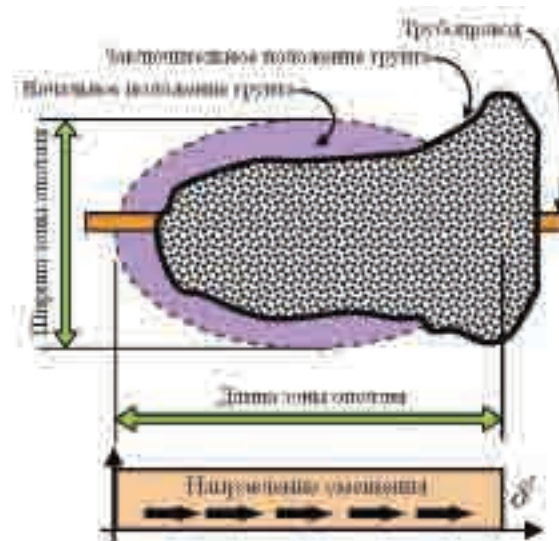
Анализ землетрясений показывает, что оползни – одна из главных сейсмических опасностей, которая может вызвать существенное повреждение трубопроводов.

Деформации, вызванные оползнем, будут наибольшими у его краев.

Воздействие продольного оползневого смещения на полиэтиленовые трубопроводы

В самом неблагоприятном случае продольное движение грунта однородно по всей зоне оползня (рис. 1).

Рис. 1. Продольное оползневое смещение



При моделировании поведения полиэтиленового трубопровода при продольном оползневом воздействии рассматривают два случая.

Случай 1: При большом смещении грунта (δ'), деформация трубопровода определяется длиной оползневой зоны.

Максимальная осевая деформация трубопровода может быть вычислена как [1]:

$$\varepsilon_s = \frac{t_u L}{2\pi D t E} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где

t_u – максимальная осевая сила, действующая на единицу длины трубопровода (2);
 D – внешний диаметр трубопровода (м);
 t – толщина стенки трубопровода (м);
 E – модуль упругости материала (МПа);
 L – длина оползневой зоны (м).

Случай 2. Длина оползневой зоны большая, и деформация трубопровода определяется смещением грунта (δ').

Максимальная осевая деформация трубопровода может быть вычислена как:

$$\epsilon_s = \frac{t_u L_e}{\pi D t E} \cdot 100\% \tag{5}$$

где

L_e – эффективная длина трубопровода, подверженная действию t_u

Эффективная длина трубопровода L_e (м), подверженная действию t_u , может быть найдена по следующей формуле:

$$L_e = \sqrt{\frac{\delta^t \pi D t E}{t_u}} \tag{6}$$

Деформация трубопровода из-за сейсмической опасности ($\epsilon_{сейсм}$) от продольного оползневого воздействия должна быть взята, как **меньшая** из полученных по формулам (4) и (5). Полученная величина подставляется в формулу (1) для оценки допустимых деформаций.

Воздействие поперечного оползневого смещения на полиэтиленовые трубопроводы

Когда полиэтиленовый трубопровод подвержен поперечной деформации грунта (рис. 2), он будет изгибаться. Максимальная изгибающая деформация трубопровода может произойти либо в центре, либо около краев поперечно перемещающейся массы грунта (рис. 2) и может быть вычислена по формуле:

$$\epsilon_b = \pm \frac{\pi D \delta^t}{W^2} \cdot 100\% \tag{7}$$

где

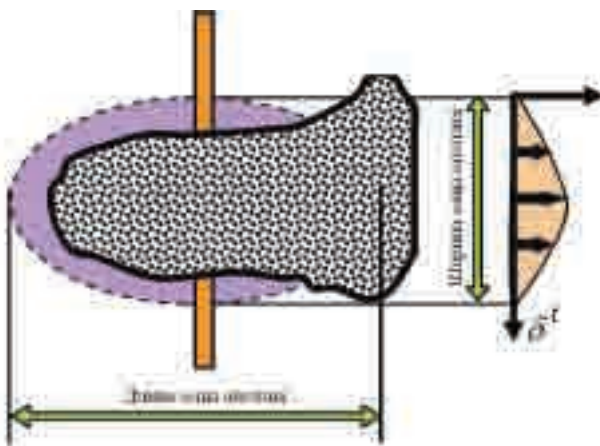
D – внешний диаметр трубопровода (м);

W – ширина оползневой зоны (м);

δ^t – поперечное смещение грунта (м).

Деформация, полученная по формуле (7), является деформацией трубопровода из-за сейсмической

Рис. 2. Поперечное оползневое смещение



опасности ($\epsilon_{сейсм}$) и может быть использована для подтверждения допустимых деформаций, описанных формулой (1).

Анализ поведения полиэтиленового трубопровода при пересечении разлома

Серьезную опасность для трубопровода представляют смещения грунта, обусловленные разломами.

Смещение грунта по разлому описывается сдвигом (параллельным разлому), сжатием (перпендикулярным разлому), а также вертикальной составляющей смещения.

Величина смещения разлома зависит от типа разлома, силы землетрясения и геологических особенностей местности.

Смещение разлома может быть оценено следующим образом:

для разлома сброса (рис. 3, а):

$$\lg \delta_{fn} = -4,45 + 0,63M \tag{8}$$

для разлома взброса (рис. 3, б):

$$\lg \delta_{fr} = -0,74 + 0,08M \tag{9}$$

для сдвигового разлома (рис. 3, в):

$$\lg \delta_s = -6,32 + 0,90M \tag{10}$$

для невидимого подповерхностного разлома (рис. 3, г):

$$\lg \delta_{fn} = -4,80 + 0,69M \tag{11}$$

где

δ_{fn} – смещение разлома сброса (м);

δ_{fr} – смещение разлома взброса (м);

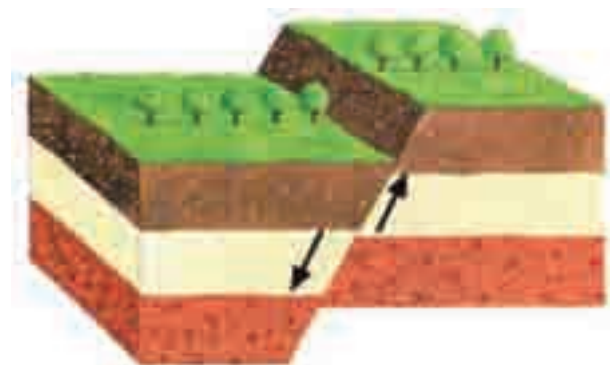
Рис. 3. Виды разломов:

а – сброс;

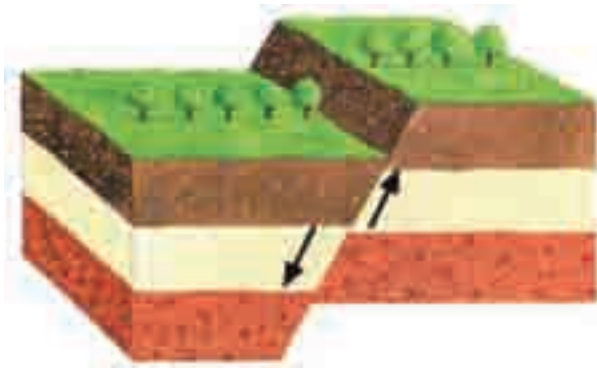
б – взброс;

в – сдвиг;

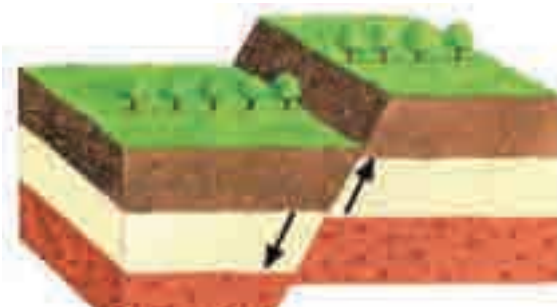
г – невидимый подповерхностный разлом.



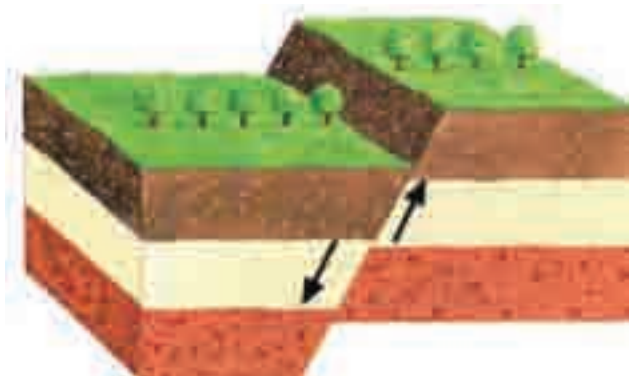
а)



б)



в)



г)

δ_{fs} – смещение сдвигового разлома (м);
 δ_{fb} – смещение невидимого подповерхностного разлома (м);
 M – момент магнитуды землетрясения (балл).

Для сдвигового разлома движение разлома вдоль и поперек трубопровода (рис. 4) может быть оценено следующим образом.

Осевая составляющая смещения сдвигового разлома может быть рассчитана по формуле:

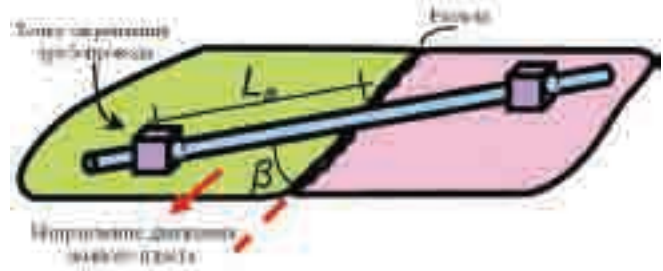
$$\delta_{fax} = \delta_{fs} \cos\beta \quad (12)$$

где β – угол, под которым трубопровод пересекает линию разлома (°).

Поперечная составляющая смещения сдвигового разлома может быть рассчитана по формуле:

$$\delta_{ftr} = \delta_{fs} \sin\beta \quad (13)$$

Рис. 4. Полиэтиленовый трубопровод, пересекающий сдвиговый разлом



Для смещения сбросового разлома (рис. 5) движение разлома относительно трубопровода может быть получено следующим образом.

Осевая составляющая смещения:

$$\delta_{fax} = \delta_{fn} \cos\psi \sin\beta \quad (14)$$

ψ – угол падения разлома (°).

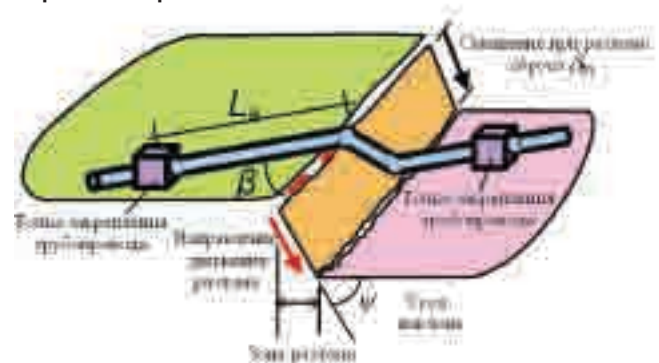
Поперечная составляющая смещения:

$$\delta_{ftr} = \delta_{fn} \cos\psi \cos\beta \quad (15)$$

Вертикальная составляющая смещения:

$$\delta_{fv} = \delta_{fn} \sin\psi \quad (16)$$

Рис. 5. Подземный трубопровод, пересекающий сбросовый разлом



Аналогично рассчитываются составляющие смещения для других видов разломов.

Если движения трубопровода относительно грунта во время землетрясения не происходит, то проектирование следует производить по предельным деформациям, а не по предельным напряжениям.

Расчет по предельным деформациям для оценки способности трубопровода под давлением выдерживать смещения на разломах допускает пластические деформации, не ведущие к нарушению целостности трубопровода.

Средняя деформация трубопровода при пересечении разлома может быть вычислена как:

$$\epsilon = 2 \left[\frac{\delta_{fv}}{2L_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_{fv}}{2L_n} \right)^2 \right] \cdot 100\% \quad (17)$$

где

L_a – длина от точки закрепления трубопровода до разлома (эффективная незакрепленная длина, м), которая может быть взята, как **меньшее** из следующих значений:

а) при отсутствии около зоны разлома точек фиксации трубопровода (поворотов, ответвлений и т.п.) эффективная длина ненадежно закрепленного трубопровода может быть рассчитана как [1]:

$$L_a = \frac{E \epsilon_y \pi D t^2}{t_u} \quad (18)$$

где

t_u – максимальная сила, действующая на полиэтиленовый трубопровод в осевом направлении, определенная по формуле (2);

ϵ_y – пластическая деформация материала трубопровода (%);

E – модуль упругости материала трубопровода (МПа);

D – внешний диаметр трубопровода (м);

t – толщина стенки трубопровода (м);

б) при наличии около зоны разлома точки фиксации трубопровода (поворота, ответвления и т.п.) эффективная незакрепленная длина равна длине трубопровода от этой точки до линии разлома.

Деформацию, полученную по формуле (17), необходимо считать деформацией трубопровода из-за сейсмической опасности ($\epsilon_{сейсм}$), и использовать для подтверждения допустимых критериев деформации, описанных формулой (1).

При наличии сведений о положении предполагаемых линий разломов следует руководствоваться следующими рекомендациями:

- 1) положение трубопровода при пересечении предполагаемого разлома должно по возможности быть таким, чтобы трубопровод при землетрясении подвергался растяжению и умеренному изгибу. Положения, при котором трубопровод подвергался бы сжатию, следует по возможности избегать, потому что способность трубопровода противостоять сжимающим деформациям без разрушения значительно меньше, чем при растяжении. Трубопроводы следует прокладывать относительно прямыми секциями, избегая резких изменений направления;
- 2) трубопровод не должен иметь никаких концентраторов напряжений в пределах предполагаемой зоны пересечения с разломом;
- 3) угол пересечения трубопроводом разломов взброса должен быть как можно меньше, чтобы минимизировать сжимающие деформации. Если ожидаются существенные смещения сдвигового разлома,

то угол пересечения трубопровода с разломом должен быть выбран таким образом, чтобы способствовать его растяжению;

- 4) в зонах разлома глубина укладки трубопровода должна быть минимизирована, чтобы уменьшить воздействие грунта на трубопровод во время движения разлома;
- 5) повороты трассы трубопровода должны находиться как можно дальше от зоны предполагаемого разлома;
- 6) увеличение толщины стенки трубопровода повышает устойчивость трубопровода к деформациям грунта;
- 7) уменьшение трения между трубопроводом и грунтом повышает устойчивость трубопровода к деформациям грунта.

Приведенные схемы расчета, взятые из действующих нормативных документов ЕС, США, Мексики и Индии, показывают, что в настоящее время в нормативных документах достаточно точно сформулированы методы расчета поведения трубопроводов в условиях землетрясений. В таблице 1 приведены показатели свойств материалов, которыми необходимо обеспечить проектировщиков, для выполнения расчетов.

Результаты расчетов показывают, что из полиэтилена могут быть созданы трубопроводы, работоспособные в условиях землетрясений.

Литература

1. Dash, S.R. and Jain, S.K., IITK-GSDMA Guidelines for seismic design of buried pipelines: provisions with commentary and explanatory examples, 2007, National Information Center of Earthquake Engineering, Kanpur, India.
2. Seismic Guidelines for Water Pipelines, A report by public-private partnership between Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS), American Lifelines Alliance (ALA). - G & E Report 80.01.01, Revision 0, March, 2005.
3. Eurocode (2006), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 4: Silos, tanks and pipelines, European Committee for Standart.
4. Flores-Berrones, R. and Liu, X., Seismic vulnerability of buried pipelines, Geofisica International, 2002, Vol. 42, p. 237-246.
5. O'Rourke, M.J. and Liu, X, Response of Buried Pipelines Subject to earthquake Effects, Monograph Number 5, 1999 Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, SUNY-buffalo, New York.

Таблица 1. Перечень показателей для расчета работоспособности трубопровода в условиях землетрясения

Свойства материала	Наименование стандарта, по которому проводят испытание (ASTM)	Показатели, входящие в формулы для расчета работоспособности трубопровода в условиях землетрясения
Плотность	D 792	
Предел текучести при растяжении	D 638	Предел текучести материала (σ_y)
Относительное удлинение при разрыве	D 638	Деформация разрушения при растяжении (ϵ_u)
Разрушающее напряжение при растяжении	D 638	
Относительное удлинение при пределе текучести	D 638	Допустимая деформация ($\epsilon_{\text{допуст}}$); критическая растягивающая деформация ($\epsilon_{\text{cr-c}}$) деформация при пределе текучести (ϵ_y)
Модуль упругости при растяжении	D 638	Модуль упругости материал (E); модуль упругости материала до текучести (E _i); модуль упругости материала после текучести (E _p)
Модуль упругости при изгибе	D 790	
Изгибающее напряжение при 5% деформации	D 790	
Ударная прочность при разрыве и без разрыва	D 256	
Твердость по Роквеллу	D 785	
Коэффициент линейного термического расширения	D 696	Коэффициент линейного термического расширения (α)
Температура размягчения под нагрузкой	D 648	
Коэффициент Пуассона	Методы по ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»	Коэффициент Пуассона (μ)
Относительная деформация при пределе текучести при сжатии	D 695, D 621	Допустимая деформация ($\epsilon_{\text{допуст}}$); Критическая сжимающая деформация ($\epsilon_{\text{cr-c}}$)