

ООО "Группа ПОЛИПЛАСТИК"

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ



УТВЕРЖДАЮ

Президент ООО "Группы
ПОЛИПЛАСТИК"

М.И. Гориловский

07 06 2010

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ НА СЕЙСМОАКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

РТМ ПО 5-2010

Дата введения с 07 06 2010

СОГЛАСОВАНО



Директор

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

Ю.П. Назаров

03 06 2010

Зав. Лабораторией

сейсмостойких конструкций

А.В. Грановский

РАЗРАБОТАНО

Технический директор

ООО "Группа ПОЛИПЛАСТИК"

Е.В. Бутринов

03 06 2010

Директор по научной работе

АНД "Газтрубпласт"

В.В. Коврига

03 06 2010

Инженер

ООО "Группа ПОЛИПЛАСТИК"

М.Ю. Михайлов

03 06 2010

Ведущий инженер

Н.Б. Галиулина

03 06 2010

Москва
2010

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

УТВЕРЖДАЮ

Президент ООО “Группы
ПОЛИПЛАСТИК”

_____ М.И. Горилловский

___ _____ 2010

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА ДЛЯ
ПРИМЕНЕНИЯ НА СЕЙСМОАКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

РТМ ПО 5-2010

Дата введения с _____ 2010

СОГЛАСОВАНО

Директор
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко
_____ А.В. Грановский
___ _____ 2010

РАЗРАБОТАНО

Технический директор
ООО “Группа ПОЛИПЛАСТИК”
_____ Е.В. Бутринов
___ _____ 2010

Директор по научной работе
АНД “Газтрубпласт”
_____ В.В. Коврига
___ _____ 2010

Инженер
ООО “Группа ПОЛИПЛАСТИК”
_____ М.Ю. Михайлов
___ _____ 2010

Ведущий инженер
_____ Н.Б. Галиулина
___ _____ 2010

Москва
2010

Содержание

1 Область применения	5
2 Общие положения	5
2.1 Классификация трубопроводов.....	5
2.2 Классификация грунтов	6
2.3 Сейсмические опасности.....	7
3 Проектное землетрясение и проектные сейсмические опасности для различных функциональных классов трубопроводов	8
3.1 Определение скоростей и ускорений грунта при землетрясении.....	9
3.1.1 Соотношение между ПСГ и ПУГ.....	10
4 Взаимодействие трубы с грунтом	11
4.1 Метод конечных элементов подземных трубопроводов.....	11
4.2 Моделирование подземных трубопроводов.....	12
4.3 Свойства смоделированных пружин грунта при взаимодействии трубы с грунтом.....	13
4.3.1 Определение осевой пружины грунта.....	13
4.3.2 Определение боковой пружины грунта.....	14
4.3.3 Определение вертикальной пружины грунта.....	15
4.4 Вертикальное опускание.....	16
4.5 Вертикальный подъем.....	16
5 Пример 1 – Вычисление сил грунта при взаимодействии с полиэтиленовым трубопроводом	17
5.1 Напряженно-деформированное состояние трубопровода.....	17
5.1.1 Деформации трубопровода.....	19
5.1.2 Напряжения, возникающие в полиэтиленовом трубопроводе от внутреннего давления и температуры.....	19
5.1.3 Температурные напряжения в трубопроводе.....	19
5.1.4 Вертикальная грунтовая нагрузка.....	20
5.1.5 Поверхностные нагрузки.....	20
5.1.6 Деформация трубопровода от внешних нагрузок.....	21
5.1.7 Допустимые деформации полиэтиленового трубопровода в сейсмических районах.....	22
6 Пример 2 – Вычисление эксплуатационной деформации трубопровода и деформации трубопровода от внешних нагрузок	22
6.1 Пространственно-распределённое остаточного смещения грунта (ОСГ)	23
6.1.1 Воздействие латерального растекания грунтов при их разжижении на полиэтиленовый трубопровод при землетрясении.....	23
6.1.2 Анализ поведения подземного трубопровода при оползнях.....	25
6.1.3 Проектирование трубопровода при пространственно-распределенном ОСГ.....	25
6.1.4 Воздействие продольного пространственно-распределенного ОСГ на	

полиэтиленовый трубопровод.....	27
7 Пример 3 – Расчет трубопровода при продольном ОСГ.....	28
7.1 Воздействие поперечного пространственно-распределенного ОСГ на полиэтиленовый трубопровод.....	29
8 Пример 4 – Расчет трубопровода при поперечном ОСГ.....	30
8.1 Мероприятия по уменьшению воздействия ОСГ на полиэтиленовый трубопровод.....	31
8.2 Воздействие выталкивающей силы на полиэтиленовый трубопровод при разжижении грунта.....	31
9 Пример 5 – Расчет трубопровода при разжижении грунта.....	32
9.1 Рекомендации по уменьшению плавучести полиэтиленового трубопровода.....	33
9.2 Анализ поведения полиэтиленового трубопровода при пересечении разлома.....	33
10 Пример 6 - Расчет трубопровода при пересечении разломов.....	38
10.1 Воздействие сейсмических волн на полиэтиленовый трубопровод.....	40
10.1.1 Анализ трубопровода при сейсмическом распространении волн.....	40
10.1.2 Проектное движение грунта.....	41
10.1.3 Очевидная скорость распространения волн.....	41
10.1.4 Определение деформаций трубопровода при сейсмическом распространении волн.....	43
11 Пример 7 – Расчет трубопровода при сейсмическом распространении волн.....	44
11.1 Рекомендации по уменьшению воздействия сейсмических волн на полиэтиленовый трубопровод.....	45
Библиография.....	45

1 Область применения

Настоящий Руководящий Технический Материал (РТМ) устанавливает методы расчётов трубопроводов из полиэтилена – газопроводов, водопроводов, трубопроводов для транспортирования горячей воды и отопления, канализации, применяемых на сейсмоактивных территориях с учётом многих сейсмических опасностей. Определённые сейсмические опасности (например, цунами, архитектурный подъём, понижение и т. д.) не указаны в настоящем документе, и для них должны быть выполнены специальные расчёты, приведённые в других документах.

2 Общие положения

При проектировании трубопроводных систем для сейсмоактивных районов необходимо знать следующие данные, связанные:

1. с проектируемым трубопроводом:
 - а) геометрию трубы (наружный диаметр, толщина);
 - б) напряженно-деформированное состояние материала трубы;
 - в) рабочее давление в трубе;
 - г) температуру укладки и эксплуатации.
2. с участком строительства трубопровода:
 - а) глубину укладки трубопровода;
 - б) основные свойства грунта: удельный вес, угол трения между трубой и грунтом;
 - в) свойства засыпанного грунта;
 - г) наличие грунтовых вод и глубина их прохождения;
 - д) наличие транспортной нагрузки.
3. с сейсмической опасностью территории строительства:
 - а) величину ожидаемого количества сейсмического колебания грунта на участке;
 - б) ожидаемую величину остаточного смещения грунта (ОСГ) и ее пространственное распределение;
 - в) длину трубопровода, подверженную воздействию ОСГ;
 - г) местоположение активных разломов; ожидаемую величину смещения разлома, и ориентацию трубопровода относительно направления движения разлома.

2.1 Классификация трубопроводов

Трубопроводы подразделяют на 4 класса согласно их функциональным требованиям следующим образом:

Класс I. Очень существенные водопроводы, газопроводы высокого давления, которые должны оставаться в функциональном состоянии во время и после проектного землетрясения.

В случае повреждения или разрушения трубопроводов, относящихся к I классу важности, возможны многочисленные человеческие жертвы и может быть причинен огромный вред окружающей среде.

Класс II. Ответственные водопроводы, служащие большому сообществу, в случае повреждения или разрушения которых оказывается существенное воздействие на экономику и человеческие жизни.

К данному классу относятся газопроводы среднего давления

Класс III. Большинство водопроводов обычного использования, газопроводы низкого давления.

Класс IV. Водопроводы, которые имеют низкую или небольшую важность для людей в случае повреждения, и, которые не требуют быстрого ремонта после сейсмического случая.

2.2. Классификация грунтов

Грунты делятся на типы A, B, C, D, и E, которые описаны соответствующими стратиграфическими профилями и параметрами, данными в таблице 1, и могут использоваться, чтобы определить влияние местных условий грунта на их сейсмическое воздействие на полиэтиленовый трубопровод. Это может также быть сделано, дополнительно принимая во внимание влияние глубокой геологии.

Таблица 1 - Классификация грунтов

Класс грунта	Тип грунта	Скорость сдвигающей волны V_s , м/с	Неосушенная сдвигающая прочность грунта S_u , кН/м ²	Стандартное сопротивление проницаемости N , Н
A	Крепкая порода	$V_s > 1500$	-	-
B	Каменистый	$760 < V_s < 1500$	-	-
C	Очень плотный	$360 < V_s < 760$	$S_u > 98$	$N > 50$
D	Плотный или жесткий	$180 < V_s < 360$	$49 < S_u < 98$	$15 < N < 50$
E	Рыхлый и сыпучий	$V_s < 180$	$S_u < 49$	$N < 15$
	Мягкий с $PI^* > 10$ и с естественным влагосодержанием $\geq 40\%$		$S_u < 24$	
F**	Уязвимый для потенциального разрушения при сейсмической нагрузке, например, разжижаемый грунт, слабоцементируемый). Торф или органические глины ($H > 3$ м, где H – толщина грунта), пластичные глины ($H > 7,5$), плотные глины ($H > 35$ м)			

* PI – индекс пластичности грунта.
 ** Грунт требует специального исследования.

Участок должен быть классифицирован согласно среднему значению скорости сдвигающей волны \bar{V}_s , если это доступно, иначе должно использоваться стандартное сопротивление проницаемости N .

Если грунт содержит несколько различных слоев, то скорость распространения волны рассчитывается следующим образом:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \text{ (м/с)}, \quad (1)$$

где

\bar{V}_s – усредненная сдвигающая скорость волны для слоистого грунта, м/с;

n - количество разнородных слоев;

d_i - толщина $i^{\text{го}}$ слоя грунта, м;

V_{si} – сдвигающая скорость волны в $i^{\text{ом}}$ слое м/с.

Усредненная неосушенная сдвигающая прочность слоистого грунта рассчитывается как:

$$\bar{S}_u = \frac{d_c}{\sum_{i=1}^k \frac{d_{ci}}{S_{ui}}} \text{ (кПа)}, \quad (2)$$

где S_{ui} – неосушенная сдвигающая прочность в $i^{\text{х}}$ связанных слоях (кН/м²).

k - количество разнородных слоев;

d_c - полная толщина связанных слоев грунта (м);

d_{ci} - толщина $i^{\text{го}}$ слоя грунта (м);

S_{ui} – неосушенная сдвигающая прочность в $i^{\text{х}}$ связанных слоях (кН/м²).

Усредненное стандартное сопротивление проникновения для слоистого грунта N в N определяется по формуле:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \text{ (Н)}, \quad (3)$$

где

n - количество слоев грунта;

d_i - толщина $i^{\text{го}}$ слоя грунта (м);

N_i – стандартное сопротивление проникновения в $i^{\text{й}}$ слой грунта (Н).

2.3 Сейсмические опасности

Сейсмический анализ опасностей – важный шаг при проектировании трубопроводных систем на территориях склонных к землетрясениям.

Основные сейсмические опасности, описанные в настоящих руководящих технических принципах, которые оказывают непосредственное воздействие на трубопровод, классифицируются на:

1. ОСГ:

1.1 Пространственно-распределенное (возникает при латеральном растекании грунтов из-за их разжижения и при оползнях):

1.1.1 Деформация продольного профиля грунта;

1.1.2 Деформация поперечного профиля грунта.

1.2 Резкое (разломы);

2. Смещение грунта, связанное с сейсмическим распространением волн.

В большинстве случаев сейсмические опасности не могут быть определены количественно точно, поэтому необходимо основываться на доступных данных и опыте, чтобы определить надлежащую модель для сейсмической опасности.

При проектировании систем трубопроводов ОСГ оказывает более существенное воздействие на полиэтиленовые трубопроводы, чем воздействие сейсмически распространяющейся волны.

3. Проектное землетрясение и проектные сейсмические опасности для различных функциональных классов трубопроводов

Рекомендуемое проектное землетрясение для различных функциональных классов трубопроводов берется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 - Рекомендуемые проектные землетрясения для различных классов трубопроводов

Класс трубопровода	Вероятность возможного превышения интенсивности землетрясения за 50 лет	Период повторяемости (года)
I	2%	2475
II	5%	975
III	10%	475
IV	Сейсмическое действие не учитывается	

Проектные сейсмические опасности для различных классов трубопроводов могут быть вычислены путем умножения фактора важности (I_p), данного в таблице 3, на проектное землетрясение.

Таблица 3 - Фактор важности для различных классов трубопроводов (I_p)

Класс трубопровода	Сейсмические волны	Разломы	Продольное и поперечное ОСГ	Оползни
I	1,5	2,3	1,5	2,6
II	1,25	1,5	1,35	1,6
III	1,0	1,0	1,0	1,0
IV	*	*	*	*

* - сейсмические опасности не учитываются

3.1 Определение скоростей и ускорений грунта при землетрясении

Для различных классов грунтов пиковая скорость грунта (ПСГ) может быть найдена по следующей формуле:

$$ПСГ = F_v \cdot ПСГ_B \text{ (см/с)}, \quad (4)$$

где

F_v – корректирующий коэффициент грунта, определенный по таблице 4;

$ПСГ_B$ - ПСГ для грунтов класса В.

Таблица 4 - Корректирующий коэффициент (F_v) от $ПСГ_B$

Класс грунта	Корректирующий коэффициент F_v от PGV_B				
	$ПСГ_B \leq 10 \text{ см/с}$	$ПСГ_B = 20 \text{ см/с}$	$ПСГ_B = 30 \text{ см/с}$	$ПСГ_B = 40 \text{ см/с}$	$ПСГ_B \geq 50 \text{ см/с}$
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
D	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
E	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
F	-	-	-	-	-

Различная регистрация движения грунта, полученная при разнообразных геологических параметрах в течение многих землетрясений, обеспечивает определение пикового ускорения грунта (ПУГ) от ПУГ для грунта класса В ($ПУГ_B$), как дано в таблице 5.

Таблица 5 - Корректирующий коэффициент для максимального ускорения движения грунта в зависимости от типа грунта

Класс грунта	Отношение ПУГ/ПУГ _В				
	ПУГ _В ≤0,1g	ПУГ _В =0,2g	ПУГ _В =0,3g	ПУГ _В =0,4g	ПУГ _В =0,5g
A	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,5	1,0	1,0
D	1,6	1,4	1,8	1,1	1,0
E	2,5	1,7	2,8	0,9	0,9
F	-	-	-	-	-

3.1.1 Определение ПСГ от ПУГ

Когда известно только ПУГ, может использоваться таблица 6, чтобы оценить ПСГ на участке, в зависимости от момента магнитуды землетрясения (M_w) и горизонтального расстояния до источника землетрясения.

Таблица 6 - Отношение между ПСГ и ПУГ

Момент магнитуды землетрясения (M_w)		ПСГ (см/с)/ПУГ (g)		
		Горизонтальное расстояние до источника землетрясения		
		0-20 км	20-50 км	50-100 км
Скальный грунт	6,5	66	76	86
	7,5	97	109	97
	8,5	127	140	152
Жесткий грунт	6,5	94	102	109
	7,5	140	127	155
	8,5	180	188	193
Мягкий грунт	6,5	140	132	142
	7,5	208	165	201
	8,5	269	244	251

ПУГ_В должно быть взято из отчетов геофизических исследований территории строительства, либо по сейсмическим картам. Если это невозможно сделать, то можно применять переводную таблицу 7.

Таблица 7 - Значение ПУГ_В в зависимости от интенсивности землетрясения

Интенсивность, балл	ПУГ _В , %g	Сила землетрясения
1	<0,17	Не ощущается
2-3	0,17-1,4	Слабое

4	1,4-3,9	Умеренное
5	3,9-9,2	Довольно сильное
6	9,2-18	Сильное
7	18-34	Очень сильное
8	34-65	Разрушительное
9	65-124	Опустошительное
>10	>124	Катастрофическое

4 Взаимодействие трубы с грунтом

4.1 Метод конечных элементов подземных трубопроводов

Взаимодействие подземного трубопровода с грунтом - комплексная проблема. Во время землетрясения, нелинейное поведение грунта сложно. Эта сложность главным образом приписана грунту, а не трубе. Анализируя подземные трубопроводы, рекомендуется использовать модель метода конечных элементов, которая лучше всего представляет нелинейность системы. Есть несколько моделей, чтобы представить взаимодействие трубы с грунтом. Они включают:

- (а) модель Континуума, где строгая математическая формулировка разработана для гибкой трубы конечной длины, уложенной в полубесконечный грунт;
- (б) модель конечных элементов грунта, где смоделирована сложная нелинейность системы;
- (в) модель балки на упругом основании (BNWF), где грунт представлен независимыми пружинами, сконцентрированными в отдельных положениях трубы.

Среди вышеупомянутых моделей, модель BNWF используется на практике из-за ее простоты, математического удобства и способности введения нелинейности. Модель BNWF для подземных трубопроводов представлена ниже.

В модели BNWF фактическое трехмерное взаимодействие трубы с грунтом (рисунок 1) может быть идеально смоделировано, как опора трубы на нелинейной пружине грунта, как показано на рисунке 2. Труба может быть смоделирована, как трехмерный оболочковый элемент или как два размерных элемента балки в зависимости от геометрии трубопровода и условия нагружения. Грунт, окружающий трубу, смоделирован как нелинейные пружины. В основном используются четыре типа пружин, чтобы смоделировать окружающий грунт:

- а) осевая пружина грунта представляет сопротивление грунта по поверхности трубы вдоль ее длины;
- б) поперечная пружина грунта представляет боковое сопротивление грунта к движению трубы;
- в) вертикальная опорная пружина представляет вертикальное сопротивление грунта у основания трубы;

г) вертикальная пружина подъема представляет вертикальное сопротивление грунта сверху трубы.

Свойства вышеупомянутых пружин грунта детализированы в разделе “Моделирование подземных трубопроводов”.

Анализируя трубопровод для ОСГ, обычно предполагается, что развитие деформации грунта постепенно. Следовательно, псевдостатический анализ предпочтен для трубопроводов, подвергнутых ОСГ. Деформация грунта задана в неподвижных концах пружин грунта. Эффектами демпфирования и инерции пренебрегают в данном анализе.

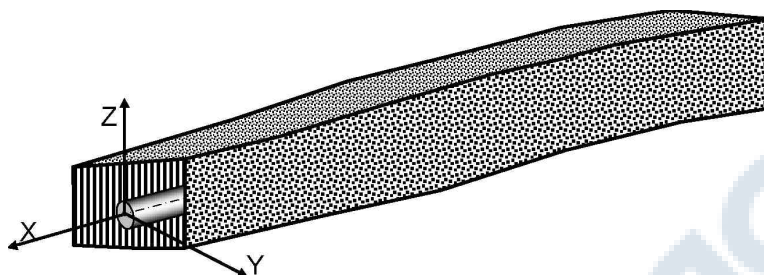


Рисунок 1 — Фактическое трехмерное взаимодействие трубы с грунтом

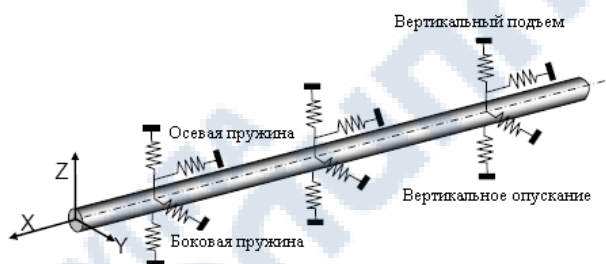


Рисунок 2 — Модель BNWF, представляющая взаимодействие трубы и грунта

4.2 Моделирование подземных трубопроводов

В подземных трубопроводах поперечная и вращательная жесткость в стыке равна или больше жесткости материала трубы. Следовательно, трубопровод можно рассматривать как непрерывную балку. Схематично модель BNWF непрерывного трубопровода для деформации грунта и вибрации в продольном и в поперечном направлении показана на рисунках 3—6.

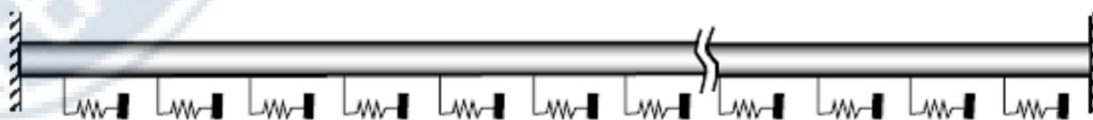


Рисунок 3 — Модель взаимодействия трубы с грунтом для продольной деформации грунта

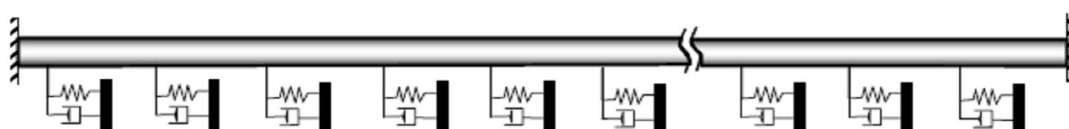


Рисунок 4 — Модель взаимодействия трубы с грунтом для осевой вибрации

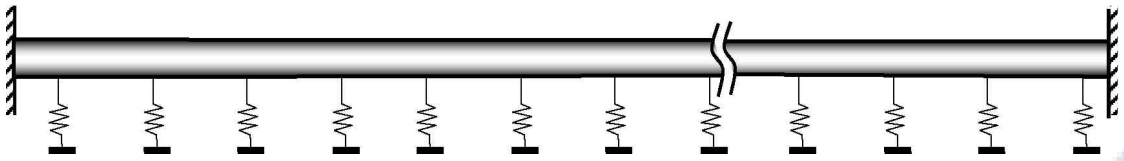


Рисунок 5 — Модель взаимодействия трубы с грунтом для поперечной деформации грунта

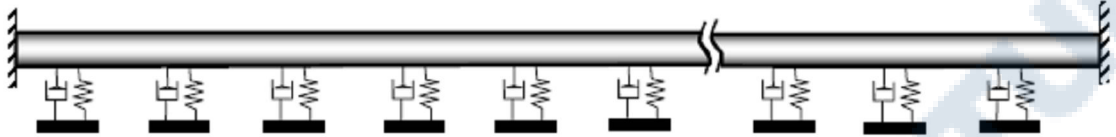


Рисунок 6 — Модель взаимодействия трубы с грунтом для поперечной вибрации

4.3 Свойства смоделированных пружин грунта при взаимодействии трубы с грунтом

4.3.1 Определение осевой пружины грунта

Когда мы говорим о взаимодействии трубы с грунтом, мы предполагаем, что грунт не разрушается, но смещения грунта произведут силы трения в зоне их взаимодействия.

Рис. 7 показывает идеализированное представление осевой пружины грунта.

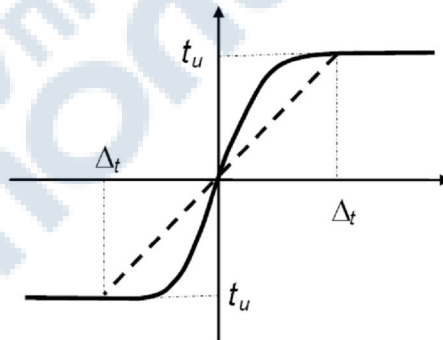


Рисунок 7 — Идеализированное представление осевой пружины грунта

Максимальная осевая сила, действующая на единицу длины трубопровода t_u в Кн/м, зависит от типа грунта, окружающего трубу. Она может быть вычислена по формуле приведенной ниже:

$$t_u = \begin{cases} \pi D \alpha S_u & \text{для глины;} \\ \frac{\pi D}{2} \gamma_d H_c (1 + K_0) \tan(k\phi) & \text{для песка,} \end{cases} \quad (5)$$

где

D – наружный диаметр трубопровода, м;

S_u – неосушенная сдвигающая прочность грунта, кН/м² (таблица 1);

γ_d – удельная плотность грунта, кН/м^3 ;

H_c – высота от оси трубопровода до поверхности земли, м;

δ – угол трения между трубой и грунтом ($^\circ$), который определяется как $\phi \chi f$;

ϕ – угол трения грунта ($^\circ$);

f – фактор трения между трубой и грунтом, который зависит от материала трубы (для полиэтилена $f=0,6$);

K_0 – коэффициент бокового давления грунта на трубопровод, который равен $1 - \sin \phi$

α – фактор сцепления, определенный по рисунку — 8

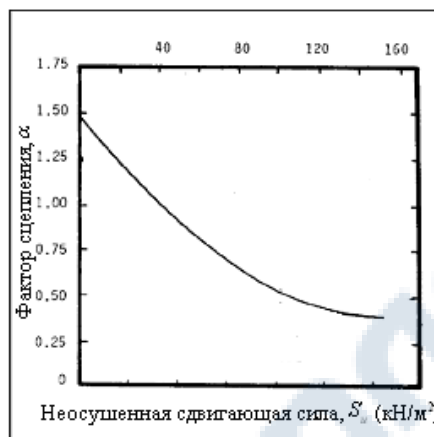


Рисунок 8 — Фактор сцепления в зависимости от сдвигающей силы волны

Смещение грунта (Δt) от t_u составляет:

$$\Delta t = \begin{cases} 3 \text{ мм} - \text{ для плотного песка;} \\ 5 \text{ мм} - \text{ для рыхлого песка;} \\ 8 \text{ мм} - \text{ для жесткой глины;} \\ 10 \text{ мм} - \text{ для мягкой глины.} \end{cases} \quad (6)$$

4.3.2 Определение поперечной пружины грунта

Свойства поперечной пружины грунта определены по рисунку-9.

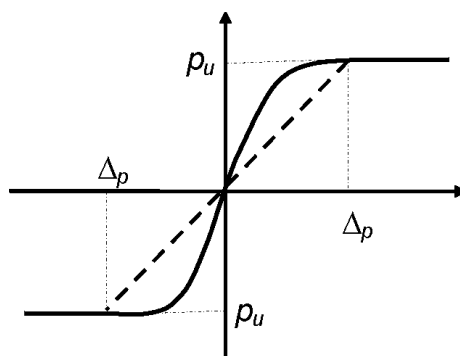


Рисунок 9 — Идеализованное представление боковой пружины грунта

Максимальная поперечная сила ρ_u в кН/м , действующая на единицу длины трубопровода, может быть найдена как:

$$p_u = \begin{cases} S_u N_{ch} D & \text{для глины;} \\ \gamma_d H_c N_{qh} D & \text{для песка,} \end{cases} \quad (7)$$

где

S_u, γ_d, H_c, D – то же, как и в формуле (5)

N_{qh} – горизонтальный фактор допустимой нагрузки для песка (равен 0 при $\phi = 0$) (рис. 10);

N_{ch} – горизонтальный фактор допустимой нагрузки для глины ($\phi = 0$) (рис. 10).

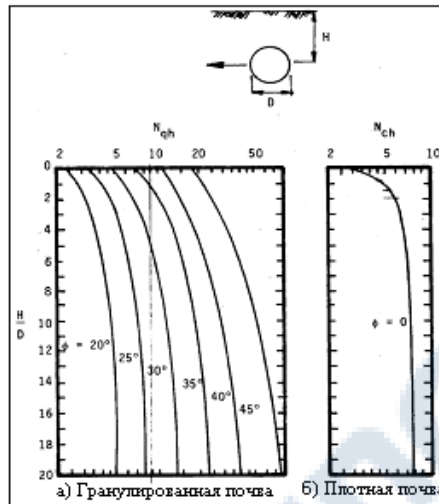


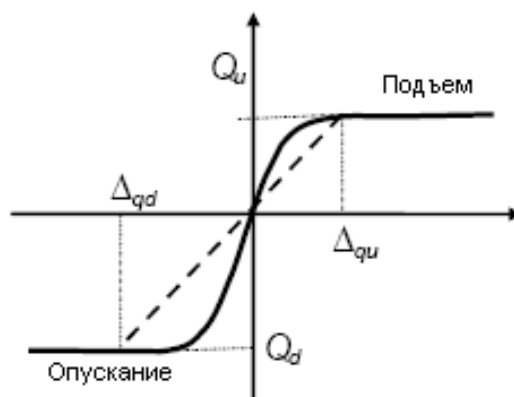
Рисунок 10 — Горизонтальный фактор допустимой нагрузки для песка и глины, как функция глубины укладки трубопровода к отношению его диаметра

Смещение грунта (Δp) от p_u составляет:

$$\Delta p = \begin{cases} 0,07 \div 0,1 \left(H_c + \frac{D}{2} \right) & \text{для рыхлого песка;} \\ 0,03 \div 0,05 \left(H_c + \frac{D}{2} \right) & \text{для среднего песка;} \\ 0,02 \div 0,03 \left(H_c + \frac{D}{2} \right) & \text{для плотного песка;} \\ 0,03 \left(H_c + \frac{D}{2} \right) & \text{для жесткой глины;} \\ 0,05 \left(H_c + \frac{D}{2} \right) & \text{для мягкой глины.} \end{cases} \quad (8)$$

4.3.3 Определение вертикальной пружины грунта

Свойства пружины грунта различных случаев положения подъема (рисунок- 11).



вертикальной пружины различны для и

Рисунок 11 — Идеализированное представление вертикальной пружины грунта

4.4 Вертикальное опускание

Максимальная вертикальная сила опускания q_d в Кн/м, действующая на единицу длины трубопровода, может быть определена следующим образом:

$$q_d = \begin{cases} S_u N_c D & \text{для глины;} \\ \gamma_d H_c N_q D + \frac{\gamma_d D^2 N_\gamma}{2} & \text{для песка,} \end{cases} \quad (9)$$

где N_c , N_q , N_γ - коэффициенты опускания, определенные по рисунку 12.

Смещение грунта (Δ_{qd}) от q_d может быть взято как:

$$\Delta_{qd} = 0,1D \div 0,15D \text{ - для песка и глины.} \quad (10)$$

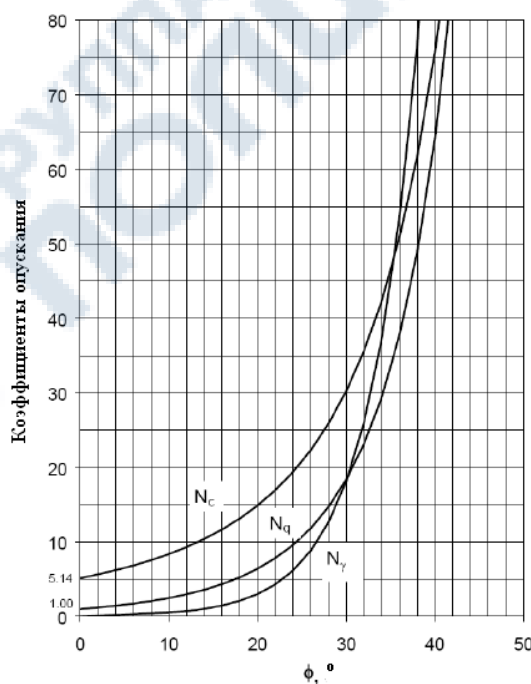


Рисунок 12 — Коэффициенты опускания для различных грунтов

4.5 Вертикальный подъем

Максимальная вертикальная сила подъема q_u в Кн/м, действующая на единицу длины трубопровода, может быть найдена как:

$$q_u = \begin{cases} S_u N_{cv} D - \text{ для глины;} \\ \gamma_d H_c N_{qv} D - \text{ для песка,} \end{cases} \quad (11)$$

где

N_{cv} – вертикальный фактор подъема для глины, который равен:

$$N_{cv} = 2 \left(\frac{H_c}{D} \right) \leq 10 \quad (12)$$

N_{qv} – вертикальный фактор подъема для песка, который равен:

$$N_{qv} = \left(\frac{\phi H_c}{44D} \right) \leq N_q \quad (13)$$

Смещение грунта (Δ_{qu}) от q_u составляет:

$$\Delta_{qu} = \begin{cases} 0,01H_c \div 0,015H_c - \text{ для песка;} \\ 0,1H_c \div 0,2H_c - \text{ для глины,} \end{cases} \quad (14)$$

5. Пример 1 – Вычисление сил грунта при взаимодействии с полиэтиленовым трубопроводом

Прокладываемый подземный полиэтиленовый трубопровод внешним диаметром 90 мм. засыпается песком с удельной плотностью $\gamma_d = 15 \text{ кН/м}^3$. Угол трения грунта составляет 30° . Высота засыпки (H) от верха трубопровода до поверхности грунта составляет 1 м.

Необходимо определить свойства грунтовых пружин (максимальная нагрузка и смещение), представляющих взаимодействие трубопровода с грунтом в а) осевом; б) поперечном; и в) вертикальном направлениях.

Решение:

а) осевая грунтовая пружина.

Максимальная осевая нагрузка, действующая на единицу длины трубопровода от песка, по формуле (5) составляет:

$$t_u = 3,14 \cdot 0,09 \cdot 1,045 \cdot 15 \cdot \frac{1 + (1 - \sin 30^\circ)}{2} \tan 0,6 \cdot 30^\circ = 1,08 \text{ кН/м.}$$

Смещение грунта (Δt) от t_u по формуле (6) составляет 5 мм.

Нагрузка и смещение грунта в осевом направлении трубопровода представлены на рисунке 13

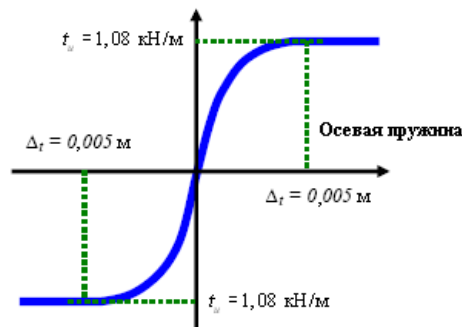


Рисунок 13 –Нагрузка и смещение грунта в осевом направлении трубопровода

б) поперечная грунтовая пружина.

Максимальная поперечная нагрузка, действующая на единицу длины трубопровода от песка, определяется по формуле (7).

Горизонтальный фактор допустимой нагрузки для песка (N_{qh}), определенный по рисунку 10, составляет 10, тогда

$$p_u = 15 \cdot 1,045 \cdot 10 \cdot 0,09 = 14,11 \text{ кН / м.}$$

Смещение грунта (Δp) от p_u по формуле (8) составляет:

$$\Delta p = 0,05 \left(1,045 + \frac{0,09}{2} \right) = 0,055 \text{ м.}$$

Нагрузка и смещение грунта в поперечном направлении трубопровода представлены на рисунке 14.

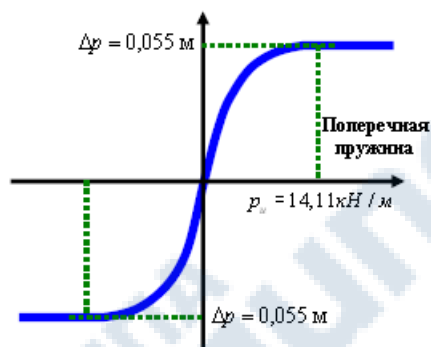


Рисунок 14 – Нагрузка и смещение грунта в поперечном направлении трубопровода
в) вертикальная грунтовая пружина.

Максимальная вертикальная нагрузка опускания, действующая на единицу длины трубопровода от песка, определяется по формуле (9).

$N_q = 18$, $N_\gamma = 26$, значения, определенные по рисунку 12.

$$q_d = 15 \cdot 1,045 \cdot 18 \cdot 0,09 + \frac{15 \cdot 0,09^2 \cdot 26}{2} = 27 \text{ кН / м.}$$

Смещение грунта Δ_{qd} в м от q_d по формуле (10) составляет:

$$\Delta_{qd} = 0,15 \cdot 0,09 = 0,014 \text{ м.}$$

Максимальная вертикальная нагрузка подъема, действующая на единицу длины трубопровода от песка, по формуле (11) составляет.

Горизонтальный фактор допустимой нагрузки для песка по формуле (13) составляет:

$$N_{qv} = \left(\frac{30 \cdot 1045}{44 \cdot 90} \right) = 7,9 < 18;$$

$$q_u = 15 \cdot 1,045 \cdot 7,9 \cdot 0,09 = 11,1 \text{ кН / м.}$$

Смещение грунта (Δ_{qu}) от q_u по формуле (14) составляет:

$$\Delta_{qu} = 0,015 \cdot 1,045 = 0,016 \text{ м.}$$

Нагрузка и смещение грунта в вертикальном направлении трубопровода представлены на рис.

15.

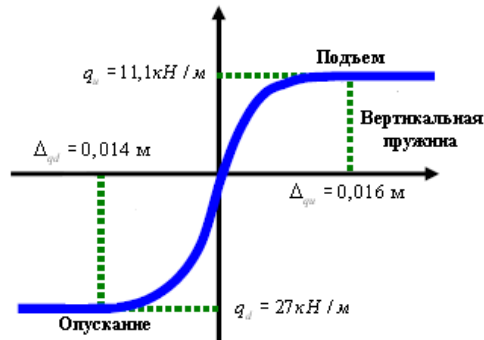


Рисунок 15 - Нагрузка и смещение грунта в вертикальном направлении трубопровода

5.1 Напряженно-деформированное состояние трубопровода

При проектировании трубопроводных систем должны быть проверены все возможные сейсмические опасности, с которыми он может столкнуться. Безопасность трубопроводной системы должна быть проверена от сейсмических нагрузок одновременно с операционными (давление, температурные изменения) и внешними (грунт, транспорт) нагрузками.

5.1.1 Деформации трубопровода

Когда деформация для материала трубы не определена, она может быть найдена как:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \cdot 100\% (\%), \quad (15)$$

где

σ - напряжение в трубе (например - от внутреннего давления или температурного перепада), МПа;

E - модуль упругости материала, МПа.

5.1.2 Напряжения, возникающие в полиэтиленовом трубопроводе от внутреннего давления и температуры

Напряжения, возникающие в полиэтиленовом трубопроводе от внутреннего давления и температуры определяют по формуле:

$$\sigma_p = \frac{p D_{\text{вн}} \mu}{2t} \text{ (МПа)}, \quad (16)$$

где p - максимальное рабочее давление в трубопроводе, МПа;

$D_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр трубы, м ;

μ - коэффициент Пуассона;

t - номинальная толщина стенки трубы, м.

5.1.3 Температурные напряжения в трубопроводе

Продольное напряжение в трубе σ_t в МПа от температурного изменения может быть оценено следующим уравнением:

$$\sigma_t = E\alpha_t\Delta t, \quad (17)$$

где

E - модуль упругости материала, МПа;

α_t - линейный коэффициент теплового расширения материала трубы, $1/^\circ\text{C}$;

Δt - температурный перепад в трубопроводе, $^\circ\text{C}$.

5.1.4 Вертикальная грунтовая нагрузка

Для случая, когда горизонт грунтовых вод ниже вершины трубы, нагрузка, действующая на трубу от грунта, будет составлять:

$$P_v = \gamma_d H \text{ (кН/м}^2\text{)}, \quad (18)$$

где

γ_d - удельный вес грунта засыпки траншеи, кН/м^3 ;

H - высота от верха трубы до поверхности земли (м).

Для тех условий, когда труба расположена ниже горизонта грунтовых вод (рис. 16), нагрузка на трубопровод может быть приближенно вычислена как:

$$P_v = \gamma_w h_w + R_w \gamma_d H \text{ (кН/м}^2\text{)}, \quad (19)$$

где

R_w - фактор плавучести, который равен $1-0,33(h_w/H)$;

h_w - расстояние от верха трубы до уровня грунтовых вод (м);

γ_w - удельный вес воды (кН/м^3).

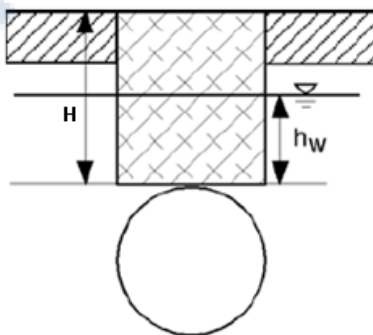


Рис 16 — Труба, расположенная ниже уровня грунтовых вод

5.1.5 Поверхностные нагрузки

Подземные полиэтиленовые трубопроводы могут быть нагружены сконцентрированными или распределенными поверхностными нагрузками, например, нагрузки колес грузовиков, машин и т.д.

Значение нагрузки от подвижных транспортных средств, принимается равной:

$$P_T = \frac{0,478T}{H^2} \text{ (кН/м}^2\text{)}, \quad (20)$$

где

T – вес транспортного средства на ось (кН);

H – глубина засыпки трубопровода (м).

5.1.6 Деформация трубопровода от внешних нагрузок

Гибкий полиэтиленовый трубопровод будет иметь тенденцию к овализации под воздействием вертикальной грунтовой нагрузки и поверхностной нагрузки (рисунок- 17). Овализация трубы из-за сейсмического нагружения, вызванная ОСГ, сейсмическими волнами, здесь не рассмотрена.

$$\varepsilon_{нагр} = \frac{\Delta y}{D} \cdot 100\% = \frac{0,11P}{8S_R + 0,06E'_S} \cdot 100\% (\%), \quad (21)$$

где

$\varepsilon_{нагр}$ - деформация трубы из-за внешних нагрузок (%);

D – внешний диаметр трубы (м);

Δy - вертикальный прогиб трубы (м);

P - нагрузка на трубу от P_v (формула (19)) и P_T (формула (20)), МН/м;

S_R – кольцевая жесткость трубы (МПа);

E'_S -секущий модуль грунта, МПа.

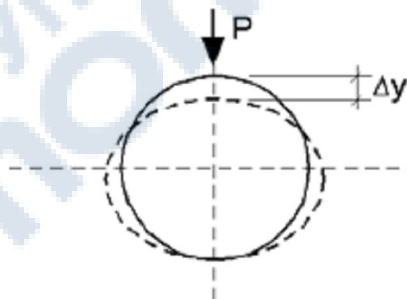


Рисунок 17 — Прогиб поперечного сечения трубы

Кольцевая жесткость трубы может быть определена по формуле:

$$S_R = \frac{E}{12(SDR)^3} \text{ (МПа)}, \quad (22)$$

где

E - модуль упругости материала, МПа;

I – момент инерции стенки трубы на 1 метр длины , м³;

SDR – стандартное размерное отношение.

Секущий модуль грунта E'_S зависит от типа грунта и степени его уплотнения (таблица 8).

Таблица 8

Значение E'_S от степени уплотнения грунта

Группа грунтов		E'(МПа)	
		неуплотненный	Уплотненный под контролем
1	Песок крупный и средней крупности	0,7	2,0-5,0
2	Мелкий песок	0,8	1,2-3,0
3	Супеси и суглинки	0,5	1,0-2,5
4	Плывун, глина	<0,3	0,6

5.1.7 Допустимые деформации полиэтиленового трубопровода в сейсмоактивных районах

Деформации полиэтиленовых трубопроводов должны быть не более, чем допустимые, определяемые по формуле:

$$\varepsilon_{\text{сейсм}} + \varepsilon_{\text{экс}} \leq \varepsilon_{\text{допуст}} (\%), \quad (23)$$

где

$\varepsilon_{\text{допуст}}$ - допустимая деформация трубы (10%);

$\varepsilon_{\text{сейсм}}$ - деформация трубы из-за сейсмической опасности, %;

$\varepsilon_{\text{экс}}$ - эксплуатационная деформация трубы (%), которая равна: $\varepsilon_p + \varepsilon_t + \varepsilon_{\text{нагр}}$, где

ε_p - деформация трубы из-за внутреннего давления (%). ε_p может быть получена путем подстановки σ_p , полученного по формуле (16), в формулу (15);

ε_t - деформация трубы из-за температурного изменения (%). ε_t может быть получена путем подстановки σ_t , полученного по формуле (17), в формулу (15);

$\varepsilon_{\text{нагр}}$ - деформация трубы от внешних нагрузок (%), полученная по формуле (21).

6. Пример 2 - Вычисление эксплуатационной деформации трубопровода и деформации трубопровода от внешних нагрузок

Прокладываемый подземный полиэтиленовый трубопровод наружным диаметром 90 мм, с SDR 11, рассчитан на давление 0,6 МПа (I класс важности) укладывается на качественно подготовленное основание траншеи, пазухи и бока трубы засыпаются средним песком (тип грунта E) с удельной плотностью $\gamma_d = 15 \text{ кН/м}^3$ и уплотняются тяжелым инструментом ($E'_s = 5 \text{ МПа}$) (таблица 8). Высота засыпки (H) от верха трубопровода до поверхности грунта составляет 1 м. Присутствует наземный транспорт с осевой нагрузкой $T = 260 \text{ кН}$. Температура монтажа трубопровода составляет $20 \text{ }^\circ\text{C}$, а эксплуатации - $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент Пуассона μ для полиэтилена

составляет 0,43; коэффициент линейного теплового расширения α равен $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ 1}^\circ \text{C}$; модуль упругости полиэтиленовой трубы (E) -1000 МПа.

Необходимо определить деформации трубы от эксплуатационных и внешних нагрузок.

Решение:

а) Напряжение в трубе от внутреннего давления по формуле (16) составляет:

$$\sigma_p = \frac{0,6 \cdot 0,074 \cdot 0,43}{2 \cdot 0,0082} = 1,16 \text{ МПа.}$$

Продольная деформация трубы от внутреннего давления по формуле (15) составляет:

$$\varepsilon_p = \frac{1,16}{1000} \cdot 100\% = 0,12\%.$$

б) Продольное осевое напряжение в трубе, вызванное изменением температуры составляет:

$$\sigma_T = 1000 \cdot 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 20 = 4,4 \text{ МПа.}$$

Деформация трубы из-за перепада температур по формуле (15) составляет:

$$\varepsilon_T = \frac{4,4}{1000} \cdot 100\% = 0,44\%.$$

Полная деформация трубы из-за внутреннего давления и температурных изменений составляет: $0,12\% + 0,44\% = 0,56\%$.

в) деформация трубы от внешних нагрузок.

Нагрузка грунта по формуле (18) составляет:

$$P_v = \gamma_d \cdot H = 15 \cdot 1 = 15 \text{ кН} / \text{м}^2 = 0,015 \text{ МН} / \text{м}^2.$$

Кольцевая жесткость (S_R) данной трубы по формуле (22) составляет:

$$S_R = \frac{E}{12(SDR)^3} = \frac{1000}{12 \cdot (11)^3} = 0,06 \text{ МПа.}$$

Транспортная нагрузка по формуле (20) составляет:

$$P_T = \frac{0,478T}{H^2} = \frac{0,478 \cdot 260}{1^2} = 124,28 \text{ кН} / \text{м}^2 = 0,124 \text{ МН} / \text{м}^2.$$

Деформация трубы от внешних нагрузок по формуле (21) составляет:

$$\varepsilon_{нагр} = \frac{0,11 \cdot (0,015 + 0,124)}{8 \cdot 0,06 + 0,06 \cdot 5} \cdot 100\% = 1,96\%.$$

г) общая деформация трубы от эксплуатационных и внешних нагрузок $\varepsilon_{общ}$ в % составляет:

$$\varepsilon_{общ} = 0,56 + 1,96 = 2,52\%$$

6.1 Пространственно-распределённое ОСГ

6.1.1 Воздействие латерального растекания грунтов при их разжижении на полиэтиленовый трубопровод при землетрясении

Потенциальное разжижение грунтов оценивается следующим:

- 1) восприимчивостью грунта к разжижению;
- 2) потенциалом для начала возникновения разжижения грунтов;
- 3) эффектом потенциальной опасности в результате этого явления;
- 4) альтернативами по уменьшению эффектов воздействия опасности разжижения грунтов на подземный трубопровод.

Основной опасностью для трубопроводов, связанной с разжижением грунтов, является латеральное растекание пойменных или береговых отложений. В зависимости от глубины залегания разжижаемых грунтов, поверхностный слой грунта скользит вниз по пологим склонам или в направлении более крутого склона (например, к руслу реки или к береговому обрыву).

Латеральное растекание может распространяться на расстояние до 100 м и более от русла реки и 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.

Смещения при латеральном растекании грунта важно исследовать для подземных трубопроводов, поскольку трубопроводы, пересекающие зоны развития этого явления, должны испытывать продольные и изгибающие деформации в соответствии с подвижками грунта. При пересечении трубопроводом такой зоны необходимо определить длину участка трубопровода в пределах области деформаций, а также направление движения грунта и их распределение по величине относительно трассы трубопровода (продольное или поперечное движение грунтов).

Смещения грунта при их латеральном растекании (δ_L) оценивается как:

$$\text{Log}(\delta_L + 0,01) = -7,280 + 1,017M_w - 0,278\text{Log}(R) - 0,026R + 0,497\text{Log}(Y) + 0,454\text{Log}(S) + 0,558\text{Log}(T_{15}), \quad (24)$$

где

M_w – момент магнитуды землетрясения;

R – расстояние от разлома (км);

Y – отношение граней при сдвиге (%) (рисунок 18);

S – наклон поверхности (%) (рисунок 19);

T_{15} – полная толщина всех разжижаемых слоев (м), имеющих значение стандартного сопротивления проникновения $N < 15$ (таблица 1).

Значения W , S и T_{15} должны быть установлены.

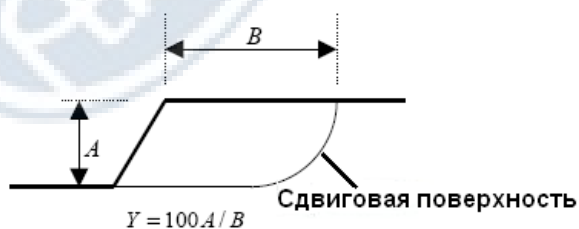


Рисунок 18 - Сдвиговая поверхность

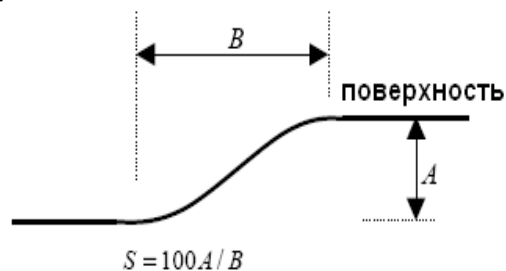


Рисунок 19 - Наклонная поверхность

Ширина и длина зоны ОСГ сильно влияют на реакцию трубы к ОСГ. Эмпирические наблюдения предполагают следующее:

- а) длина зоны ОСГ изменяется от 50 до 600 метров;
- б) ширина зоны ОСГ изменяется до 250 метров;
- в) направление ОСГ обычно происходит по склону по направлению сдвиговой поверхности.

6.1.2 Анализ поведения подземного трубопровода при оползнях

Возможность повреждения трубопровода оползнем оценивается на следующем:

1. восприимчивостью грунта, в котором находится трубопровод, к оползням;
2. вероятностью возникновения оползня и наклонной деформации в месте прохождения трассы трубопровода;
3. потенциальной опасностью от оползня и наклонного движения;
4. возможными мероприятиями по уменьшению воздействия от потенциального оползня на трубопровод.

Этот Раздел оценивает восприимчивость трубопроводов к оползням и делает оценку вероятности возникновения развития оползня.

Все трубопроводные системы, расположенные в пределах зоны опасности оползня, рекомендуется проектировать для наклонного движения.

Оценка наклонного движения, возникающего в результате землетрясения, требует оценки коэффициента безопасности стабильности (FS), который равен 2,5 для $H/D \geq 2$ и 3,0 для $H/D < 2$ (H - расстояние от поверхности до верха трубы). Для оценки оползня необходимо рассмотреть следующие факторы: уклон, грунт, величину сдвигающей силы, наличие грунтовых вод, основу траншеи для подземных трубопроводов. Критическое ускорение начального движения оползня, определяется как:

$$a_c = g(FS - 1) \sin \alpha \quad (g), \quad (25)$$

где

α - угол уклона ($^{\circ}$).

Средний оползень вызывает смещение грунта (δ_s) (в сантиметрах), которое рассчитывается по формуле:

$$\lg(\delta_s) = 1,546 + 1,460 \cdot \lg(I_A) - 6,642 \cdot a_c, \quad (26)$$

где

I_A – интенсивность Ариаса, которая равна:

$$\lg(I_A) = -4,1 + M_w - 2 \lg(R), \quad (27)$$

где

M_w – момент магнитуды землетрясения;

R – расстояние от разлома (км).

6.1.3 Проектирование трубопровода при пространственно-распределенном ОСГ

Пространственно - распределенное ОСГ, как было сказано выше, происходит из-за латерального растекания грунтов при их разжижении и оползней, и может быть классифицировано на продольную (параллельную оси трубопровода) или поперечную (перпендикулярную оси трубопровода). Рис. 20 показывает эскиз, представляющий этот вид разрушения и модель трубопровода, где реакции грунта представлены пружинами.

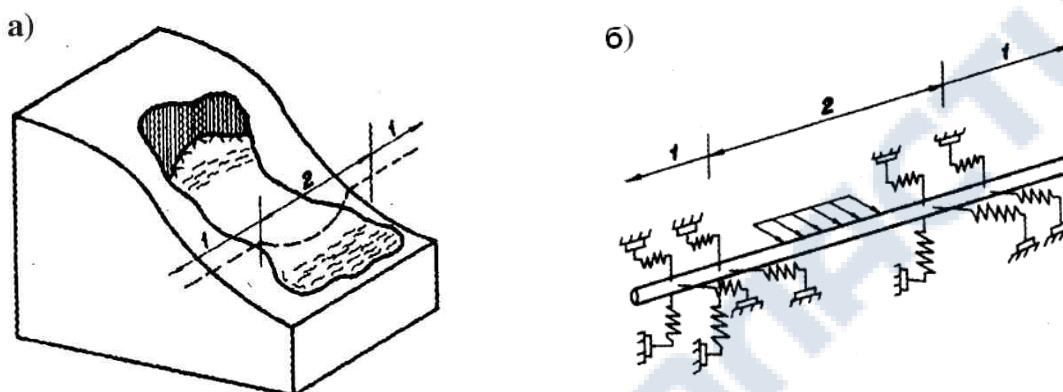


Рисунок 20 - а) Трубопровод при пространственно-распределенном ОСГ; б) Модель, представляющая силы трубопровода в а)



Рисунок 21 - Схематический рисунок, показывающий ОСГ, которое приводит к повреждению грунта

ОСГ происходит из-за смещения по высоте смежных элементов. Это вызывает повреждение грунта (рис. 21). Есть много образцов ОСГ, которые зависят от местного условия грунта и геологических параметров местности. Трубопровод может пересечься с ОСГ в любом произвольном направлении (рис. 22).

Однако, проектируя трубопровод при воздействии ОСГ, необходимо рассмотреть два критических условия его пересечения: параллельно оси трубопровода (продольная ОСГ) (рис. 23) и перпендикулярно оси трубопровода (поперечная ОСГ) (рис. 24).

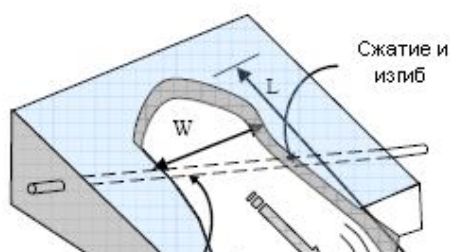


Рисунок 22 - Трубопровод, пересекающий ОСГ под любым произвольным углом

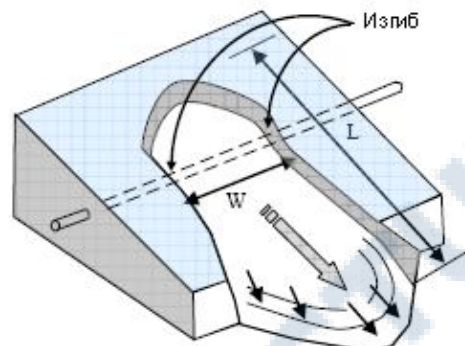
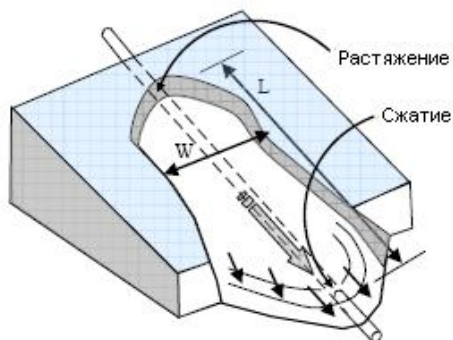


Рисунок 23 – Продольное ОСГ (трубопровод, пересекает ОСГ в Продольном направлении его движения)

Рисунок 24 – Поперечное ОСГ (трубопровод, пересекает ОСГ в поперечном направлении его движения)

Вообще, ОСГ в поперечном направлении во много раз больше, чем в вертикальном. В данном РТМ ОСГ в вертикальном направлении не рассматривается. Анализ прошлых землетрясений показывает, что ОСГ - одна из главных сейсмических опасностей, которая может вызвать существенное повреждение трубопроводов.

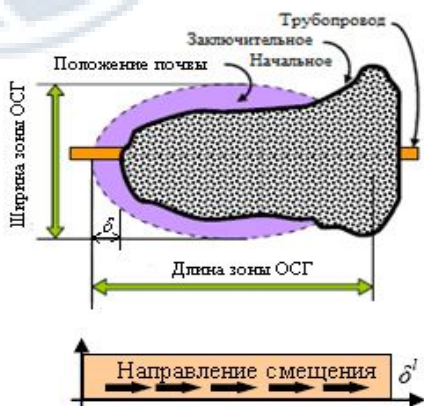
Деформации, вызванные ОСГ, будут наибольшими по границам движения.

По геотехническим исследованиям длина (L), ширина (W) и максимальное смещение грунта (δ) зоны ОСГ должны быть установлены.

6.1.4 Воздействие продольного пространственно-распределенного ОСГ на полиэтиленовый трубопровод

При критическом случае, продольное движение грунта однородно по всей зоне ОДГ (рисунок 25).

Проектное смещение грунта при продольном ОСГ может быть вычислено как:



$$\delta_{np}^l = \delta^l \cdot I_p \text{ (м)}, \quad (28)$$

где

δ^l - максимальное продольное смещение грунта (м);

I_p - фактор важности (таблица 3).

Существует 2 случая, использующихся для проектирования полиэтиленовых трубопроводов, подвергнутых воздействию продольного пространственно-распределенного ОСГ.

Рисунок 25 - Продольное ОСГ

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

(29)

где

t_u - максимальная осевая сила, действующая на единицу длины трубопровода -(см. формулу

(5));

D - наружный диаметр трубы ,м;

t - толщина стенки трубы ,м;

E – модуль упругости материала, МПа;

L – длина зоны ОСГ.

Случай 2. При большой длине зоны ОСГ.

Максимальная осевая деформация трубы может быть вычислена как:

$$\varepsilon_a = \frac{t_u L_e}{\pi D t E} \cdot 100\% (\%),$$

(30)

где

L_e - эффективная длина трубопровода, подверженная действию t_u .

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

$$L_e = \sqrt{\frac{\delta_{np}^l \pi D t E}{t_u}} \quad (\text{м})$$

(31)

Деформация трубы из-за сейсмической опасности ($\varepsilon_{сейсм}$) от продольного ОСГ должна быть взята, как меньшая, которая получена из формул (29) и (30). Деформация трубы должна подтвердить допустимые критерии деформации, определенные по формуле (23).

7. Пример 3 - Расчет трубопровода при продольном ОСГ

Полиэтиленовый трубопровод такой же, как и в примере 2.

Общая деформация от эксплуатационных и внешних нагрузок составляет 2,52% (пример 2).

Длина зоны ОСГ составляет 150 м, смещение грунта в продольном направлении (δ^l) из-за разжижения грунта, как предполагается, составляет 2 м.

Необходимо рассчитать деформацию данного трубопровода при продольном ОСГ (рис. 25).

Решение:

Проектное смещение грунта в продольном направлении по формуле (28) составляет:

$$\delta_{np}^l = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ м.}$$

Для 1 случая:

деформация трубы по формуле (29) составляет:

$$\varepsilon_a = \frac{1,08 \cdot 10^3 \cdot 150}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 0,0082 \cdot 10^9} \cdot 100\% = 3,5\%.$$

Для 2 случая:

Эффективная длина трубопровода (L_e), подверженная действию t_u , по формуле (31)

составляет:

$$L_e = \sqrt{\frac{3 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 0,0082 \cdot 10^9}{1,08 \cdot 10^3}} = 80,2 \text{ м,}$$

тогда деформация трубы по формуле (30) составляет:

$$\varepsilon_a = \frac{1,08 \cdot 10^3 \cdot 80,2}{3,14 \cdot 0,09 \cdot 0,0082 \cdot 10^9} \cdot 100\% = 3,74\%$$

Деформация трубы из-за сейсмического действия $\varepsilon_{сейсм}$ от продольного ОСГ берется равной 3,5% (наименьшая от 1 и 2 случая).

Полная деформация трубы составляет: 2,52 % + 3,5 % = 6,02 %.

По формуле (23) определяем, что 6,02 % < 10 %, следовательно, данная полиэтиленовая труба проходит по допустимым деформациям при данном продольном движении грунта.

7.1 Воздействие поперечного пространственно-распределенного ОСГ на полиэтиленовый трубопровод

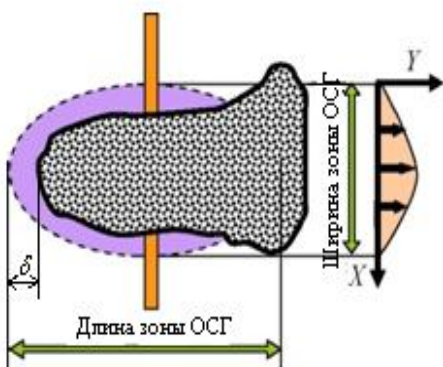
Проектное смещение грунта при поперечном ОСГ может быть вычислено как:

$$\delta_{np}^t = \delta^t \cdot I_p \text{ (м)}, \tag{32}$$

где

δ^t - максимальное продольное смещение грунта, м ;

I_p - фактор важности (таблица 3).



Когда полиэтиленовый трубопровод подвержен поперечной деформации грунта (рисунок 26), он будет изгибаться, чтобы противостоять воздействию этого явления.

Рисунок 26 - Поперечное ОСГ

Максимальная изгибающая деформация трубы может произойти либо в центре, либо около краев поперечно перемещающейся массы грунта (рисунок 26), и может быть принята, как меньшая полученная из формул (33) и (34).

$$а) \varepsilon_b = \pm \frac{\pi^2 D \delta_{np}^t}{W^2} (\%), \quad (33)$$

где

D – наружный диаметр трубы (м);

W – ширина зоны остаточной деформации грунта (м);

δ_{np}^t - поперечное смещение грунта (м);

t – толщина стенки трубы (м).

$$б) \varepsilon_b = \pm \frac{P_u W^2}{3\pi EtD^2} (\%), \quad (34)$$

где

E – модуль упругости материала труб (МПа);

P_u - максимальное боковое сопротивление грунта, приходящееся на единицу длины трубы, рассчитанное по формуле (6) (кН/м).

Меньшее значение максимальной изгибающей деформации, полученной по формулам (33) и (34), нужно считать как деформация трубы из-за сейсмической опасности ($\varepsilon_{сейсм}$).

Деформация трубы должна подтвердить допустимые критерии деформации, данные в формуле (23).

8. Пример 4 - Расчет трубопровода при поперечном ОСГ

Полиэтиленовый трубопровод такой же, как и в примере 2.

Общая деформация от эксплуатационных и внешних нагрузок составляет 2,52% (пример 2).

Ширина зоны ОСГ составляет 50 м, смещение грунта в поперечном направлении (δ^t) из-за разжижения грунта, как предполагается, составляет 2 м.

Необходимо рассчитать деформацию данного трубопровода при поперечном ОСГ (рис. 26).

Решение:

Проектное смещение грунта в поперечном направлении по формуле (32) составляет:

$$\delta_{np}^t = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ м.}$$

Максимальная изгибающая деформация трубы берется меньшей из тех, которые определяются по формулам (33) и (34):

$$a) \varepsilon_b = \pm \frac{3,14^2 \cdot 0,09 \cdot 3}{50^2} \cdot 100\% = \pm 0,11\%;$$

$$б) \varepsilon_b = \frac{14,11 \cdot 10^3 \cdot 50^2}{3 \cdot 3,14 \cdot 10^9 \cdot 0,0082 \cdot 0,09^2} \cdot 100\% = \pm 5638\%.$$

Максимальная деформация трубы из-за сейсмического действия ($\varepsilon_{\text{сейсм}}$) от поперечного ОСГ берется равной 0,11% (наименьшая из а) и б)).

Полная деформация трубы составляет: 2,52 % + 0,11 % = 2,63 %.

По формуле (23) определяем, что 2,63 % < 10 %, следовательно, данная полиэтиленовая труба проходит по допустимым деформациям при данном поперечном движении грунта

8.1 Мероприятия по уменьшению воздействия ОСГ на полиэтиленовый трубопровод

Ниже приведены некоторые рекомендации, которые могут улучшить работоспособность трубопровода против воздействия ОСГ:

- 1) если ожидаемое смещение грунта превышает предельную деформацию трубы, то может использоваться улучшение грунта;
- 2) реакция трубопровода может быть минимизирована при уменьшении смещения грунта. Уменьшая диаметр трубы, трение грунта также может быть уменьшено;
- 3) в максимально возможной степени, трубопровод должен быть помещен ниже глубины прохождения грунтовых вод;
- 4) все части трубопровода могут быть расположены вне области зоны деформации грунта;
- 5) траншея может быть спроектирована таким образом, чтобы поглотить деформации грунта при неблагоприятных условиях;
- 6) специальные соединения трубы позволяют выдерживать общие отклонения, расширения и сжатия.

8.2 Воздействие выталкивающей силы на полиэтиленовый трубопровод при разжижении грунта

Эффекты плавучести полиэтиленовых трубопроводов имеет, вероятно, самое большое распространение в областях, таких как поймы и устья, где разжижение грунтов имеет место при землетрясении.

Выталкивающая сила F_b в Н/м, действующая на единицу длины трубопровода, может быть вычислена по формуле:

$$F_b = \frac{\pi}{4} \rho_w g D^2 \quad (\text{Н/м}), \quad (35)$$

где

ρ_w - плотность воды и растворенных в ней солей (кг/м^3);

D - наружный диаметр трубопровода.

Изгибающее напряжение, вызванное для относительно короткой секции полиэтиленового трубопровода, подвергнутого плавучести, может быть вычислено как:

$$\sigma_{bf} = \frac{F_b L_b^2}{10Z} \text{ (МПа)}, \quad (36)$$

где

L_b - длина трубы в зоне плавучести (м);

F_b - выталкивающая сила, действующая на трубопровод (Н/м), вычисленная по формуле (35);

Z - осевой момент сопротивления сечения трубы, рассчитанный по формуле:

$$Z = \frac{\pi}{32D_{\text{внеш}}} (D_{\text{внеш}}^4 - D_{\text{внутр}}^4) \text{ (м)}. \quad (37)$$

Максимальная изгибающая деформация трубы может быть получена путем подстановки значения, рассчитанного по формуле (36), в формулу (15). Эта максимальная изгибающая деформация трубы может быть взята, как деформация из-за сейсмической опасности ($\varepsilon_{\text{сейсм}}$), и которая должна подтвердить допустимые критерии деформации, данные в формуле (23).

9. Пример 5 - Расчет трубопровода при разжижении грунта

Полиэтиленовый трубопровод такой же, как и в примере 2.

Общая деформация от эксплуатационных и внешних нагрузок составляет 2,52% (пример 2).

По начальным данным, труба, как ожидается, испытает выталкивающую силу во время разжижения грунта по длине приблизительно 10 м. Предполагается, что грунтовые воды находятся на 1 м ниже залегания трубы, их плотность составляет 1040 кг/м^3 . Необходимо рассчитать плавучесть трубопровода из-за разжижения грунта и его деформацию.

Решение:

Выталкивающая сила F_b в Н/м, приходящаяся на единицу длины трубопровода, по формуле (35) составляет:

$$F_b = \frac{3,14}{4} 1040 \cdot 9,8 \cdot (0,09)^2 = 65 \text{ Н / м}.$$

Изгибающее напряжение в трубопроводе от выталкивающей силы определяется по формуле (36).

Z – осевой момент сопротивления сечения трубы по формуле (37) составляет:

$$Z = \frac{3,14}{32 \cdot 0,09} (0,09^4 - 0,0736^4) \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3,$$

тогда

$$\sigma_{bf} = \pm \frac{65 \cdot 10^2}{10 \cdot 4 \cdot 10^{-5}} = 16,25 \text{ МПа}.$$

Максимальная деформация трубы, соответствующая вышеупомянутому напряжению изгиба, по формуле (15) составляет:

$$\varepsilon = \frac{16,25}{1000} \cdot 100\% = 1,2\%.$$

Максимальная деформация трубы, вызванная разжижением грунтов, принята как $\varepsilon_{\text{сейсм}}$ и составляет 1,2 %.

Общая деформация трубы составляет 2,52 % + 1,2 % = 3,72 %.

По формуле (23) определяем, что 3,72 % < 10 %, следовательно, данная труба проходит по допустимым деформациям, вызванных выталкивающей силой воды, при разжижении грунта.

9.1 Рекомендации по уменьшению плавучести полиэтиленового трубопровода

Следующие рекомендации могут минимизировать эффекты плавучести трубопровода:

- 1) трубопроводы могут быть проложены в защитном футляре в виде трубы с большим диаметром, чтобы уменьшить эффекты плавучести, но увеличенный диаметр также увеличит поперечную силу, действующую на трубопровод в боковом направлении из-за разжижения грунтов;
- 2) может использоваться засыпка трубопровода гравием, чтобы обеспечить дополнительное сопротивление плавучести;
- 3) эффект плавучести может также быть минимизирован путем укладки трубопровода на небольшой глубине, выше прохождения грунтовых вод;
- 4) необходимо устанавливать пригрузки.

9.2 Анализ поведения полиэтиленового трубопровода при пересечении разлома

Переход полиэтиленового трубопровода через разломы представляет значительную опасность для него, потому что, если во время землетрясения разрыв выйдет на поверхность, трубопроводу придется противостоять значительным дифференциальным смещениям поперек зоны разрыва. Необходимо применять ряд мероприятий при пересечении трубопровода разломов.

(1) Решение применить специальный пересекаемый разлом при проектировании трубопроводов, где они пересекают потенциально активные зоны разломов, зависит от активности разломов, последствий разрыва, воздействия на окружающую среду и возможности подвергания другим опасностям во время эксплуатации трубопровода.

(2) В трубопроводе при пересечении разлома подпункты (3) - (14) улучшат способность трубопровода выдержать отличительные смещения вдоль разлома.

- (3) При пересечении полиэтиленового трубопровода сдвигового разлома, он должен быть ориентирован таким способом, чтобы находиться в растягивающем состоянии.
- (4) Упругость трубопровода в зоне пересечения разлома должна быть максимальной.
- (5) Трубопровод не должен иметь никаких концентраторов напряжения в пределах зоны пересечения с разломом.
- (6) Угол пересечения разломов взброса должен быть как можно меньше, чтобы минимизировать сжимающие деформации. Если также ожидаются существенные смещения сдвигового разлома, то угол пересечения трубопровода с разломом, должен быть выбран таким образом, чтобы способствовать его растяжению.
- (7) В зонах разлома глубина полиэтиленового трубопровода, должна быть минимизирована, чтобы уменьшить воздействие грунта на трубопровод во время движения разлома.
- (8) Углы поворота трассы трубопровода должны быть как можно дальше от зоны разлома, чтобы понизить уровень деформации трубопровода;
- (9) Увеличение толщины стенки трубопровода повышает способность трубопровода к перемещениям разлома на данном участке максимальной растягивающей деформации. В пределах 50 м. на каждой стороне разлома должна использоваться относительно толстая труба.
- (10) Сокращение угла зоны трения между трубопроводом и грунтом повышает способность трубопровода к перемещениям разлома на данном уровне максимальной деформации.
- (11) Строгий контроль должен осуществляться по засыпке траншеи, окружающей трубопровод на расстоянии 50 м. на каждой стороне разлома. Вообще, гранулированный песок без булыжников или валунов будет являться подходящим материалом засыпки траншеи. Если существующий грунт существенно отличается от этого, должна быть выкопана траншея большего размера на расстоянии приблизительно 15 м. на каждой стороне разлома.
- (12) Для полиэтиленовых трубопроводов движение разлома может быть приспособлено, используя его способность хорошо деформироваться при растяжении, чтобы приспособливаться к деформациям грунта без разрыва. Везде, где возможно, положение трубопровода при пересечении разлома, должно быть таким, чтобы трубопровод был подвергнут растяжению плюс умеренное количество изгиба. Положения, которые могли бы подвергнуть трубопровод в сжатое состояние, нужно избежать до возможной степени, потому что способность трубопровода противостоять сжимающим деформациям без разрыва - значительно меньше, чем для растягивающих деформаций. Любые сжимающие деформации должны быть ограничены той деформацией, которая вызвала бы местную потерю устойчивости или местную деформацию трубопровода.
- (13) Во всех областях потенциального разрыва грунта трубопроводы должны быть положены в относительно прямых секциях, избегая резких изменений в направлении и возвышении. До возможной степени трубопроводы должны быть построены без изгибов.

(14) Большие напряжения и постоянные деформации трубопровода допустимы в экстремальных случаях подвижки по разлому при условии, что сохраняется герметичность трубы.

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

Величина смещения разлома зависит от типа разлома, размера землетрясения и геологии.

Смещение разлома может быть оценено следующим образом:

для разлома сброса (рисунок -27а):

$$\lg \delta_{fn} = -4,45 + 0,63M_w ; \quad (38)$$

для разлома взброса (рисунок -27б):

$$\lg \delta_{fr} = -0,74 + 0,08M_w ; \quad (39)$$

для сдвигового разлома (рисунок -27в):

$$\lg \delta_{fs} = -6,32 + 0,90M_w ; \quad (40)$$

для невидимого подповерхностного разлома (рисунок- 27г):

$$\lg \delta_{fb} = -4,80 + 0,69M_w , \quad (41)$$

где

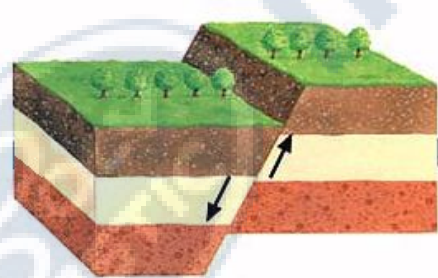
δ_{fs} - смещение сдвигового разлома (м);

δ_{fn} - смещение разлома сброса (м);

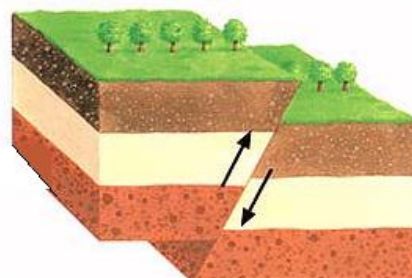
δ_{fr} - смещение разлома взброса (м);

δ_{fb} - смещение невидимого подповерхностного разлома (м);

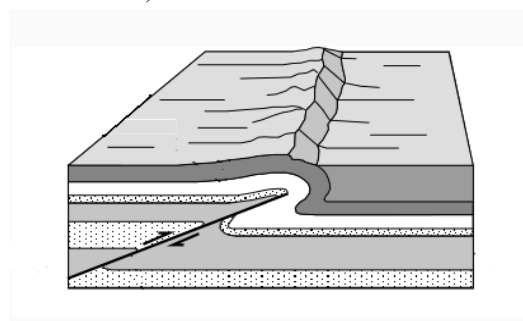
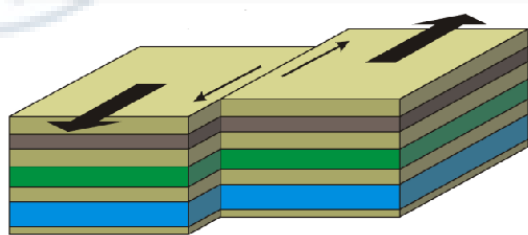
M_w - момент магнитуды землетрясения.



а)



б)



в)

г)

Рисунок 27 – Виды разломов

а) - сброс; б) - взброс; в) - сдвиг; г) - невидимый подповерхностный разлом

Для сдвигового разлома (рис. 28), движение разлома вдоль и поперек трубопровода может быть вычислено следующим образом, написанным ниже.

Компонент смещения сдвигового разлома в осевом направлении может быть вычислен по формуле:

$$\delta_{fax} = \delta_{fs} \cos \beta \text{ (м)}, \quad (42)$$

где

β - угол трубопровода ($^{\circ}$), пересекающего линию разлома.

Компонент смещения сдвигового разлома в поперечном направлении может быть вычислен по формуле:

$$\delta_{fir} = \delta_{fs} \sin \beta \text{ (м)}. \quad (43)$$

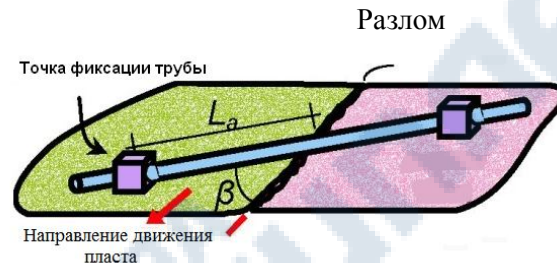


Рисунок 28 - Полиэтиленовый трубопровод, проходящий через сдвиговый разлом

Для смещения сбросового разлома (рис. 29) движение разлома вдоль, поперек и вертикально трубопроводу может быть получено следующим образом.

Компонент смещения разлома в осевом направлении трубопровода:

$$\delta_{fax} = \delta_{fn} \cos \psi \sin \beta \text{ (м)}, \quad (44)$$

ψ - угол падения разлома ($^{\circ}$)

Компонент смещения разлома в поперечном направлении трубопровода:

$$\delta_{fir} = \delta_{fn} \cos \psi \cos \beta \text{ (м)} \quad (45)$$

Компонент смещения разлома в вертикальном направлении трубопровода:

$$\delta_{fvt} = \delta_{fn} \sin \psi \text{ (м)} \quad (46)$$



Рисунок 29 - Полиэтиленовый трубопровод, проходящий через сбросовый разлом

В разломах взброса, компоненты смещения оценены подобным образом, как в разломах сброса, но с отрицательным сдвигом.

Для наклонных разломов, смещение сдвига и сброса (или взброса) может быть добавлено алгебраически в осевом, поперечном и вертикальном направлении оси трубопровода.

Проектное смещение разлома может быть вычислено путем умножения фактора важности (I_p) (таблица 3) на ожидаемое смещение разлома:

Компонент проектного смещения разлома в осевом направлении трубопровода:

$$\delta_{fax-np} = \delta_{fax} \cdot I_p \text{ (м)}. \quad (47)$$

Компонент проектного смещения разлома в поперечном направлении трубопровода:

$$\delta_{fir-np} = \delta_{fi} \cdot I_p \text{ (м)}. \quad (48)$$

Компонент проектного смещения разлома в вертикальном направлении трубопровода:

$$\delta_{fvt-np} = \delta_{fv} \cdot I_p \text{ (м)}. \quad (49)$$

Полиэтиленовый трубопровод, в момент смещения разлома, испытывает нагрузки со стороны грунта,двигающегося относительно трубопровода. После того, как смещение трубопровода сравнялись с подвижкой грунта, грунт перестает оказывать нагрузку на трубопровод. Данный тип нагрузки обычно называется нагрузкой, с контролируемым смещением. Для трубопроводов, испытывающих такие нагрузки, 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 и повреждения трубопровода при обеспечении его целостности.

Средняя деформация трубы, возникающая при пересечении с разломом, может быть вычислена как:

$$\varepsilon = 2 \left[\frac{\delta_{fax-np}}{2L_a} + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_{fir-np}}{2L_a} \right)^2 \right] \cdot 100\% \text{ (%)}, \quad (50)$$

где

L_a – длина от точки закрепления трубы до разлома (м), определенная ниже.

Выражение для средней деформации основано на модели Ньюмарка-Холла, изображенной на рисунке 30. Эта модель должна использоваться только для начального приближения, и основана на подходящем нелинейном анализе.

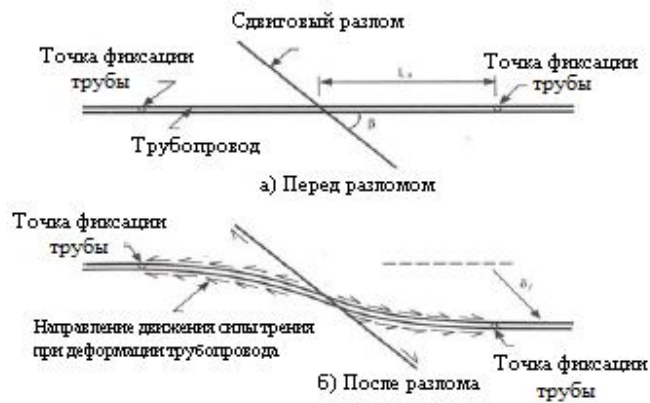


Рисунок 30 - Модель Ньюмарка-Холла при пересечении трубопровода разлома

Незакрепленная длина трубопровода в зоне пересечения разлома может быть взята, как меньшее значение из следующего:

а) когда нет никаких изгибов или никакого типа ограничений на трубопровод около зоны разлома, эффективная длина ненадежно закрепленного трубопровода может быть взята как:

$$L_a = \frac{E \varepsilon_y \pi D t}{t_u} \text{ (м)}, \quad (51)$$

где

t_u - максимальная осевая сила, действующая на полиэтиленовый трубопровод в осевом направлении, определенная по формуле (5);

ε_y - пластическая деформация материала трубы (%);

E - модуль упругости материала трубы (МПа);

D - внешний диаметр трубопровода (м);

t - толщина стенки трубы (м);

б) любое закрепление, обеспеченное конфигурацией трубы (например, изгибы или изменение в составе грунта) будет рассматриваться как фактический пункт закрепления, и длина трубопровода от точки закрепления до линии разлома будет взята как эффективная незакрепленная длина (рис. 30).

Деформация, полученная по формуле (50), необходимо считать как деформация трубы из-за сейсмической опасности ($\varepsilon_{\text{сейсм}}$), и она должна подтвердить допустимые критерии деформации, данные по формуле (23).

10. Пример 6 - Расчет трубопровода при пересечении разломов

Полиэтиленовый трубопровод такой же, как и в примере 2.

Общая деформация от эксплуатационных и внешних нагрузок составляет 2,52% (пример 2).

а) Данный ПЭ трубопровод пересекает сдвиговый разлом под углом $\beta = 45^\circ$ (рис. 28).

Момент магнитуды землетрясения (M_w) равен 7 баллов.

б) Данный ПЭ трубопровод пересекает сбросовый разлом со смещением под углом падения $\psi = 35^0$ и под углом $\beta = 40^0$ к линии разлома (рис. 29). Момент магнитуды землетрясения такой же, как и в а).

В обоих случаях, как предполагается, расстояние от изгиба трубопровода до линии разлома составляет 25 м.

Необходимо рассчитать деформацию трубопровода при пересечении данных разломов.

Решение:

а) Смещение сдвигового разлома по формуле (40) составляет:

$$\lg \delta_{fs} = -6,32 + 0,90 \cdot 7 = -0,02;$$

$$\delta_{fs} = 0,95 \text{ м.}$$

Компонент смещения сдвигового разлома в осевом направлении трубопровода по формуле (42) составляет:

$$\delta_{fax} = 0,95 \cos 45^0 = 0,67 \text{ м.}$$

Компонент проектного смещения разлома в осевом направлении трубопровода по формуле (47) составляет:

$$\delta_{fax-np} = 0,67 \cdot 2,3 = 1,54$$

Компонент смещения сдвигового разлома в поперечном направлении трубопровода по формуле (43) составляет:

$$\delta_{fir} = 0,95 \sin 45^0 = 0,67 \text{ м.}$$

Компонент проектного смещения сдвигового разлома в поперечном направлении трубопровода по формуле (48) составляет:

$$\delta_{fir-np} = 0,67 \cdot 2,3 = 1,54$$

Эффективная длина ненадежно закрепленного трубопровода по формуле (51) составляет:

$$L_a = \frac{E \varepsilon_y \pi D t}{f_m} = \frac{10^9 \cdot 0,1 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 0,0082}{1,08 \cdot 10^3} = 214,6 \text{ м.}$$

В качестве незакрепленной длины трубопровода берем $L_a = 25$ м. (из начальных данных).

Деформация трубы из-за сдвигового разлома по формуле (50) составляет:

$$\varepsilon = 2 \left[\frac{1,54}{2 \cdot 25} + \frac{1}{2} \left(\frac{1,54}{2 \cdot 25} \right)^2 \right] \cdot 100\% = 6,25\%.$$

Максимальная деформация трубы из-за сдвигового разлома, взята как $\varepsilon_{сейсм}$, и составляет 6,25%.

Общая деформация трубы составляет $2,52\% + 6,25\% = 8,77\%$.

По формуле (23) определяем, что $8,77\% < 10\%$, следовательно, данная полиэтиленовая труба проходит по допустимым деформациям при данном разломе грунта.

б) Смещение разлома сброса по формуле (38) составляет:

$$\lg \delta_{fn} = -4,45 + 0,63 \cdot 7 = -0,04;$$

$$\delta_{fn} = 0,91 \text{ м.}$$

Компонент смещения разлома в осевом направлении трубопровода по формуле (44) составляет:

$$\delta_{fax} = \delta_{fn} \cos \psi \sin \beta = 0,91 \cos 35^0 \sin 40^0 = 0,48 \text{ м.}$$

Компонент проектного смещения разлома в осевом направлении трубопровода по формуле (47) составляет:

$$\delta_{fax-np} = 0,48 \cdot 2,3 = 1,1 \text{ м.}$$

Компонент смещения разлома в поперечном направлении трубопровода по формуле (45) составляет:

$$\delta_{fir} = \delta_{fn} \cos \psi \cos \beta = 0,91 \cos 35^0 \cos 40^0 = 0,57 \text{ м.}$$

Компонент проектного смещения сдвигового разлома в поперечном направлении трубопровода по формуле (48) составляет:

$$\delta_{fir-np} = 0,57 \cdot 2,3 = 1,31 \text{ м.}$$

Деформация трубы из-за разлома сброса по формуле (50) составляет:

$$\varepsilon = 2 \left[\frac{1,1}{2 \cdot 25} + \frac{1}{2} \left(\frac{1,31}{2 \cdot 25} \right)^2 \right] \cdot 100\% = 4,47\% .$$

Максимальная деформация трубы из-за разлома сброса, взята как $\varepsilon_{сейсм}$, и составляет 4,47%.

Общая деформация трубы составляет $2,52\% + 4,47\% = 6,99\%$.

По формуле (23) определяем, что $6,99\% < 10\%$, следовательно, данная полиэтиленовая труба проходит по допустимым деформациям при данном разломе грунта.

10.1 Воздействие сейсмических волн на полиэтиленовый трубопровод

10.1.1 Анализ трубопровода при сейсмическом распространении волн

Сотрясение земли представляет собой одно из самых больших опасностей, потому что оно происходит при всех землетрясениях и может происходить из многих различных источников землетрясения. Переходные амплитуды волны зависят от исходного выпуска энергии, расстояния от источника, грунта, который волна пересекает между источником и трубой, около поверхностных условий, и местного ландшафта. Амплитуда сотрясения земли увеличивается с увеличивающейся величиной землетрясения.

Иногда, однако, смещения усилены таким образом, при котором движения грунта больше на поверхности грунта, чем в глубине. Трубопровод или пытается следовать за движениями грунта, когда его сейсмические движения являются относительно маленькими, или пытается скользить между поверхностью его контакта с окружающим грунтом, когда такие движения грунта являются очень большими. Эти виды движений вызывают деформации и усилия в полиэтиленовых трубопроводах. Когда эти усилия и/или деформации больше, чем допустимые, имеет место разрушение трубопровода.

Эффект распространения волны в грунте вызывает осевые и изгибающие деформации трубопроводов из-за эффекта взаимодействия между грунтом и внешней поверхностью трубопровода.

10.1.2 Проектное движение грунта

Проектное сейсмическое движение на участке часто характеризуется как скорость сейсмического распространения волны.

Проектная скорость сейсмического распространения волны может быть вычислена:

$$V_g = ПСГ \cdot I_p \text{ (м/с)}, \quad (52)$$

где

$ПСГ$ - пиковая скорость грунта, определенная по формуле (4);

I_p - фактор важности (таблица 3).

10.1.3 Очевидная скорость распространения волн

Выбор волн, которые будут приняты во внимание и соответствующие скорости их распространения, должны быть основаны на геофизических исследованиях.

При рассмотрении сейсмического воздействия волн на трубопровод предполагается, что трубопровод находится только под воздействием этих волн и больше никаких других сейсмических эффектов на него не действует.

Параметр, характеризующий очевидную скорость распространения волн, используется, чтобы вычислить деформацию трубы, вызванную сейсмическими волнами. Очевидная скорость распространения сейсмической волны – скорость распространения сейсмической волны относительно поверхности грунта. Очевидная скорость распространения поверхностных волн представляет интерес, так как трубопроводы типично укладываются на небольшой глубине (1 – 3 м). Чтобы оценить осевую деформацию трубы, как правило, скорость сдвигающей волны (S-волна) используется для участков в пределах эпицентра землетрясения.

Для объемных волн рассматривают только S-волны, так как они несут больше энергии и производят большее колебание грунта, чем P-волны. Влияния S-волн используют на расстоянии до 5 глубин заложения трубопровода, а R-волны – на расстоянии более 5 глубин заложения (рис. 31).



Рис. 31 - Рассмотрение влияния S-волн и R-волн при проектировании полиэтиленового трубопровода

Для поверхностных волн рассматривают только R-волны, так как они вызывают осевую деформацию трубопровода, значительно большую, чем, вызванные L-волнами.

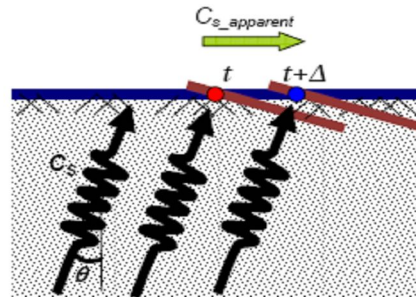


Рисунок 32 - Очевидное сейсмическое распространение S-волны

Для S-волн, когда есть угол в горизонтальной плоскости между осью трубы и направлением очевидного распространения волны, существует компонент колебания грунта параллельный оси трубы (рис. 32). Очевидная скорость распространения S-волны в направлении оси трубы (рис. 33) определяется по формуле:

$$C_{s-очев} = \frac{C_s}{\sin \theta \cos \gamma} \text{ (км/с)} \quad (53)$$

C_s - скорость сейсмического распространения волны для S-волн;

θ - угол падения S-волны;

γ - угол в горизонтальной плоскости.

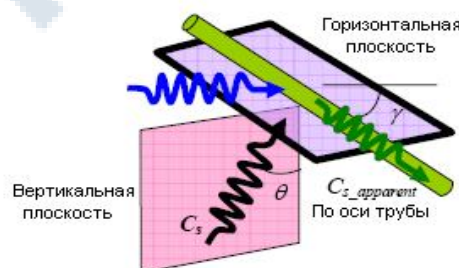


Рисунок 33 - Скорость распространения S-волны вдоль оси трубы

Для R-волны скорость фазы считают параллельной оси трубы и, следовательно, очевидная скорость распространения вдоль оси трубопровода (рис. 34) становится равной ее скорости:

$$C_{r-очев} = C_{r-ф} \text{ (км/с)}, \quad (54)$$

где

$C_{r-ф}$ - скорость фазы R-волны (км/с)

Вычисление скорости фазы R-волны сложно.

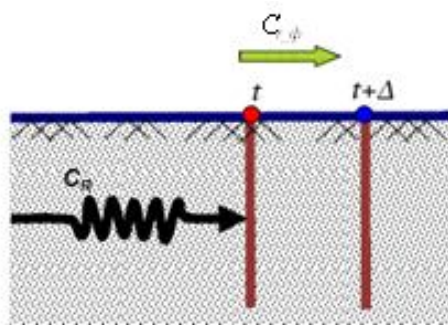


Рисунок 34 - Очевидное сейсмическое распространение R-волны

10.1.4 Определение деформаций трубопровода при сейсмическом распространении волн

Максимальная продольная осевая деформация полиэтиленового трубопровода из-за распространения сейсмической волны, может быть приближенно вычислена как:

$$\varepsilon_a = \frac{V_g}{C_{очев}} \cdot 100\% = \frac{V_g}{\alpha_c C} \cdot 100\% (\%), \quad (55)$$

где

V_g - Проектная скорость сейсмического распространения волны, вычисленная по формуле (52);

α_c - коэффициент деформации грунта, зависящий от угла падения и типа сейсмических волн, который принимается равным 2 для S-волн и 1 для R-волн;

C - скорость сейсмического распространения волны (км/с), соответствующая C_s для S-волн, и принимаемая равной 2.0 км/с и соответствующая $C_{r-ф}$ для R-волн, и принимаемая равной 0.5 км/с.

Максимальная осевая деформация трубы, возникающая из-за трения в зоне взаимодействия трубы с грунтом, вычисляется как:

$$\varepsilon_a = \frac{t_u \lambda}{4AE} \cdot 100\% \quad (56)$$

где

t_u - максимальная осевая сила, действующая на единицу длины трубопровода (формула (5));

λ - очевидная длина сейсмических волн на поверхности грунта, принимаемая равной 1000

м;

A - площадь поперечного сечения трубы (м²):

$$A = \frac{\pi}{4} (D_{\text{внеш}}^2 - D_{\text{внутр}}^2) (\text{м}^2) \quad (57)$$

E - модуль упругости материала трубы (МПа).

Осевая деформация, вычисленная по формуле (55) может быть взята, как деформация трубы из-за сейсмической опасности ($\varepsilon_{\text{сейсм}}$).

Однако, максимальная осевая продольная деформация трубы, вычисленная по формуле (55) не должна превысить максимальной деформации трубы из-за трения с грунтом (56).

Деформация трубы должна подтвердить допустимые критерии деформации, данные в формуле (23).

11. Пример 7 – Расчет трубопровода при сейсмическом распространении волн

Полиэтиленовый трубопровод такой же, как и в примере 2.

Общая деформация от эксплуатационных и внешних нагрузок составляет 2,52% (пример 2).

Ожидаемое ПУГ на участке составляет 0,45g для грунтов класса В (каменистые грунты). Величина момента магнитуды землетрясения (M_w) равна 6,5; горизонтальное расстояние от трубопровода до источника землетрясения берется равным 20 км.

Необходимо рассчитать деформацию трубы при сейсмическом распространении волны.

Решение:

ПУГ для грунтов класса Е по формуле (4) и таблице 5 составляет:

$$ПУГ_E = ПУГ_B \cdot 0,9 = 0,45g \cdot 0,9 = 0,405g.$$

Преобразуя ПУГ в ПСГ, с использованием таблицы 6, получаем:

$$ПСГ_E = 0,405 \cdot 140 = 56,7 \text{ см/с} = 0,57 \text{ м/с}.$$

Проектная скорость сейсмического распространения волны по формуле (52) составляет:

$$V_g = ПСГ_E \cdot I_p = 0,57 \cdot 1,5 = 0,86 \text{ м/с}.$$

Максимальная осевая деформация трубы из-за скорости сейсмического распространения волны по формуле (55) составляет:

$$\varepsilon_a = \frac{0,86}{2 \cdot 2000} \cdot 100\% = 0,02\%.$$

Максимальная осевая деформация ε_a в % , вызванная трением в зоне взаимодействия трубы с грунтом, по формуле (56) составляет:

$$\varepsilon_a = \frac{1,08 \cdot 10^3 \cdot 1000}{4 \cdot 0,002 \cdot 10^9} \cdot 100\% = 13,5\%.$$

Максимальная осевая деформация трубы из-за скорости сейсмического распространения волны (0,02 %) не превышает максимальной осевой деформации, вызванной трением в зоне взаимодействия трубы с грунтом (13,5 %).

Максимальная деформация трубы, вызванная из-за сейсмического распространения волны, взята как $\varepsilon_{сейсм}$, и составляет 0,02 %.

Общая деформация трубы составляет $2,52 \% + 0,02 \% = 2,54 \%$.

По формуле (23) определяем, что $2,54 \% < 10 \%$, следовательно, данная полиэтиленовая труба проходит по допустимым деформациям при данном сейсмическом распространении волны.

11.1 Рекомендации по уменьшению воздействия сейсмических волн на полиэтиленовый трубопровод

Следующие рекомендации могут поспособствовать уменьшению воздействия сейсмических волн на полиэтиленовый трубопровод:

1) сейсмическое распространение волны практически не имеет серьезного эффекта на сваренные трубопроводы в хорошем состоянии. Есть немного случаев, когда распространение волн приводило к серьезным повреждениям подземных трубопроводных систем, например:

- а) переходы между очень жесткими и очень мягкими грунтами;
- б) в тройниковых соединениях;
- в) в запорных устройствах.

2) в максимально возможной степени, выбор сейсмических волн и их соответствующие скорости распространения, должны быть основаны на геофизических исследованиях территории строительства.

3) эффект распространения волны на трубопроводы может быть минимизирован путем уменьшения силы трения в зоне взаимодействия трубы и грунта, используя подходящую засыпку.

12. Библиография

- [1] ИТК-GSDMA Guidelines for seismic design of buried pipelines;
- [2] Seismic Guidelines for Water Pipelines (National Institute of Building sciences);
- [3] EN 1998-4:2006 Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Silos, tanks and pipelines.