

Министерство образования и науки Российской Федерации
Вологодский государственный технический университет

Кафедра «Сопротивление материалов»

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Методические указания и варианты задания РПР-3
«Расчет стального подземного трубопровода»

Факультеты: экологии, ЗДО

Направление подготовки – 270800.62 «Строительство»
Профиль подготовки: «Водоснабжение и водоотведение»

Вологда
2013

Прикладная механика систем водоснабжения и водоотведения:
методические указания и варианты задания РПР-3 «Расчет стального
подземного трубопровода». – Вологда: ВоГТУ, 2013. - 28 с.

Методические указания содержат варианты задания третьей расчетно-практической работы по дисциплине «Прикладная механика систем водоснабжения и водоотведения» и предназначены для учащихся бакалавриата по направлению подготовки -270800.62 «Строительство», профиль подготовки - «Водоснабжение и водоотведение» очной и заочной формы обучения.

Утверждено редакционно-издательским советом ВоГТУ

Составитель Соколов О.Л., д-р техн. наук, профессор

Рецензент Лебедева Е.А., канд. техн. наук, доцент,
и. о. зав. кафедрой «Водоснабжение и водоотведение».

ПРИНЦИПЫ РАСЧЁТА СТАЛЬНЫХ ТРУБ НАРУЖНЫХ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Рассмотрим вопросы РАСЧЁТА, целью которого является определение толщины стенок стальных труб, предназначенных для наружных подземных сетей водоснабжения и канализации.

Основные обозначения:

t – толщина стенки трубопровода,

d_e – диаметр трубопровода,

p – расчетное внутреннее давление,

h – глубина заложения (до верха трубы),

R_y – расчётное сопротивление стали,

t_e – расчётная температура наружного воздуха,

F_{red} – расчётная приведённая внешняя нагрузка.

Определение толщины стенок труб подземных сетей производится на основании двух отдельных расчётов:

- 1) статического расчёта на прочность, деформацию и устойчивость под действием внешней нагрузки с учётом образования вакуума;
- 2) на внутреннее давление при отсутствии внешней нагрузки.

Из двух значений принимается большее.

При этом расчётная приведённая внешняя нагрузка складывается из: давления грунта и грунтовой воды, временных нагрузок на поверхности земли и веса транспортируемой жидкости.

А расчётное внутреннее давление для стальных трубопроводов подземной прокладки принимается равным наибольшему возможному по условиям эксплуатации давлению на различных участках (при наиболее невыгодном режиме работы) без учёта его повышения при гидравлическом ударе.

Исходными данными для расчёта являются:

- диаметр трубопровода d_e ,
- класс по степени ответственности,
- расчётное внутреннее давление p ,
- глубина заложения (до верха трубы) h ,
- характеристика грунтов засыпки.

Для расчёта весь трубопровод разбивается на участки, в пределах которых все перечисленные данные постоянны.

Определение толщины стенок трубопровода может быть произведено без расчёта, с помощью таблиц Пособия [1] при следующих условиях:

1. $h=1\div 6$ м.
2. $R_y=150\div 400$ МПа,
3. временная нагрузка НГ-60,
4. укладка труб в насыпи или траншее с откосами.

Во всех других случаях требуется индивидуальный расчёт, включающий в себя:

1. Определение расчётных приведённых внешних нагрузок;
2. Определение толщины стенки расчетом на прочность, деформацию и устойчивость при действии внешней нагрузки, а также расчётом на внутреннее давление.

1. Определение нагрузок на подземные трубопроводы

В зависимости от продолжительности действия по СНиП 2.01.07 – 85 нагрузки подразделяются на постоянные, временные, длительные, кратковременные и особые.

К постоянным нагрузкам относятся: собственный вес труб, давление грунта и грунтовой воды.

К временным длительным: вес транспортируемой жидкости, внутреннее рабочее давление в трубопроводе, давление от транспортных нагрузок в местах, предназначенных для проезда, или давление от временных длительных нагрузок, расположенных на поверхности земли, температурные воздействия.

К кратковременным нагрузкам относят: давление от транспортных нагрузок в местах, не предназначенных для движения, испытательное внутреннее давление.

К особым нагрузкам относятся: внутреннее давление жидкости при гидравлическом ударе, атмосферное давление при образовании в трубопроводе вакуума, сейсмическая нагрузка.

Расчёт трубопроводов должен производиться на наиболее опасные сочетания нагрузок, принимаемые по СНиП 2.01.07 – 85, возникающие в стадиях хранения, транспортировки, монтажа, испытания и эксплуатации труб.

На величину внешних нагрузок существенное влияние оказывают следующие факторы:

- условия укладки труб (в траншею, насыпь или узкую прорезь (показана на рис. 1))
- способы опирания труб на основание (плоское грунтовое, грунтовое спрофилированное по форме трубы или на бетонный фундамент (рис. 2)),
- степень уплотнения грунтов засыпки (нормальная, повышенная или плотная, достигаемая намывом),
- глубина заложения, определяемая высотой засыпки над верхом трубопровода.

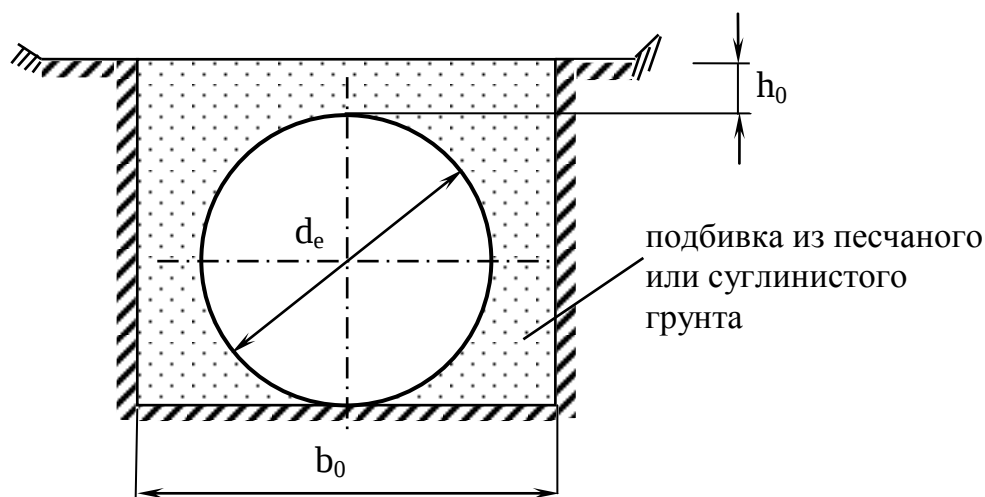


Рис. 1

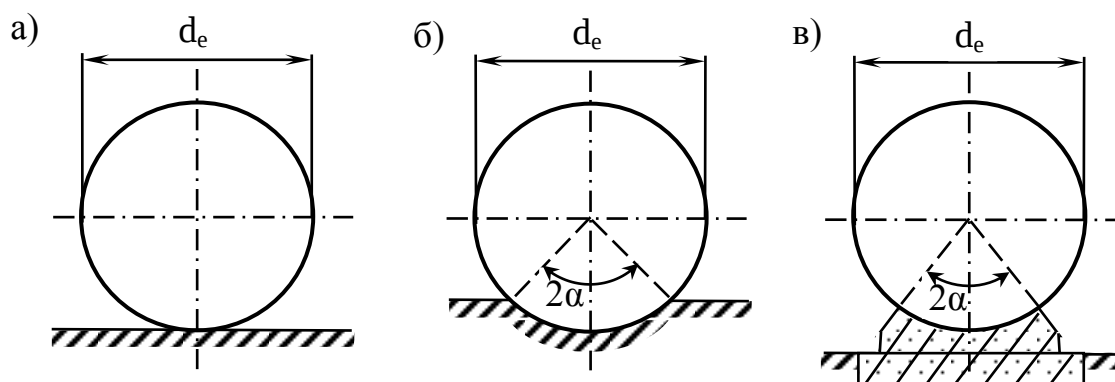


Рис. 2:

а – плоское грунтовое основание, б – грунтовое спрофилированное основание с углом охвата 2α , в – бетонный фундамент

При засыпке трубопровода должно производиться послойное уплотнение грунта с обеспечением коэффициента уплотнения не менее 0,8 – при нормальной степени уплотнения и не менее 0,93 – при повышенной степени уплотнения. Наиболее высокая степень уплотнения грунта достигается гидронамывом.

Для обеспечения расчетной работы трубы уплотнение грунта должно производиться на высоту, не менее, чем на 20 см выше трубы. Грунты засыпки по степени их воздействия на напряженное состояние труб делятся на условные группы:

Таблица 1

Условные группы	Грунт
Гэ – I	Пески (кроме пылеватых)
Гэ – II	Пески пылеватые
Гэ – III	Супеси, суглинки
Гэ – IV	Глины

Нормативные и расчётные нагрузки от давления грунта и грунтовой воды

На рис.3 и 4 приведены соответствующие схемы нагрузок.

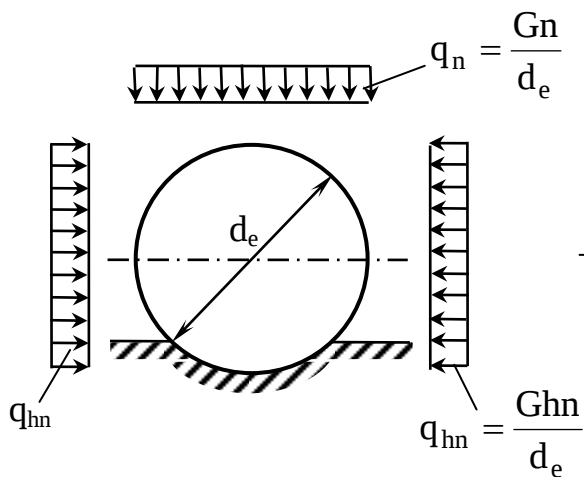


Рис. 3

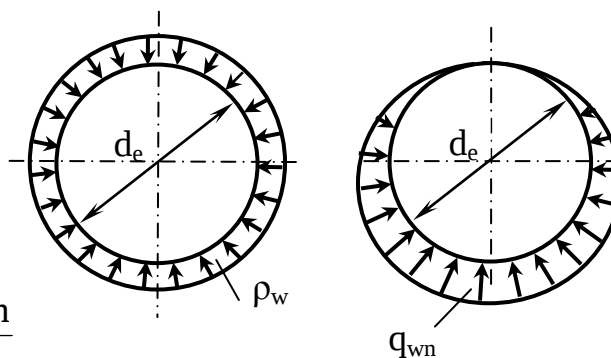


Рис. 4

Равнодействующая нормативной вертикальной нагрузки на единицу длины трубопровода от давления грунта $G_n \left[\frac{\text{кН}}{\text{м}} \right]$ определяется по формулам:

- при укладке в траншее:

$$G_{1n} = \gamma_n h \cdot b \cdot \alpha_1 \cdot \psi; \quad (1)$$

- при укладке в насыпи:

$$G_{2n} = \gamma_n \cdot h \cdot d_e \cdot \alpha_2; \quad (2)$$

- при укладке в прорези:

$$G_{3n} = \gamma_n \cdot h \cdot b_0 \cdot \alpha_3. \quad (3)$$

В этих формулах обозначено:

h – глубина заложения до верха трубы [м],

d_e – наружный диаметр трубопровода [м],

γ_n – нормативное значение удельного веса грунта засыпки $\left[\frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \right]$,

принимаемое по таблице 2.

Таблица 2

Условная группа грунтов засыпки	Нормативная плотность ρ_n [т/м ³]	Нормативный удельный вес γ_n , [кН/м ³]	Нормативный модуль деформации грунтов E [МПа] при степени уплотнения		
			нормальной	повышенной	плотной (при намыве)
Гэ – I	1,7	16,7	7	14	21,5
Гэ – II	1,7	16,7	3,9	7,4	9,8
Гэ – III	1,8	17,7	2,2	4,4	-
Гэ – IV	1,9	18,6	1,2	2,4	-

b – ширина траншеи на уровне верха трубы [м];

α_1 – коэффициент, зависящий от отношения $\frac{h}{b_m}$ и от веса грунта засыпки,

принимаемый по таблице 3;

b_m – ширина траншеи на уровне середины расстояния между поверхностью земли и верха трубы [м];

b_0 – ширина прорези [м];

ψ – коэффициент, учитывающий разгрузку трубы грунтом, находящимся в пазухах между стенками траншеи и трубопроводом, определяемый по

формуле: $\psi = \frac{1}{1 + 2 \frac{B}{B_t} \cdot \frac{b - d_e}{k \cdot d_e}}$, причем, (4)

если эта величина окажется меньше $\frac{d_e}{b}$, то в формуле (2) принимается $\psi = \frac{d_e}{b}$;

Таблица 3

h/ b _m	К-т α_1 в зависимости от грунтов засыпки		
	Гэ – I	Гэ – II, Гэ – III	Гэ – IV
0	1	1	1
0,1	0,981	0,984	0,986
0,2	0,962	0,868	0,974
0,3	0,944	0,952	0,961
0,4	0,928	0,937	0,948
0,5	0,91	0,923	0,936
0,6	0,896	0,91	0,925
0,7	0,881	0,896	0,913
0,8	0,867	0,883	0,902
0,9	0,852	0,872	0,891
1	0,839	0,862	0,882
1,1	0,826	0,849	0,873
1,2	0,816	0,84	0,865
1,3	0,806	0,831	0,857
1,4	0,796	0,823	0,849
1,5	0,787	0,816	0,842
1,6	0,778	0,809	0,835
1,7	0,765	0,79	0,815
1,8	0,75	0,775	0,8
1,9	0,735	0,765	0,79
2	0,725	0,75	0,78
3	0,63	0,66	0,69
4	0,555	0,585	0,62
5	0,49	0,52	0,56
6	0,435	0,47	0,505
7	0,39	0,425	0,46
8	0,35	0,385	0,425
9	0,315	0,35	0,39
10	0,29	0,32	0,35
15	0,195	0,22	0,255

$B=0,125E$ – параметр, характеризующий жёсткость грунта засыпки [МПа];

B_t – параметр, характеризующий жёсткость трубопровода [МПа], определяемый формулой:

$$B_t = \frac{2E_a}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{d_m} \right)^3, \quad (5)$$

E – модуль деформации грунта засыпки [МПа],

E_a, ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала трубопровода,

t – толщина стенки трубопровода [м],

d_m – средний диаметр поперечного сечения трубы [м],

kd_e – часть вертикального наружного диаметра трубопровода, находящегося выше плоскости основания [м];

α_2 – коэффициент, зависящий от вида грунта основания и от способа опирания трубопровода, определяемый:

- для жёстких труб (кроме стальных, полиэтиленовых и упругих гибких труб) при отношении $h/d_e \geq 2,5$ – по таблице 4, при $0,5 \leq h/d_e < 2,5$ в формуле (2) вместо α_2 подставляется величина α_{21} , определяемая формулой (6), причём величина α_2 , входящая в эту формулу, определяется по табл. 4:

$$\alpha_{21} = 1,04 \left[\alpha_2 - 0,04 - (\alpha_2 - 1) \left(\frac{d_e}{2h} \right)^2 \right], \quad (6)$$

при $h/d_e < 0,5$ принимается $\alpha_{21} = 1$;

- для гибких труб α_2 определяется по формуле (7), причём, если окажется, что $B_t \leq B$, то в формуле (2) принимается $\alpha_2 = 1$:

$$\alpha_2 = \frac{3(B_t + B)}{2(B_t + 2B)}, \quad (7)$$

α_3 – коэффициент, принимаемый в зависимости от величины отношения h_0/d_e , где h_0 – величина заглубления в прорезь верха трубопровода (рис. 1):

h_0 / d_e	0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
α_3	1	0,83	0,71	0,63	0,57	0,52

Расчётные вертикальные нагрузки от давления грунта получаются умножением нормативных нагрузок на коэффициент надёжности по нагрузке $\gamma_f = 1,15$.

Равнодействующая нормативной горизонтальной нагрузки G_{hn} [кН/м³] по всей высоте трубопровода от бокового давления грунта с каждой стороны определяется по формулам:

- при укладке в траншее

$$G_{1hn} = \gamma_n h \cdot d_e \cdot \alpha_1 \cdot \lambda; \quad (8)$$

- при укладке в насыпи:

$$G_{2hn} = \gamma_n \left(h + \frac{d_e}{2} \right) \cdot d_e \cdot \lambda_2; \quad (9)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты, принимаемые по табл.5;

- при укладке в прорези боковое давление грунта не учитывается.

Таблица 4

Грунты основания	Коэффициент α_2 при отношении $h/d_e > 2,5$ и укладке труб на ненарушенный грунт с				
	плоским основанием	профилированным с углом охвата			опиранием на бетонный фундамент с $2\alpha=120$
		75°	90°	120°	
Скальные, глинистые (очень прочные)	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Пески гравелистые, крупные, средней крупности и мелкие плотные. Глинистые грунты прочные	1,4	1,43	1,45	1,47	1,5
Пески гравелистые, крупные, средней крупности и мелкие средней плотности. Пески пылеватые плотные; глинистые грунты средней плотности	1,25	1,28	1,3	1,35	1,4
Пески гравелистые, крупные, средней крупности и мелкие рыхлые. Пески пылеватые средней плотности; глинистые грунты слабые	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
Пески пылеватые рыхлые; грунты текучие	1	1	1	1,05	1,1

Таблица 5

Условные группы грунтов засыпки	К-ты $\lambda_1, \lambda_2, \eta$ при степени уплотнения засыпки							
	нормальной				повышенной и плотной			
	При укладке труб в							
	траншее		насыпи		траншее		насыпи	
	λ_1	η	λ_2	η	λ_1	η	λ_2	η
Гэ -I	0,1	0,95	0,3	0,86	0,3	0,86	0,5	0,78
Гэ – II, Гэ – III	0,05	0,97	0,2	0,9	0,25	0,88	0,4	0,82
Гэ – IV	0	1	0,1	0,95	0,2	0,9	0,3	0,86

Примечание. При устройстве под трубопроводом свайного основания принимается $\alpha_2=1,6$ независимо от вида грунта основания.

Расчетные горизонтальные нагрузки от давления грунта получаются умножением нормативных нагрузок на коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f=0,9$.

Для всех грунтов, кроме глин, при заложении трубопроводов ниже постоянного уровня грунтовых вод следует учитывать уменьшение удельного веса грунта, расположенного ниже этого уровня. Кроме того, отдельно учитывается давление грунтовых вод на трубопровод.

Нормативное значение удельного веса взвешенного в воде грунта $\gamma_{сwn}$ [кН/м³] определяется по формуле:

$$\gamma_{сwn} = \frac{17}{(1 + \epsilon)}, \quad (10)$$

где ϵ - коэффициент пористости грунта.

Нормативное давление грунтовой воды на трубопровод определяется в виде двух составляющих. Это:

- равномерная нагрузка p_w [кН/м²], равная напору под трубой

$$p_w = 9,8 h_w; \quad (11)$$

- неравномерная нагрузка q_{wn} [кН/м²], которая у лотка трубы вычисляется по формуле:

$$q_{wn} = 9,8 d_e. \quad (12)$$

Равнодействующая этой нагрузки G_{wn} [кН/м], направлена вверх и равняется

$$G_{wn}=7,7d_e^2 \quad (13)$$

где h_w - высота столба грунтовой воды над верхом трубопровода [м].

Расчетные нагрузки от давления грунтовой воды получаются умножением нормативных нагрузок на коэффициент надежности по нагрузке, который принимается равным:

$\gamma_f=1,1$ – для равномерной части нагрузки и при расчёте на всплытие для неравномерной части,

$\gamma_f=0,9$ – при расчёте на прочность и деформацию для неравномерной части нагрузки.

Нормативные и расчётные нагрузки от воздействия транспортных средств и равномерно распределённой нагрузки на поверхности засыпки

Временные нагрузки от подвижных транспортных средств следует принимать:

- для трубопроводов под автомобильными дорогами: нагрузку от колонн автомобилей Н-30 или колёсную нагрузку НК-80 (по большему силовому воздействию на трубопровод),

- для трубопроводов в местах с нерегулярным движением автотранспорта: нагрузку от колонны автомобилей Н-18 или от гусеничного транспорта НГ-60 (по большему воздействию),

- в местах, где движение автотранспорта невозможно: равномерно распределённую нагрузку интенсивностью 5 кН/м^2 ,

- под железнодорожными путями: нагрузки от подвижного состава К-14 или другую, соответствующую классу данной ж/д линии.

Равнодействующие нормативной вертикальной и горизонтальной нагрузок V_n и V_{hn} [кН/м] на трубопровод от автомобильного и гусеничного транспорта определяют по формулам:

$$V_n = v_n d_e \mu \alpha_2 \quad (14)$$

$$V_{hn} = v_n d_e \mu \lambda_2, \quad (15)$$

где μ – динамический коэффициент подвижной нагрузки, зависит от высоты h засыпки вместе с покрытием:

h[м]	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	≥1
μ	1,17	1,14	1,1	1,07	1,04	1

v_n – нормативное равномерное давление [кН/м²], принимаемое по таблице Приложения в зависимости от приведённой глубины заложения:

$$h_{red} = h + h_{sup} \left(\sqrt[3]{\frac{E_{sup}}{E}} - 1 \right), \quad (16)$$

где h_{sup} – толщине слоя покрытия [м],

E_{sup} – модуль деформации покрытия (дорожной одежды) [МПа].

Расчётные нагрузки получают умножением нормативных нагрузок на коэффициенты надёжности по нагрузке γ_f :

- для вертикального давления нагрузок Н-30, Н-18 и Н-10 $\gamma_f=1,2$,
- для вертикального давления нагрузок НК-80 и НГ-60 и горизонтального давления всех нагрузок $\gamma_f=1$.

Нормативные нагрузки от ж/д транспорта:

$$V_n = v_n d_e \mu \alpha_2 \quad (17)$$

$$V_{hn} = v_n d_e \mu \lambda_2, \quad (18)$$

v_n – давление от нагрузки К-14 (по таблице Приложения).

Коэффициенты надёжности здесь:

- для вертикального давления $\gamma_f=1,3$;
- для горизонтального давления $\gamma_f=1,2$.

От действия равномерно распределенной нагрузки интенсивностью v_{an} [кН/м²] равнодействующие нормативные нагрузки:

$$V_{an} = v_{an} d_e \alpha_2 \quad (19)$$

$$V_{ahn} = v_{an} d_e \lambda_2, \quad (20)$$

Коэффициенты надёжности:

- для вертикального давления $\gamma_f=1,4$;
- для горизонтального давления $\gamma_f=1,0$.

Нормативные и расчетные нагрузки от собственного веса труб и веса транспортируемой жидкости

Равнодействующая нормативной вертикальной нагрузки от собственного веса трубопровода:

$$G_{mn} = \pi \gamma_{mn} t \frac{d_i + d_e}{2}, \quad \left[\frac{\text{кН}}{\text{м}} \right], \quad (21)$$

где $\pi=3,14$,

d_i –внутренний диаметр [м],

d_e – внешний диаметр [м],

t – толщина стенки трубы [м],

γ_{mn} -нормативное значение удельного веса материала трубы [кН/м³].

Для получения расчетной нагрузки G_{mn} умножается на $\gamma_f=1,1$.

Равнодействующая нормативной вертикальной нагрузки от веса жидкости:

$$V_{wn} = \frac{\pi}{4} \gamma_{wn} d_i^2, \quad (22)$$

где γ_{wn} – нормативное значение удельного веса жидкости [кН/м³];

- для воды пресной ÷9,8;
- для воды морской ÷10,1;
- для сточной жидкости ÷10,4;
- для пульпы ÷14,7.

Опорные реакции и эквивалентные приведенные нагрузки

Направление опорных реакций трубопровода, укладываемого на грунтовое основание, принимается вертикальным, а распределение - равномерным по всей ширине опорной поверхности, определяемой углом охвата трубопровода.

Нормативная интенсивность опорной реакции основания:

$$q_f = \frac{\sum (G_n + V_n)}{d_e \sin \alpha}. \quad (23)$$

При укладке трубопровода на грунтовое основание $2\alpha=30^\circ$.

Направление опорных реакций трубопровода, укладываемого на бетонный фундамент, принимается нормальным к поверхности трубопровода, а распределение – равномерным по всей поверхности касания.

Расчет трубопроводов следует вести по приведенным нагрузкам:

$$F_{\text{ред}} = \sum (G + V) \eta \beta, \quad (24)$$

где $F_{\text{ред}}$ - расчетная приведенная внешняя нагрузка, которая представляет собой вертикальные нагрузки, приложенные вдоль верхней и нижней образующих трубы по направлению к ее оси и эквивалентные по максимальному изгибающему моменту действию фактических нагрузок,

$\sum (G + V)$ - равнодействующая расчетной вертикальной нагрузки, определенная для всех учитываемых в расчете видов нагрузки $\left[\frac{\text{кН}}{\text{м}} \right]$,

β – коэффициент приведения (табл. 6),

η – коэффициент бокового давления (табл.5)

Таблица 6

Способ укладки труб	Коэффициент β для нагрузок от	
	Давления грунта и временных нагрузок	Собственного веса трубопровода и транспортируемой жидкости
1. На плоское грунтовое основание с подбивкой засыпки под круглые трубы	0,75	0,60
2. На грунтовое опрофилированное основание с углом охвата трубы:		
- $2\alpha=75^\circ$	0,55	0,37
- $2\alpha=90^\circ$	0,50	0,32
- $2\alpha=120^\circ$	0,45	0,25
3. На ж/б фундамент с углом охвата		
- $2\alpha=120^\circ$	0,35	0,20

2. Расчет труб на прочность, деформацию и устойчивость

а). Определение толщины стенки по условию прочности от действия внешних нагрузок на пустой трубопровод:

$$t_1 = \sqrt{\frac{F_{\text{ред}} \cdot d_e \cdot \xi}{0,00105 R_y m}}, \quad [\text{мм}], \quad (25)$$

где $F_{\text{ред}}$ - расчетная приведенная внешняя нагрузка, определяемая как сумма всех действующих нагрузок в их наиболее опасном сочетании $\left[\frac{\text{кН}}{\text{м}} \right]$,

ξ - коэффициент, учитывающий совместное действие отпора грунта и внешнего давления, определяемый формулой:

$$\xi = \frac{0,1B + B_t}{1,1B + B_t - p_v - p_w}, \quad (26)$$

B, B_t - параметры, характеризующие жесткость грунта [МПа],

p_v - величина вакуума в трубопроводе, принимаемая равной до 0,8МПа (задается технологическими отделами),

p_w – величина внешнего гидростатического давления, учитываемого при прокладке трубопровода ниже уровня грунтовых вод [МПа],

m – общий коэффициент, равный $m = \frac{m_1}{\gamma}$,

m_1 - коэффициент, учитывающий кратковременность испытания, которому подвергаются трубы после их изготовления ($m_1=0,9$),

γ - коэффициент надежности, учитывающий класс участка трубопровода по степени ответственности:

- для 1 класса $\gamma=1$,
- для 2 класса $\gamma=0,95$,
- для 3 класса $\gamma=0,9$;

R_y – расчетное сопротивление стали [МПа],

d_e – наружный диаметр трубы [м].

б). Определение толщины стенки по условиям деформации (укорочения вертикального диаметра на 3% от воздействия суммарной приведенной внешней нагрузки):

$$t_2 = 1,47 \sqrt[3]{10F_{red} d_e^2 \xi}, \quad [\text{мм}], \quad (27)$$

в). Определение толщины стенки от воздействия внутреннего гидравлического давления при отсутствии внешней нагрузки:

$$t_3 = \frac{500 p d_e}{m R_y + p}, \quad [\text{мм}], \quad (28)$$

где p – расчетное внутреннее давление [МПа].

г). Проверка устойчивости круглой формы поперечного сечения трубопровода при образовании в ней вакуума:

$$\frac{F_{red}}{1000 d_e \beta} + p_v + p_w \leq 1,2 \sqrt{B \cdot B_t}, \quad (29)$$

где β – коэффициент приведения внешних нагрузок (табл.6).

За расчетную толщину стенки t подземного трубопровода принимается наибольшее значение, найденное по формулам (25), (27) и (28) и удовлетворяющее условию (29).

3. Пример расчета трубопровода в траншее

Требуется: выбрать марку, группу и категорию стали и определить толщину стенки стального водовода диаметром 900 мм ($d_e=0,92$ м) для следующих условий строительства и эксплуатации:

- расчетное внутреннее давление $p=2,5$ МПа,
- глубина заложения (до верха трубы) $h=3$ м,
- по степени ответственности водовод относится к 1 классу,
- прокладка в траншее с откосами 1:1,5 с шириной по дну 1,4м на плоском грунтовом основании с нормальной степенью уплотнения грунтов засыпки,
- грунты: гравелистые пески средней крупности (Гэ- I) с нормативным удельным весом $\gamma_n=16,7$ кН/м³ и модулем деформации $E=7$ МПа,
- расчетная транспортная нагрузка НГ-60,
- расчетная температура наружного воздуха в районе строительства $t_e=-18^\circ\text{C}$,
- на водоводе установлена противовакуумная аппаратура.

1. Определение внешних нагрузок

Расчетная приведенная внешняя нагрузка от давления грунта в траншее определяется меньшим значением из двух формул:

$$F = \gamma_f \gamma_n h b \alpha_1 \psi \eta \beta,$$

$$F = \gamma_f \gamma_n h d_e \alpha_2 \eta \beta.$$

Выбор формул производится сравнением значений

$$b \alpha_1 \psi \text{ и } d_e \alpha_2,$$

где $b=1,4+2 \cdot 1,5 \cdot 0,92=4,16$ м,

$$\alpha_1=0,934 \text{ (по табл.8.3 для } h/b_m=3/8,31=0,36),$$

$$\psi = \frac{1}{1 + 2 \frac{B}{B_t} \cdot \frac{b - d_e}{k d_e}},$$

$$B=0,125E=0,125 \cdot 7=0,875 \text{ МПа – параметр жесткости грунта,}$$

$k=1$, - часть вертикального наружного диаметра d_e выше плоскости основания.

$$B_t = \frac{2E_a}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{d_e} \right)^3 = \frac{2 \cdot 21 \cdot 10^4}{1-0,3^2} \cdot \frac{t^3}{0,92^3} = 593 \cdot 10^3 \cdot t^3, \quad \text{коэффициент}$$

жёсткости трубопровода.

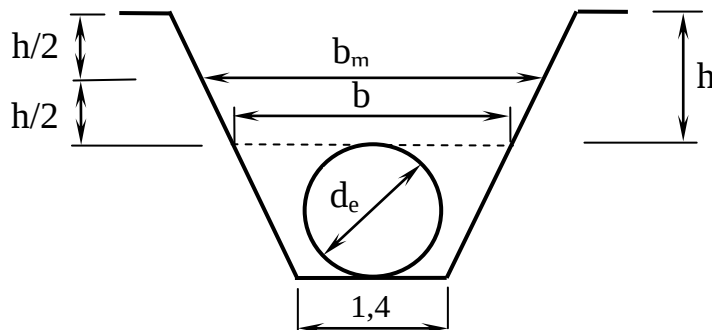


Рис. 5

Подсчитаем значения B_t и ψ для различных t :

$t=10$ мм (0,01м): $B_t=0,593$ МПа, $\psi=0,088$;

$t=9$ мм : $B_t=0,432$ МПа,

$t=8$ мм : $B_t=0,303$ МПа, $\psi=0,047$;

$t=7$ мм : $B_t=0,203$ МПа,

$t=6$ мм : $B_t=0,128$ МПа, $\psi=0,02$.

Так как все значения ψ меньше, чем $\frac{d_e}{b} = \frac{0,92}{4,16} = 0,221$, то принимаем

$\psi=0,221$. А так как $B_t < B$, то $\alpha_2=1$.

Вычисляем:

$$b\alpha_1\psi = 4,16 \cdot 0,934 \cdot 0,221 = 0,86;$$

$$d_e\alpha_2 = 1 \cdot 0,92 = 0,92.$$

Поскольку $b\alpha_1\psi < d_e\alpha_2$, то нагрузку определяем по первой формуле, принимая $\gamma_f=1,15$, $\gamma_n=16,7$ МПа, $\eta=0,95$ (табл.5 для Гэ-I), $\beta=0,75$ (табл.8 для плоского основания):

$$F = 1,15 \cdot 16,7 \cdot 3 \cdot 4,16 \cdot 0,934 \cdot 0,221 \cdot 0,95 \cdot 0,75 = 35,25 \text{ кН/м}.$$

Расчетную приведенную нагрузку от временной гусеничной нагрузки НГ-60 определяем по формуле:

$$F = \gamma_f \nu_n d_e \mu_e \alpha_2 \eta \beta,$$

где $\gamma_f=1$,

$$v_n = 14,5 \text{ кН/м (по табл. 8.6 для } h=3\text{м)},$$

$$\mu = 1.$$

Тогда $F = 1 \cdot 14,5 \cdot 0,92 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 0,75 = 9,5 \text{ кН/м}.$

Нагрузка от веса транспортируемой жидкости:

$$F = 0,785 \gamma_{\text{ж}} d_i^2 \eta \beta,$$

где $\beta = 0,6.$

$$\text{Тогда } F = 0,785 \cdot 9,8 \cdot 0,9^2 \cdot 0,95 \cdot 0,6 = 3,5 \text{ кН/м}.$$

Нагрузку от собственного веса стальных труб можно не учитывать по ее малому вкладу.

Итак, суммарная приведенная внешняя нагрузка (с учетом коэффициента сочетания) будет:

$$F_{\text{ред}} = \sum F = 35,25 + 9,50 \cdot 0,9 + 3,55 \cdot 0,95 = 47,15 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

2. Определение марки, группы и категории стали

В соответствии с рекомендациями [1], при расчетной температуре до -20°C и при толщине стенки не более 10мм следует применять трубы из полуспокойной стали ВСт2пс2, ВСт3пс2) и из низколегированной стали. Для трубопроводов 1 класса по степени ответственности рекомендуются стали группы В, из которой изготавливаются трубы как по ГОСТ 8696-74, так и по ГОСТ 10706-76. Категория сталей 2 или 3 для труб по ГОСТ 8696-74 и категория 1÷4 для труб по ГОСТ 10706-76.

Дальнейшие расчеты выполним одновременно и для стали ВСт3пс2, и для стали 17ГС с целью сравнения результатов.

3. Определение расчетных сопротивлений сталей

Нормативное сопротивление для стали ВСт4пс22: $R_{\text{yn}} = 245 \text{ МПа},$
для низколегированной стали 17ГС: $R_{\text{yn}} = 343 \text{ МПа}$ [1].

Расчетное сопротивление $R_y = \frac{R_{\text{yn}}}{1,1}$, тогда:

- для стали ВСт3пс2 $R_y = 223 \text{ МПа},$

- для стали 17ГС $R_y = 312 \text{ МПа}.$

4. Определение толщины стенки трубопровода

Из расчета на прочность

$$t_1 = \sqrt{\frac{F_{\text{red}} \cdot d_e \cdot \xi}{0,00105 R_y m}}.$$

Так как $F_{\text{red}}=47,15$ кН/м, $d_e=0,92$ м, $m=0,9$ (для 1 класса по степени ответственности), то

$$t_1 = \sqrt{\frac{47,15 \cdot 0,92 \cdot \xi}{0,00105 R_y 0,9}} = 214,1 \sqrt{\frac{\xi}{R_y}}.$$

Искомая толщина стенки входит и в левую часть равенства, и в правую (от t_1 зависит коэффициент ξ). Поэтому уравнение решается подбором. Задаваясь различными значениями t_1 , вычисляем

$$\xi = \frac{0,1B + B_t}{1,1B + B_t}, \text{ где } B=0,125E, \text{ а } B_t = \frac{2E_a}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{d_m}\right)^3,$$

подставляем в правую часть уравнения, пока оно не удовлетворится.

Так, для $t=10$ мм: $\xi=(0,1 \cdot 0,875+0,593)/(1,1 \cdot 0,875+0,593)=0,437$;

$t=9$ мм: $\xi=0,372$;

$t=8$ мм: $\xi=0,308$;

$t=7$ мм: $\xi=0,249$;

$t=6$ мм: $\xi=0,198$.

Для варианта ВСт 3пс2:

$$t_1 = 214,1 \sqrt{\frac{\xi}{223}} = 14,34 \sqrt{\xi}.$$

При $t_1 = 10$ мм: $14,34 \sqrt{\xi} = 9,46 < 10$,

$t_1 = 9$ мм: $14,34 \sqrt{\xi} = 8,75 < 9$,

$t_1 = 8$ мм: $14,34 \sqrt{\xi} = 7,95 \approx 8$ мм

Удовлетворяет уравнению $t_1 = 8$ мм.

Для варианта стали 17ГС:

$$t_1 = 214,1 \sqrt{\frac{\xi}{312}} = 12,1 \sqrt{\xi}.$$

При $t_1 = 7$ мм: $12,1 \sqrt{\xi} = 6,03 < 7$,

$t_1 = 6$ мм: $12,1 \sqrt{\xi} = 5,38 < 6$.

Удовлетворяет уравнению $t_1 < 6$ мм.

Из расчета по деформации независимо от марки стали:

$$t_2 = 1,47 \sqrt[3]{10 \cdot F_{\text{red}} \cdot d_e^2 \cdot \xi},$$

или $t_2 = 1,47 \sqrt[3]{10 \cdot 47,15 \cdot 0,92^2 \cdot \xi} = 10,77 \sqrt[3]{\xi}.$

При $t_2 = 7$ мм $10,77 \sqrt[3]{\xi} = 6,77 < 7,$

$t_2 = 6$ мм $10,77 \sqrt[3]{\xi} = 6,28 > 6.$

Удовлетворяет уравнению $t_2 \geq 7$ мм.

Из расчета на внутреннее давление при отсутствии внешней нагрузки

$$t_3 = 500 \frac{p \cdot d_e}{m R_y + p},$$

где $p = 2,5$ МПа,

$m = 0,9.$

Для стали ВСт3пс2:

$$t_3 = 500 \frac{2,5 \cdot 0,92}{0,9 \cdot 223 + 2,5} = 5,6 \text{ мм}.$$

Для стали ПГС : $t_3 = 4$ мм.

Эти значения меньше предыдущих.

Выполним проверку трубы с минимальной толщиной стенки $t = 7$ мм на устойчивость:

$$\frac{F_{\text{red}}}{1000 d_e \beta} \leq 1,2 \sqrt{B \beta_t}.$$

$$\frac{47,15}{1000 \cdot 0,92 \cdot 0,75} = 0,069 < 1,2 \sqrt{0,203 \cdot 0,875} = 0,506.$$

Условие удовлетворяется.

Таким образом, принимаем трубу $\varnothing 920$ и толщиной стенки $t_2 = 8$ мм из стали ВСт3пс2, либо $\varnothing 920$ и толщиной стенки $t_2 = 7$ мм из стали 17 ГС.

4. Пример расчета трубопровода, укладываемого в узкую прорезь

Рассмотрим тот же случай, но изменим лишь условия прокладки трубопровода: вместо траншеи с откосами – узкая прорезь (рис.1) шириной $b=b_m=2\text{м}$.

Для выбора расчетной формулы нагрузки сравним величины:

$b\alpha_1\psi$ и $d_e\alpha_2$.

При $b=2\text{м}$, $\alpha_1=0,787$ для $h/b_m=3/2=1,5$ и Гэ – I, $\psi_{t=10}=0,224$.

Так как $\psi=0,224 < d_e/b=0,92/2=0,46$, а значения ψ для $t < 10\text{мм}$ меньше, чем для $t=10\text{мм}$, то принимаем $\psi=0,46$, и тогда $b\alpha_1\psi=2\cdot 0,787\cdot 0,46=0,724$, а $d_e\alpha_2=1\cdot 0,92=0,92$, что $> b\alpha_1\psi$.

Поэтому принимается формула нагрузки в виде:

$$F=\gamma_f\gamma_n h(b\alpha_1\psi)\eta\beta=1,5\cdot 16,7\cdot 3\cdot (0,724)\cdot 0,95\cdot 0,75=29,72\text{кН/м}.$$

Нагрузки от НГ-60 и веса жидкости принимаем:

$$F=9,5\text{кН/м и } F=3,55\text{кН/м}.$$

Тогда суммарная приведенная внешняя нагрузка (с учетом коэффициента сочетания) будет:

$$F_{\text{ред}}=29,72+9,5\cdot 0,95+3,55\cdot 0,9=41,6\text{кН/м}$$

Ограничимся вариантом стали ВСт3пс2 с $R_y=223\text{МПа}$.

Из условия прочности:

$$t_1 = \sqrt{\frac{F_{\text{ред}} \cdot d_e \cdot \xi}{0,00105 R_y m}} = 13,5\sqrt{\xi}.$$

$$\text{При } t_1=8\text{мм: } 13,5\sqrt{\xi} = 7,46 < 8,$$

$$t_1=7\text{ мм: } 13,5\sqrt{\xi} = 6,74 < 7,$$

$$t_1=6\text{ мм: } 13,5\sqrt{\xi} = 5,96 \approx 6\text{мм}$$

Удовлетворяет уравнению $t_1=6\text{ мм}$.

Из расчета по деформации

$$t_2 = 1,47\sqrt[3]{10 \cdot F_{\text{ред}} \cdot d_e^2 \cdot \xi} = 10,61\sqrt[3]{\xi}.$$

$$\text{При } t_2=7\text{мм } 10,61\sqrt[3]{\xi} = 6,68 < 7,$$

$$t_2=6\text{мм } 10,61\sqrt[3]{\xi} = 6,18 > 6.$$

Удовлетворяет уравнению $t_2 \geq 7\text{ мм}$.

Расчет на внутреннее давление требует меньшей толщины стенки, а условие устойчивости удовлетворяется.

Значит, принимаем трубу $\varnothing 920$ толщиной стенки $t=7$ мм из стали ВСт3пс2.

Таким образом, укладка в узкую прорезь позволяет снизить толщину стенки на 1 мм, что дает экономию стали 22,4 тонны на 1 км трубопровода.

Варианты заданий

Общие для всех вариантов исходные данные:

- материал трубопровода: сталь полуспокойная ВСт3пс2;
- расчетное сопротивление стали $R_y=223\text{МПа}$;
- расчетная температура наружного воздуха в районе строительства $t_e=-20^\circ\text{C}$;
- на водоводе установлена противовакуумная аппаратура;
- класс участка трубопровода по степени ответственности: 1;
- модуль упругости материала трубопровода $E_a=2\cdot 10^5\text{МПа}$;
- коэффициент Пуассона материала трубопровода $\nu=0,25$;
- модуль деформации дорожной одежды $E_{\text{sup}}=100\text{МПа}$;
- толщина дорожной одежды $h_{\text{sup}}=0,4\text{м}$;
- нормативное значение удельного веса стали $\gamma_{\text{mn}}=78,5\text{ кН/м}^3$;
- транспортируемая жидкость: вода пресная;
- расчётное внутреннее давление $p=2,5\text{МПа}$.

Индивидуальные исходные данные для своего варианта задания принять по таблице 7.

Требуется: определить толщину стенки стального трубопровода заданного диаметра при вышеуказанных условиях строительства и эксплуатации.

Таблица 7

№ варианта	Условия укладки	Откосы траншеи	Ширина по дну траншеи, м	Способ опирания	Степень уплотнения грунта засыпки	Группа грунта	Временные нагрузки	ФЭБС-31		ФЭБС-32	
								h, м	d _е , м	h, м	d _е , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	а	1:1	1,2	1	норм.	Г ₃ -I	Н-30/НК-80	2	600	4	700
2	б	-	-	2(2α=75°)	повыш.	Г ₃ -IV	Н-18/НГ-60	2	620	4	700
3	а	1:1,25	1,5	2(2α=90°)	плотн.	Г ₃ -II	Н-30/НК-80	2,5	630	3,6	720
4	б	-	-	2(2α=120°)	норм.	Г ₃ -III	Н-30/НК-80	2,5	650	3,6	720
5	а	1:1,5	1,8	3	повыш.	Г ₃ -I	Н-18/НГ-60	3	680	3,2	750
6	б	-	-	1	норм.	Г ₃ -IV	Н-18/НГ-60	3	700	3,2	750
7	а	1:1	1,6	2(2α=75°)	норм.	Г ₃ -II	Н-30/НК-80	3,5	720	3	800
8	б	-	-	2(2α=90°)	повыш.	Г ₃ -III	Н-18/НГ-60	3,5	750	3	800
9	а	1:1,25	1,8	2(2α=120°)	плотн.	Г ₃ -I	Н-30/НК-80	4	780	2,8	820
10	б	-	-	3	норм.	Г ₃ -IV	Н-30/НК-80	4	800	2,8	820
11	а	1:1,5	2	1	повыш.	Г ₃ -II	Н-18/НГ-60	2	820	2,6	900
12	б	-	-	3	повыш.	Г ₃ -III	Н-18/НГ-60	2	850	2,6	900
13	а	1:1	2,2	1	норм.	Г ₃ -I	Н-30/НК-80	2,4	880	2,4	920
14	б	-	-	1	норм.	Г ₃ -IV	Н-18/НГ-60	2,4	900	2,4	920
15	а	1:1,25	2,4	3	плотн.	Г ₃ -II	Н-30/НК-80	3	920	2,2	980
16	б	-	-	3	повыш.	Г ₃ -III	Н-30/НК-80	3	940	2,2	980
17	а	1:1,5	2,6	2(2α=75°)	норм.	Г ₃ -I	Н-18/НГ-60	3,6	980	2	1020
18	б	-	-	2(2α=90°)	повыш.	Г ₃ -IV	Н-18/НГ-60	3,6	1000	2	1020
19	а	1:1	3	2(2α=120°)	повыш.	Г ₃ -II	Н-30/НК-80	4	1020	3	1200
20	б	-	-	1	норм.	Г ₃ -III	Н-18/НГ-60	4	1100	3	1200
21	а	1:1,25	3,2	3	плотн.	Г ₃ -I	Н-30/НК-80	2,6	1200	3,5	1300
22	б	-	-	1	повыш.	Г ₃ -IV	Н-30/НК-80	2,6	1220	3,5	1300
23	а	1:1,5	3,4	3	норм.	Г ₃ -II	Н-18/НГ-60	3,2	1300	2,6	1420
24	б	-	-	1	норм.	Г ₃ -III	Н-18/НГ-60	3,2	1350	2,6	1420
25	а	1:1	2,6	1	повыш.	Г ₃ -I	Н-30/НК-80	3,2	1420	3	1000

Принятые обозначение:

а- укладка в траншею;

б – укладка в узкую прорезь шириной $b_0=2d_e$;

h – глубина заложения до верха трубы;

d_е – наружный диаметр трубопровода

1 – плоское основание;

2 – профилированное основание;

3 – бетонный фундамент с $2\alpha=120^\circ$.

Приложение

h _{ред} , м	Нормативное равномерно распределённое давление v _н , кН/м ² , при d _е , м						
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	≥1,3
<u>Колёсная нагрузка НК-80</u>							
0,5	136	128,7	122,8	116,6	110,5	104,9	101
0,75	106,7	101,9	97,4	93,8	90	87,9	85,1
1	79,8	75,9	73,3	71,1	69,2	68,5	68,1
1,25	56,4	55,2	54,3	53,1	52	51,6	51,4
1,5	35,4	35,3	35,2	35,1	35	34,9	34,8
1,75	30,9	30,9	30,8	30,7	30,6	30,5	30,4
2	26,5	26,5	26,4	26,4	26,3	26,2	26,1
2,25	24						
2,5	22,5						
2,75	21						
3	19,6						
3,25	18,3						
3,5	17,1						
3,75	15,8						
4	14,7						
4,25	13,7						
4,5	12,7						
4,75	11,9						
5	11,1						
5,25	10,3						
5,5	9,61						
5,75	9						
6	8,43						
6,25	7,84						
6,5	7,35						
6,75	6,86						
7	6,37						
7,25	6,08						
7,5	5,59						
7,75	5,29						
8	5,1						

Продолжение табл.

h _{ред} , м	Нормативное равномерно распределённое давление v _п , кН/м ² , при d _е , м						
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	≥1,3
<u>Гусеничная нагрузка НГ-60</u>							
0,6	59,8	59,8	58,8	56,9	54,9	52	49
0,75	44,1	44,1	43,3	42,7	41,7	40,9	40,2
1	35,3	35,3	34,8	34,5	34,4	34,3	34,3
1,25	29,8						
1,5	25,4						
1,75	21,7						
2	18,7						
2,25	17,6						
2,5	16,5						
2,75	15,5						
3	14,5						
3,25	13,7						
3,5	12,9						
3,75	12,2						
4	11,4						
4,25	10,4						
4,5	9,81						
4,75	9,12						
5	8,43						
5,25	7,45						
5,5	7,16						
5,75	6,67						
6	6,18						
6,5	5,39						
7	4,71						
7,5	4,31						
<u>Автомобильная нагрузка Н-30</u>							
0,5	111,1	111,1	102,7	92,9	82,9	76,8	70,3
0,75	56,4	56,4	53,1	49,8	46,2	42,5	39,2
1	29,9	29,9	29,2	28,2	27,2	25,9	24,5
1,25	21,5	21,5	21,3	20,4	20	19,4	19,2

Продолжение табл.

h _{ред} , м	Нормативное равномерно распределённое давление v _н , кН/м ² , при d _с , м						
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	≥1,3
1,5	16,3	16,3	16,1	15,9	15,9	15,9	15,9
1,75	14,5	14,5	14,4	14,3	14,1	14	13,8
2	13	13	12,8	12,6	12,6	12,4	12,2
2,25	11,8	11,8	11,6	11,5	11,3	11,1	10,9
2,5	10,5	10,5	10,4	10,2	10,1	9,9	9,71
3	8,53	8,53	8,43	8,34	8,24	8,14	8,04
3,5	6,86						
4	5,59						
4,25	5,1						
4,5	4,71						
4,75	4,31						
5	4,02						
5,25	3,73						
5,5	3,43						
6	2,94						
6,5	2,55						
7	2,16						
7,5	1,96						
<u>Автомобильная нагрузка Н-18</u>							
0,5	111,1	111,1	102	92,9	83,2	75,9	69,1
0,75	51,9	51,9	48,2	45,6	42,9	40	38
1	28,1	28,1	27,2	25,6	24,5	23	21,6
1,25	18,3	18,3	17,8	17,3	16,8	16,3	15,8
1,5	13,4	13,4	13,3	13,1	12,9	12,8	12,7
1,75	10,5	10,5	10,4	10,3	10,2	10,1	10,1
2	8,43						
2,25	7,65						
2,5	6,86						
2,75	6,18						
3	5,49						
3,25	4,8						
3,5	4,22						
3,75	3,63						

Продолжение табл.

$h_{red}, \text{ м}$	Нормативное равномерно распределённое давление $v_n, \text{ кН/м}^2, \text{ при } d_e, \text{ м}$						
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	$\geq 1,3$
4	3,04						
4,25	2,65						
4,5	2,45						
4,75	2,26						
5	2,06						
5,25	1,86						
5,5	1,77						
5,75	1,67						
6	1,57						
6,25	1,47						
6,5	1,37						
6,75	1,27						
7	1,27						
7,25	1,18						
7,5	1,08						

Библиографический список

1. О.Л.Соколов. Прикладная механика конструкций систем водоснабжения и водоотведения. – Вологда: ВоГТУ, 2010. – 215 с.

Подписано в печать 06.11.2013.	Усл. печ. л. 1,75	Тираж	экз.
Печать офсетная.	Бумага писчая.	Заказ №	_____.

Отпечатано: РИО ВоГТУ, г. Вологда, ул. Ленина, 15