

# РАСЧЕТ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА ИЗ ТЕРМОПЛАСТОВ

Владимир Швабауэр. Игорь Гвоздев НТЦ «Пластик» ЗАО "Завод АНД Газтрубпласт"

## Введение

Пластмассовый подземный трубопровод работает совместно с окружающим его грунтом. Грунт создает собственную нагрузку, действующую на трубопровод, и передает нагрузки с поверхности, например, от движущегося или стоящего над ним транспорта.

Когда проектируют жесткий трубопровод, например, бетонный, принимают, что труба находится под воздействием главным образом вертикальных нагрузок грунта и транспорта; горизонтальные отпорные нагрузки не существуют или не принимаются в расчет. Это объясняется тем, что жесткие трубы (по определению) под землей так незначительно деформируются по горизонтали, что до момента разрушения не возникает никакой горизонтальной отпорной реакции грунта. Методы расчета подземных трубопроводов из традиционных материалов хорошо разработаны теоретически и экспериментально проверены /1/.

Пластмассовые трубы под действием вертикальной нагрузки грунта заметно деформируются, горизонтальный отпор грунта засыпки всегда возникает и оказывает большое влияние на способность трубы воспринять и перераспределить давление грунта. Попытки перенести методы расчета, изложенные в монографии Г.К.Клейна /1/, на пластмассовые трубы приводили к серьезным ограничениям в их подземной прокладке, что не соответствовало практическим результатам /2/.

Современные отечественные строительные правила /3/, дают только общие принципы деформационного и прочностного расчета трубопроводов из полимерных материалов при подземной прокладке, что ограничивает возможности выбора той или иной реальной ситуации строительства трубопровода. В связи с этим, нам представляется полезным провести анализ исходных предпосылок, а также методов расчета, предписываемых различными национальными строительными нормами.

## 1. Деформация труб под действием внешних нагрузок.

Рассмотрим два случая приложения к трубе внешней нагрузки, для которых в строительной механике имеются точные решения/1, 4 - 6/.

### 1.1 Равномерное внешнее гидростатическое давление.

В этом случае, при определенном уровне давления происходит потеря поперечной устойчивости трубы. Величина критического давления определяется:

$$P_{кр} = \frac{24 E I}{D_m^3} \quad (1)$$

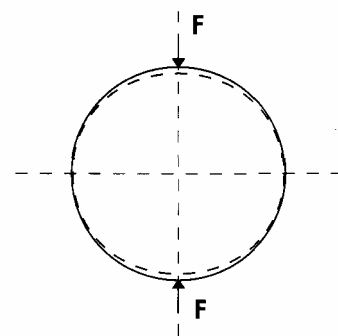
где:

$I = z^3/12$  - момент инерции стенки трубы на метр длины (м<sup>7</sup>м)  
 $s$  - толщина стенки трубы, м  
 $E$  - модуль упругости материала трубы, МПа.  
 $D^{\wedge}$  - диаметр трубы по средней линии  
 $P_{кр}$  - внешнее давление, вызывающее коллапс формы трубы, МПа.

### 1.2 Две поперечные силы.

Труба нагружена двумя диаметрально противоположными силами  $F$ , Н/м, распределенными по длине трубопровода.

Рис.1.



В этом случае уменьшение диаметра трубы (прогиб трубы) в плоскости приложения сил равно:

$$f = 0,01875 \frac{F D_m^3}{E I} \quad (2)$$

### 1.3 Характеристика поперечной жесткости трубы.

Заметим, что в соотношения (1) и (2) входит величина с размерностью МПа, характеризующая кольцевую жесткость трубы, которую принято обозначать  $S_R$

$$S_R = EI / D_m^3 \quad (3)$$

Сегодня это базисный классификатор подземных канализационных труб, принятый Международными и Европейскими стандартами (по аналогии с SDR для напорных труб).

С учетом уравнения (3), уравнения (1) и (2) принимают простой вид:

$$P_{кр} = 24 S_R \quad (1')$$

$$f = 0,01875 F / S_R \quad (2')$$

Подставив в уравнение (3) величину  $I = s^3/12$ , получим очевидную связь между двумя классификаторами трубопровода:

$$S_R = E s^3 / 12 D_m^3 = E / 12 / (SDR)^3 \quad (3')$$

Таким образом, кольцевая жесткость определяется модулем материала трубы и SDR.

Известно, что модуль зависит от времени действия нагрузки, температуры и напряжения (деформации) в стенке трубы. Для полимеров, кроме того, различают «модуль при изгибе», «модуль при растяжении», «модуль при сжатии» и, в принципе, это модули, могущие иметь различные числовые значения. Например, в примере расчета деформации подземного трубопровода, приведенного в [3], достаточно произвольно выбрана величина  $E_0 = 800$  МПа.

Приведем собственные результаты экспериментов по определению величины модуля в схеме нагружения, максимально соответствующей схеме нагружения подземного трубопровода.

Отрезок трубы помещали в тепловую камеру с заданной температурой испытаний и нагружали поперечной сосредоточенной нагрузкой по схеме рисунка 1.

Периодически измеряли поперечную деформацию трубы  $F(t, t) = AD$ .

Величину  $E$  для каждой температуры и времени испытания вычислили по уравнению, вытекающему из уравнения (2):

$$E(\tau, t) = \frac{0,225 F D_m^3}{f(\tau, t) s^3} \quad (4)$$

Испытанию подвергались образцы шириной 15...30 мм, изготовленные из труб диаметром 32...160 мм различных SDR.

На рисунке 2 в двойных логарифмических координатах представлены экспериментальные данные для полиэтилена высокой плотности. Цифры над линиями регрессии - температура °С. Очевидно, что в двойных логарифмических координатах зависимость модуля  $E$  от времени  $t$  хорошо описывается линейными зависимостями.

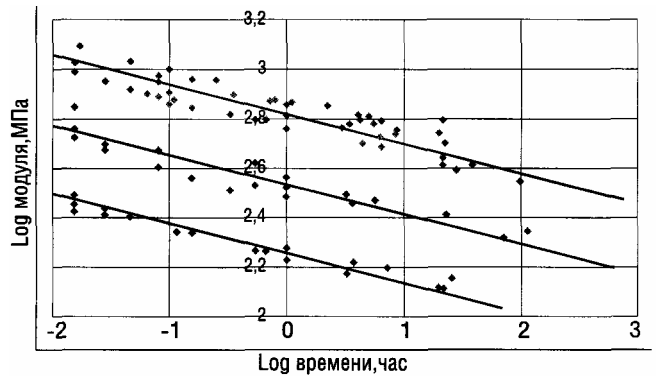


Рис.2.

Регрессионному анализу [5, 6] подверглось уравнение вида:

$$\text{Log } E = B_0 + B_1 * \text{Log } \tau + B_2 * t \quad (5)$$

где:  $B_0$ ,  $B_1$  и  $B_2$  - коэффициенты регрессионного уравнения.

Для достоверно-минимальных значений модуля ПЭ с вероятностью 97,5% получено регрессионное уравнение:

$$\text{Log } E = 4,0582 - 0,09198 * \text{Log } \tau - 0,0112 * t \quad (6)$$

которое определяет кратковременное (3 мин.) значение модуля  $E_0 = 915$  МПа.

Характер зависимости модуля полипропилена от температуры и времени такой же, как у полиэтилена, лишь величина в среднем вдвое больше.

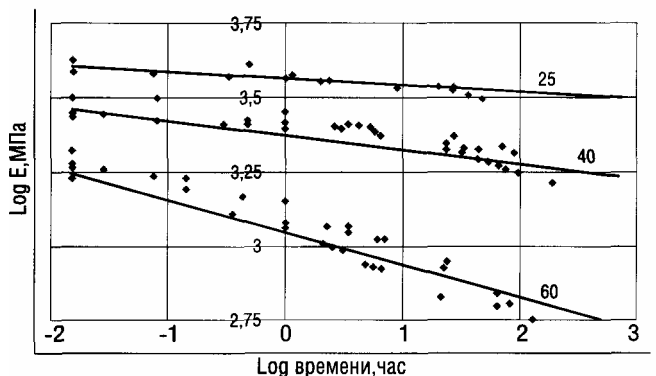
Для достоверно-минимальных значений модуля полипропилена получено регрессионное уравнение:

$$\text{Log } E = 4,379 - 0,0944 * \text{Log } \tau - 0,0133 * t \quad (7)$$

Соответственно, кратковременное (3 мин.) значение модуля  $E_0 = 1570$  МПа.

На рисунке 4 приведены результаты определения модуля для жесткого ПВХ. В отличие от полиэтилена и полипропилена в этом случае от температуры зависит не только величина модуля, но и темп его снижения во времени (угол наклона линий регрессии).

Рис.3.



Для достоверно-минимальных значений модуля ПВХ получено регрессионное уравнение:

$$\text{Log } E = 4,791 - 0,0015 * t * \text{Log } \tau - 0,0106 * t \quad (8)$$

Соответственно, кратковременное (3 мин.) значение модуля  $E_v = 3390$  МПа.

Рисунки 2 - 3 и уравнения 6 - 8 дают представления о величине модуля при поперечном нагружении трубы как функции температуры и времени.

При расчете стандартизированных величин  $S_R$  используют значения модуля, соответствующие времени нагружения, равного 3 мин. С точки зрения классификации трубы это вполне адекватные величины.

В таблице 1 приведены стандартизированные значения  $S_R$  и расчетные, полученные с использованием величин модуля, определенных в вышеуказанном эксперименте. Хорошее совпадение стандартизированных и расчетных значений  $S_R$  позволяет надежно экстраполировать полученные нами экспериментальные данные на более длительные времена нагружения.

Таблица 1. $S_R$ , МПа	0,002	0,004	0,008	0,016	0,032
SDR пвх	51	41	33	26	21
SR расчет	0,0021	0,0041	0,0078	0,018	0,03
SDR пвп	33	26	21	17	13,6
SR расчет	0,00214	0,00438	0,0083	0,0158	0,031

## 2. Влияние отпора грунта, окружающего трубопровод.

Как упоминалось во введении, грунт, в котором находится трубопровод, является не только нагрузкой и основанием, но и средой, оказывающей сопротивление или отпор перемещениям стенок трубопровода и повышающим несущую способность последнего. Влияние отпора сказывается тем значительнее, чем плотнее грунт и чем более гибки стенки трубопровода. Кажущееся увеличение несущей способности трубопровода можно описать добавлением в знаменатель уравнения (2') слагаемого, повышающего его кольцевую жесткость. Так как дальше пойдут чисто эмпирические рассуждения и выводы, перепишем «идеальное» уравнение (2') разбив коэффициент  $C$  на два коэффициента  $C_1$  и  $C_2$ , и заменив абсолютный прогиб относительным ( $f / D_m$ ), а сосредоточенную силу - интенсивностью грунтовой нагрузки (давлением)  $q$ .

$$f / D_m = \frac{C_1 q}{C_2 S_R + C_3 S_s} \quad (9)$$

где:  $q$  интенсивность вертикальной нагрузки грунта;  $S_R$  - кольцевая жесткость трубы, как определено уравнением (3) и таблицей 1;  $S_s$  - фактор жесткости грунта, базирующийся на текущем модуле грунта  $E'_s$  (см. далее). Все эти величины имеют размерность МПа. Уравнение (9) соответствует классическому уравнению Шпенглера /9/ (цитируется по /6/) и используется для определения относительного прогиба трубы практически всеми известными нам национальными стандартами и строительными правилами с тем или иным сочетанием и значением коэффициентов в числителе и знаменателе.

Приведем ряд примеров расчетных формул относительного прогиба подземного трубопровода, предписанных национальными строительными правилами.

Российские строительные правила/3/

$$f / D_m = \frac{0,11 q}{0,15 G_0 + 0,06 E'_s} \quad (9F)$$

где:  $G_0 = 53,7 E s^3 / 12 D^{\wedge 3} = 53,7 E / 12 (SDR)^3 = 53,7 S_R$ .

То есть кольцевая жесткость трубы  $G_0$ , принимаемая Российскими строительными правилами, отличается от международной классификации жесткости  $S_R$  на коэффициент 53,

Подставив в уравнение (9F)  $G_0 = 53,7 S_R$  получим сходное с последующими уравнение:

$$f / D_m = \frac{0,11 q}{8 S_R + 0,06 E'_s} \quad (9P)$$

Английские строительные правила

$$f / D_m = \frac{0,1 q}{8 S_R + 0,061 E'_s} \quad (9A)$$

Французские строительные правила

$$f / D_m = \frac{0,083 q}{16 S_R + 0,244 E'_s} \quad (9Ф)$$

Немецкие строительные правила

$$f / D_m = \frac{0,1 q}{16 S_R + 0,08 E'_s} \quad (9H)$$

Как можно видеть, национальные расчетные формулы построены сходным путем. Различия в коэффициентах связаны с различием в подходе к описанию распределения давления грунта в вертикальном и горизонтальном направлении (числитель), а также к взаимодействию характеристик жесткости трубы и грунта (знаменатель). Наиболее «сильный» знаменатель у Французской расчетной формулы, что при прочих равных условиях приводит к меньшим значениям прогиба (см. Пример расчета).

Метод расчета, принятый в Швеции, хотя и базируется на подобном уравнении, несколько отличается, и ниже мы рассмотрим его более подробно.

Секущий модуль грунта  $E'_s$  зависит от типа грунта и степени его уплотнения. Для примера приведем метод выбора характеристики грунта, принятый Французскими строительными правилами.

Различают группы грунтов (Таблица 2) и методы обустройства обратной засыпки.

Группа 1	Песок крупный и средней крупности
Группа 2	Мелкий песок
Группа 3	Супеси и суглинки
Группа 4	Плывун, глина

Таблица 3

Группа грунта	E's (МПа)	
	неуплотненный	уплотненный под контролем
1	0,7	2,0 - 5,0
2	0,8	1,2 - 3,0
3	0,5	1,0 - 2,5
4	<0,3	0,6

Полный анализ данных, приведенных в разных нормах, показывает, что при прокладке трубопровода на глубине более 4 метров с применением грунтов обратной засыпки группы 1 - 3, механического уплотнения и контроля, величина E's может составлять 2,5 - 5,0 МПа.

### 3. Нагрузка транспорта и грунта

Влияние нагрузки транспорта рассчитывается с применением распределения давления по теории Буссинеска. Максимальное вертикальное давление имеет место непосредственно под точкой приложения нагрузки T и определяется /1/ уравнением:

$$q_T = 0,478 T / H^2 \quad (10)$$

где: T - вес транспортного средства (на ось), H; H - глубина засыпки трубопровода, м.

Нагрузка грунта на метр длины трубопровода Q<sub>г</sub> Н/м может быть определена либо по методу «в насыпи», либо «в траншее». Метод «в насыпи» дает более тяжелые условия нагружения:

$$Q_g = \gamma H D \quad (11)$$

где  $\gamma$  - плотность грунта (нормально 18-19 кН/м<sup>3</sup>) Для траншеи нагрузка на 20% ниже вследствие арочного эффекта:

$$Q_g = 0,8 \gamma H D \quad (11')$$

Когда уровень грунтовых вод превышает уровень укладки трубопровода, плотность грунта уменьшают до кажущейся плотности грунта в воде, обычно 11 кН/м<sup>3</sup>.

Общее вертикальное давление грунта, используемое в уравнениях (9) и (14), определяется как сумма:

$$q = Q_g / D + q_T \quad (12)$$

### 4. Шведский метод расчета /4/.

Шведский метод расчета базируется на достоверно установленном факте, что в течение нескольких дней после квалифицированной укладки и засыпки устанавливается так называемый первоначальный прогиб трубы, достаточно корректно определяемый по уравнению (14). Далее в течение 1-3 лет, вследствие естественных подвижек грунта, прогиб незначительно увеличивается до постоянного в дальнейшем уровня. Причем эта величина не объясняется снижением модуля упругости материала трубы во времени, а лишь естественными подвижками грунта обратной засыпки. Состояние, когда прогиб трубы не увеличивается постоянно,

соответствует достижению состоянию равновесия, то есть секущий модуль грунта увеличился до более или менее постоянного значения. Это значение зависит больше всего от тщательности прокладки трубопровода и проведения обратной засыпки. Рыхлый грунт и плохая засыпка всегда дают большой начальный прогиб трубы и большую степень его последующего увеличения. Профессиональная прокладка трубопровода обеспечивает приемлемый начальный прогиб трубы, нормально возрастающий за один, два года на 2-3%. Процесс уплотнения и проседания грунта не может быть ускорен искусственно, но активизируется нагрузкой транспорта, движением грунтовых вод, действием мороза и т.д.

Согласно Шведским нормам, максимальный вертикальный прогиб определяется следующим путем.

Первым определяется теоретический прогиб по уравнению (14). При этом, как правило, при проектировании его ограничивают значением 3%. К этому значению прибавляется деформация, связанная с методом прокладки и фактор слабости постели.

$$(f/D)_M = (f/D)_T + I_f + V_f \quad (13)$$

где:

(f/D)<sub>M</sub> - максимальный прогиб, %

(f/D)<sub>T</sub> - теоретически рассчитанный прогиб, %

I<sub>f</sub> - фактор прокладки, %

V<sub>f</sub> - фактор постели, %

Теоретический прогиб в относительной величине подсчитывается:

$$(f/D)_q = \frac{0,083 q}{16 S_R + 0,122 E'_s} \quad (14)$$

Для наносного грунта, песка и гравия в таблице 4 даны /6/ минимальные значения E's, которые используются в Шведском методе определения прогиба по уравнению (14). Таблица 4

Глубина засыпки, м	E's, МПа		
	Неуплотненный	Уплотненный вручную	Уплотненный механически
1	0,5	1,2	1,5
2	0,5	1,3	1,8
3	0,6	1,5	2,1
4	0,7	1,7	2,4
5	0,8	1,9	2,7
6	1,0	2,1	3,0

Для глинистых почв рекомендуется принимать E's=0, то есть пренебрегать отпором грунта. Понятно, что это наиболее тяжелые условия прокладки трубопровода.

Значения факторов прокладки и постели в уравнении (13) эмпирические.

На базе многочисленных измерений, сделанных на пластмассовых трубах в Швеции, для укладки труб в траншее приняты значения факторов I<sub>f</sub> и V<sub>f</sub>, приведенные в таблице 5 и 6.

Условия прокладки	Фактор $I_f$ , %
Без надзора в момент строительства	1,2
Под надзором в момент строительства	0
Тяжелый строительный транспорт при глубине <1,5 метра	1-2
Уплотнение засыпки вокруг трубы тяжелым инструментом	0-1

Характеристика постели	Фактор $B_f$ , %	
	Качественное исполнение	Обычное исполнение
Постель песчаная без включений	1 - 2	2 - 4
Постель песчаная с включениями гравия	2 - 3	3 - 5

Таким образом, установившийся прогиб трубы может превышать первоначальный на 2-7 %.

## 5. Пример расчета.

Труба из полиэтилена высокой плотности наружным диаметром 800 мм (0,8 м) SDR 21, имеющая нормативную кольцевую жесткость  $SR = 0,008$  МПа, укладывается на качественно подготовленное основание ( $B_f = 2\%$ ), пазухи и бока трубы засыпаются песком и уплотняются тяжелым инструментом ( $E_s = 2,5$  МПа,  $I_f = 1\%$ ). Труба засыпается грунтом плотностью  $\gamma = 19$  кН/м<sup>3</sup>. Высота засыпки  $H = 8$  м. Наземный транспорт с осевой нагрузкой  $T = 260$  кН.

1. Нагрузка грунта (11)  $Q_g = 19 \cdot 8 = 152$  кН/м
2. Давление от транспортной нагрузки (10)  $q_t = 0,478 \cdot 260 / 64 = 1,942$  кН/м<sup>2</sup>
3. Суммарное вертикальное давление на трубу (12)  $q = 152 + 1,942 = 153,9$  кН/м<sup>2</sup> = 0,154 МПа

Приняв эти общие условия строительства подземного трубопровода, сравним теперь результаты расчета прогиба трубы по уравнениям (9), (13) и (14) для различных национальных строительных правил (Таблица 7).

Как видно из таблицы 7, величины значений прогиба, определенные по различным строительным нормам, сопоставимы, за исключением норм Франции. Малые значения прогиба в этом случае связаны с высокими требова-

Прогиб, %	СП 40-102-2000	Англия	Франция	Германия	Швеция
Напряжение, МПа	8.1 11,3	7,1 9,9	1,8 2,9	4,7 6,6	6,6 9,2

ниями Французских норм по контролю за уплотнением грунта и, как следствие, большим значением коэффициента при  $E_s$ .

Начальные напряжения, возникшие в стенке трубы при этих величинах прогиба, определены по уравнению

$$\sigma = 3,2 E (f/D)_M / (SDR) \quad (15)$$

при начальном значении модуля  $E = 915$  МПа.

Необходимо отметить, что это напряжение является релаксирующим, и в соответствии с темпом снижения модуля (уравнение 6), в течение часа их уровень уменьшится в два раза, а за год - в четыре. Таким образом, их величина значительно ниже допускаемых напряжений, используемых для расчета несущей способности напорных труб.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г.К. Клейн Расчет подземных трубопроводов. Москва, Издательство литературы по строительству, 1969.
2. А.В. Сладков Проектирование и строительство наружных сетей водоснабжения и канализации из пластмассовых труб. Москва, Стройиздат, 1988.
3. СП 40 -102 - 2000 Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов.
4. В.И. Федосьев. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов. Москва, «Наука» 1975
5. С.В. Бояршинов. Основы строительной механики машин. Москва, «Машиностроение» 1973.
6. Janson L-E, Plastics pipes for water supply and sewage disposal., Borealis 1996
7. А. Хальд. Математическая статистика с техническими приложениями. Москва, издательство иностранной литературы 1956.
8. Н. Дрейпер, Г. Смит. Прикладной регрессионный анализ. Москва, «Статистика» 1973.
9. Spangler M.G. 1941. Structural design of flexible pipe culverts. Iowa Eng. Exp Stat. Bull. 153.1941/