

**Министерство строительства  
и жилищно-коммунального хозяйства  
Российской Федерации**

**Федеральное автономное учреждение  
«Федеральный центр нормирования, стандартизации  
и технической оценки соответствия в строительстве»**

**МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ БЕТОННЫХ  
И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БЕЗНАПОРНЫХ ТРУБ**

**Москва 2020**

## Содержание

1 Область применения.....	1
2 Нормативные ссылки.....	1
3 Термины, определения и обозначения .....	2
4 Общие положения .....	4
5 Физико-механические характеристики материалов для труб.....	5
5.1 Бетоны.....	5
5.2 Арматура и стальные детали.....	5
5.3 Полимерные материалы и древесно-стружечные плиты .....	6
6 Конструктивные решения бетонных и железобетонных труб .....	7
6.1 Бетонные трубы.....	7
6.2 Железобетонные трубы для открытой укладки.....	7
6.3 Железобетонные трубы для микротоннелирования.....	7
7 Рекомендации по сбору и расчету нагрузок на трубы для открытой укладки .....	8
7.1 Общие положения и требования.....	8
7.2 Классификация и сочетания нагрузок.....	8
7.3 Нагрузка от собственного веса трубы.....	9
7.4 Нагрузки от вертикального и горизонтального давления грунта засыпки.....	10
7.5 Нагрузка от гидростатического давления грунтовых вод.....	15
7.6 Нагрузка от давления транспортируемой жидкости.....	15
7.7 Нагрузка от автомобильного транспорта.....	16
7.8 Эквивалентная линейная вертикальная нагрузка.....	17
8 Расчет изгибающих моментов в продольном сечении стенки трубы .....	18
9 Расчет бетонных и железобетонных труб для открытой укладки.....	19
9.1 Расчет бетонных и железобетонных труб по предельным состояниям первой группы.....	19
9.2 Расчет железобетонных труб по предельным состояниям второй группы.....	22
10 Расчет и подбор армирования железобетонных труб для открытой укладки .....	26
10.1 Трубы с одинарным спиральным каркасом.....	26
10.2 Трубы с двойным спиральным каркасом.....	27
10.3 Подбор разделительной арматуры для спиральных каркасов труб .....	28
11 Особенности расчета и подбора армирования железобетонных труб для микротоннелирования .....	29
11.1 Определение нагрузок от вертикального и горизонтального давления грунта.....	29
11.2 Определение продольных усилий в поперечных кольцевых сечениях стенки трубы.....	30
11.3 Армирование труб для микротоннелирования.....	33

12 Расчет контрольных нагрузок для труб .....	34
13 Особенности конструирования и армирования труб с плоской подошвой.....	35
14 Особенности расчета труб с внутренней полимерной облицовкой.....	36
Приложение А Основные буквенные обозначения.....	39
Приложение Б Конструктивно-технические решения, типы и геометрические параметры труб.....	42
Приложение В Схемы открытой укладки труб на различные типы оснований.....	50
Приложение Г Геометрические параметры и армирование труб с плоской подошвой.....	53
Приложение Д Конструкция и размеры полимерных листов для футеровки труб.....	57
Приложение Е Пример расчета бетонной трубы.....	59
Приложение Ж Примеры расчета железобетонных труб для открытой укладки.....	63
Приложение И Пример расчета железобетонной трубы для микротоннелирования.....	74
Приложение К Пример расчета бетонной трубы с внутренней полимерной облицовкой.....	78
Библиография.....	83

## Введение

Методическое пособие разработано в развитие положений СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», устанавливающего общие требования к расчету и конструированию железобетонных конструкций, и СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы» в части расчета и конструирования бетонных и железобетонных безнапорных труб, используемых в наружных подземных сетях водоотвода и канализации. Экспериментальные исследования и опыт эксплуатации трубопроводов показывают, что работа таких труб при силовых воздействиях, испытываемых ими в грунте, имеет свои особенности, требующие учета при проектировании.

Методическое пособие (далее – пособие) содержит конкретные инженерные методики определения нагрузок и расчета бетонных и железобетонных безнапорных труб по предельным состояниям первой и второй групп. В пособии приведены рекомендации по расчету и конструированию бетонных и железобетонных ненапряженных труб с круглым отверстием, учитывающие их конструктивные особенности и условия эксплуатации в безнапорных трубопроводах, монтируемых открытым (траншейным) методом и закрытым (бестраншейным) методом микротоннелирования.

Пособие предназначено для использования широким кругом специалистов, чья деятельность связана с изготовлением, нормированием и проектированием бетонных и железобетонных труб, трубопроводов, а также инженерно-техническими работниками проектных и научных организаций, заводов-изготовителей труб, государственных органов экспертизы и согласования, преподавателями и студентами строительных учебных заведений.

Пособие разработано ООО «Институт ВНИИжелезобетон» (кандидаты техн. наук *В.И. Мелихов, Н.Е. Мишуков*, инж. *А.А. Сафонов*), АО «НИЦ «Строительство» – НИИЖБ им. А.А. Гвоздева (кандидаты техн. наук *И.Г. Овчинникова, Б.С. Соколов*), «  
( . . . )».

## **1 Область применения**

1.1 Настоящее пособие распространяется на проектирование (расчет и конструирование) бетонных и железобетонных труб с круглым отверстием (далее трубы), предназначенных для строительства трубопроводов, транспортирующих самотеком бытовые и производственные жидкости, атмосферные, сточные и подземные воды, неагрессивные к бетону и стальной арматуре.

1.2 При проектировании бетонных и железобетонных труб, предназначенных для эксплуатации в условиях действия агрессивной среды, должны предусматриваться дополнительные требования и мероприятия в соответствии с СП 28.13330, СП 32.13330 и ГОСТ 31384.

1.3 Методическое пособие не распространяется на бетонные и железобетонные трубы, предназначенные для эксплуатации в районах вечной мерзлоты и на территориях с сейсмичностью более 7 баллов по СП 14.13330.

1.4 Методическое пособие не распространяется на железобетонные трубы (звенья), укладываемые в насыпях автомобильных и железных дорог согласно СП 35.13330 (кроме расчетов на вертикальные нагрузки от автомобильного транспорта).

## **2 Нормативные ссылки**

В настоящем методическом пособии использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 5781–82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия

ГОСТ 6482–2011 Трубы железобетонные безнапорные. Технические условия

ГОСТ 6727–80 Проволока из низкоуглеродистой стали холоднотянутая для армирования железобетонных конструкций. Технические условия

ГОСТ 7350–77 Сталь толстолистовая коррозионностойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия

ГОСТ 8829–2018 Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости

ГОСТ 16338–85 Полиэтилен низкого давления. Технические условия

ГОСТ 20054–2016 Трубы бетонные безнапорные. Технические условия

ГОСТ 26633–2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия

ГОСТ 26996–86 Полипропилен и сополимеры пропилена. Технические условия

ГОСТ 27751–2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

ГОСТ 31384–2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические условия

ГОСТ 32399–2013 Плиты древесно-стружечные влагостойкие. Технические условия

ГОСТ 32960–2014 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения

ГОСТ 34028–2016 Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия

ГОСТ Р 58323–2018 Трубы железобетонные для бестраншейной прокладки инженерных сетей. Технические условия

ГОСТ Р 57997–2017 Арматурные и закладные изделия, их сварные, вязанные и механические соединения для железобетонных конструкций. Общие технические условия

СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81\* Строительство в сейсмических районах»

СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85\* Нагрузки и воздействия» (с изменениями № 1, № 2, № 3)

СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83\* Основания зданий и сооружений» (с изменениями № 1, № 2, № 3)

СП 28.13330.2017 «СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии» (с изменениями № 1, № 2)

СП 32.13330.2018 «СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения» (с изменением № 1)

СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84\* Мосты и трубы» (с изменениями № 1, № 2, № 3)

СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменением № 1)

СП 102.13330.2012 «СНиП 2.06.09-84 Туннели гидротехнические»

**П р и м е ч а н и е** – При пользовании настоящим пособием целесообразно проверить действие ссылочных документов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте федерального органа исполнительной власти в сфере стандартизации в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего пособия в ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде стандартов.

### **3 Термины, определения и обозначения**

В настоящем пособии применены термины по СП 63.13330, СП 35.13330, а также следующие термины с соответствующими определениями:

**3.1 диаметр условного прохода трубы;  $d_i$ :** Геометрический параметр поперечного сечения трубы, равный внутреннему диаметру ее основной цилиндрической части.

**3.2 безнапорная труба:** Труба, предназначенная для применения в трубопроводах, по которым транспортируют жидкость самотеком неполным сечением (до 0,95 внутреннего диаметра трубы).

**3.3 геометрическая длина трубы;  $l_1$ :** Полная длина трубы, рассчитываемая при ее конструировании.

**3.4 лоток:** Нижняя часть трубы в рабочем положении, расположенная симметрично относительно вертикального диаметра.

**3.5 микротоннелирование:** Бестраншейный способ прокладки подземных трубопроводов, основанный на проталкивании (продавливании) за проходческим комплексом железобетонных труб с цилиндрической наружной поверхностью.

**3.6 наружный диаметр трубы;  $d_e$ :** Геометрический параметр поперечного сечения трубы, равный наружному диаметру ее основной цилиндрической части.

**3.7 раструбная труба:** Труба, имеющая на одном конце раструб, наружный диаметр которого больше наружного диаметра основной цилиндрической части трубы, а на другом конце – втулочную часть, входящую в раструб смежной трубы при монтаже трубопровода.

**3.8 стыковые поверхности:** Поверхности стыковых участков трубы, взаимно сопрягаемые при монтаже трубопровода.

**3.9 полезная длина трубы;  $l$ :** Длина трубы, фактически учитываемая при проектировании и монтаже трубопроводов.

**3.10 труба с плоской подошвой:** Труба, имеющая в рабочем положении снизу плоскую опорную поверхность.

**3.11 угол охвата основания трубы;  $2\alpha^\circ$ :** Центральный угол с вершиной, расположенной на продольной оси трубопровода, и сторонами, проходящими через точки контакта наружной поверхности трубы с грунтовым основанием (спрофилированным) или бетонным фундаментом.

**3.12 уплотнительное кольцо:** Резиновый или из иных эластомеров кольцевой элемент, устанавливаемый между стыкующими поверхностями раструба и втулки трубы, обеспечивающий герметичность (водонепроницаемость) стыковых соединений в трубопроводе.

**3.13 шельга:** Верхняя часть трубы в рабочем положении, расположенная симметрично относительно вертикального диаметра.

**3.14 фальцевая труба:** Труба, имеющая на торцах взаимно сопрягаемые поверхности в пределах толщины стенки трубы.

**3.15 футеровочная облицовка:** Расположенный на внутренней поверхности трубы герметичный полимерный лист с анкерами для закрепления в бетоне, защищающий бетон и арматурный каркас трубы от агрессивного воздействия жидкой или газовой сред канализационного трубопровода (коллектора).

Основные буквенные обозначения приведены в приложении А.

#### **4 Общие положения**

4.1 Бетонные трубы должны соответствовать требованиям ГОСТ 20054.

Основные требования к конструированию бетонных труб приведены в подразделе 6.1.

4.2 Железобетонные трубы для открытой укладки должны соответствовать требованиям ГОСТ 6482.

Основные требования к конструированию железобетонных труб для открытой укладки приведены в подразделе 6.2.

4.3 Железобетонные трубы для микротоннелирования должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 58323.

Основные требования к конструированию железобетонных труб для микротоннелирования приведены в подразделе 6.3.

4.4 Расчет и конструирование бетонных труб для заданной глубины заложения сводится к подбору толщины  $t$  ее стенки в цилиндрической части и класса бетона на осевое растяжение  $B_t$  или при заданной толщине стенки  $t$  – к подбору класса бетона  $B_t$  с проверкой прочности трубы.

4.5 Расчет и конструирование железобетонной трубы при заданной глубине ее заложения и толщине ее цилиндрической части сводится, как правило, к подбору рабочей спиральной и продольной арматуры с проверкой величины раскрытия трещин в бетоне при контрольной нагрузке.

4.6 Согласно техническим условиям на бетонные (ГОСТ 20054) и на железобетонные (ГОСТ 6482) трубы расчетный срок эксплуатации труб составляет не менее 50 лет.

4.7 Расчеты бетонных и железобетонных труб в соответствии с ГОСТ 27751 и СП 63.13330 следует выполнять по предельным состояниям.

Расчет сечений железобетонных труб следует производить на основе нелинейной деформационной модели или на основе предельных усилий.

Общие принципы расчета на основе нелинейной деформационной модели приведены в СП 63.13330.

Рекомендации по расчету продольных сечений бетонных и железобетонных безнапорных труб по предельным состояниям первой группы и железобетонных труб по предельным состояниям второй группы на основе предельных усилий приведены в разделе 9.

Расчеты труб выполняются с использованием трехлинейной диаграммы деформирования бетона на действие эквивалентной нагрузки, приложенной по образующей, применяемой при испытании труб методом нагружения, приведенным в ГОСТ 20054 и ГОСТ 6482 с учетом требований ГОСТ 8829.

4.11 Расчетная методика, изложенная в настоящем пособии, позволяет проектировать бетонные и железобетонные трубы с учетом фактических геологических условий строительного объекта и заданных условий их укладки.

Допускается по согласованию с проектировщиком и Заказчиком строительства трубопровода открытой (траншейной) укладки железобетонных труб проводить их расчет по усредненным условиям, изложенным в пункте 4.2.3 ГОСТ 20054–2016 и пункте 4.2.8 ГОСТ 6482–2011.

## 5 Физико-механические характеристики материалов для труб

### 5.1 Бетоны

5.1.1 Используемые в расчетах труб бетоны должны соответствовать требованиям ГОСТ 26633 и иметь расчетную марку по средней плотности D2400.

5.1.2 Для изготовления труб следует применять тяжелый или мелкозернистый бетон классов по прочности на сжатие не ниже В30.

Расчетные значения сопротивления бетона в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие принимаются по СП. 63.13330.

5.1.3 Для бетонных труб рекомендуется применять бетоны классов по прочности на осевое растяжение в проектном возрасте не ниже  $V_t 3,2$ .

При технико-экономическом обосновании и положительных результатах испытаний на прочность и водонепроницаемость экспериментальных труб для бетонных труб  $d_i = 1000-1200$  мм могут применяться бетоны, в т.ч. дисперсно-армированные, классов по прочности на осевое растяжение  $V_t 3,6$  и  $V_t 4,0$ .

Расчетные сопротивления бетона для предельных состояний первой группы  $R_{bt}$  при различных классах по прочности на осевое растяжение указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные сопротивления бетона для бетонных труб

Класс бетона $V_t$ по прочности на осевое растяжение	$V_t 2,4$	$V_t 2,8$	$V_t 3,2$	$V_t 3,6$	$V_t 4,0$
Расчетные значения сопротивления бетона для предельных состояний первой группы, $R_{bt}$ , МПа	1,85	2,15	2,45	2,80	3,05

5.1.4 Для железобетонных труб, укладываемых в траншеи, применяются бетоны классов по прочности на сжатие не менее В30 и марок по водонепроницаемости W4–W8.

5.1.5 Для железобетонных труб для микротоннелирования применяются бетоны классов по прочности на сжатие не менее В40 и марок по водонепроницаемости не менее W8.

### 5.2 Арматура и стальные детали

5.2.1. Для армирования железобетонных труб используются ненапряженные одинарные или двойные цилиндрические спиральные каркасы, состоящие из стальных проволочных спиралей и продольных разделительных стержней, свариваемых друг с другом.

5.2.2 В качестве спиральной арматуры используется проволока периодического профиля диаметром 3–5 мм класса  $V_p-I$  по ГОСТ 6727, диаметром 6–10 мм класса А400 по ГОСТ 5781 или классов А500 и А600 по ГОСТ 34028. Допускается применение проволоки гладкого профиля класса В500 по ГОСТ 6727.

5.2.3 Для продольного армирования стальных каркасов рекомендуется использовать стержневую арматуру классов А400 и А500 по ГОСТ 34028.

Допускается применение стержней гладкого профиля диаметром 6–8 мм из сталей класса А240 по ГОСТ 34028 или ГОСТ 5781.

5.2.4 Для обеспечения жесткой связи между наружным и внутренним каркасами (при применении в трубах двойных спиральных каркасов) используются гнутые стержни гладкого профиля диаметром 6–8 мм из стали класса А240 по ГОСТ 5781, которые фиксируются вязальной проволокой или сваркой по ГОСТ Р 57997.

5.2.5 Нормативные и расчетные сопротивления проволочной и стержневой арматуры принимаются по СП 63.13330.

5.2.6 Применяемые в трубах для микротоннелирования стальные кольцевые элементы должны свариваться из листовой стали по ГОСТ 7350.

### 5.3 Полимерные материалы и древесно-стружечные плиты

5.3.1 Полимерные материалы чехлов для внутренней футеровки трубы изготавливаются из полиэтилена низкого давления (PE) по ГОСТ 16338 или полипропилена (PP) по ГОСТ 26996.

5.3.2 Физико-механические характеристики полимерных материалов для футеровочных чехлов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики полимерных материалов для футеровочных чехлов

Характеристики и их обозначения	Расчетные значения для чехлов из			
	полиэтилена ПНД по ГОСТ 16338			полипропилена по ГОСТ 26996
	ПЭ63	ПЭ80	ПЭ100	
Плотность $\rho_p$ , кг/м <sup>3</sup>	940	930	945	900
Предел текучести при растяжении $R_p$ , МПа	19,0	16,7	21,0	20,0
Модуль упругости $E_p$ (минимальный), МПа	645	637	650	1300

5.3.3 Футеровочные чехлы свариваются из листов толщиной не менее 3 мм.

5.3.4 Для надежного механического закрепления футеровочного чехла в бетоне лист должен быть с дискретными (точечными) анкерными элементами высотой 10–15 мм типа V-LOCK [1], расположенными в шахматном порядке в количестве 300–500 шт. по поверхности.

Допускается также применять полимерные футеровочные листы с продольными сплошными Т-образными анкерными элементами типа T-LOCK высотой 12–16 мм при расстоянии между ними 24–40 мм с толщиной стойки не менее 3 мм и шириной полки не менее 6 мм.

Конструкция и размеры полимерных футеровок из листов с анкерными элементами типов V-LOCK и T-LOCK [1], [2] приведены в приложении Д.

5.3.5 В трубах для микротоннелирования применяются компрессионные кольца из древесно-стружечной плиты (ДСП) типа Р5 или Р7 по ГОСТ 32399, которые должны быть толщиной 20–30 мм.

## **6 Конструктивные решения бетонных и железобетонных труб**

### **6.1 Бетонные трубы**

6.1.1 Конструктивно-технические решения бетонных труб и их геометрические параметры приведены в Б.1.

6.1.2 Согласно ГОСТ 20054 бетонные трубы с круглым отверстием, укладываемые в траншеи на глубину до 4 м, могут быть внутренним диаметром  $d_i$  в пределах 150–1200 мм и длину  $l = 1,0–2,0$  м.

Бетонные трубы с внутренним диаметром  $d_i$  в пределах 600–1200 мм рекомендуется конструировать с плоской подошвой. Все типы бетонных труб могут быть с внутренней футеровочной облицовкой.

6.1.3 Минимальную толщину стенки в цилиндрической части бетонной трубы при ее конструировании рекомендуется принимать в пределах  $(0,10–0,25) d_i$  при уменьшении  $d_i$  от 1200 мм до 150 мм.

### **6.2 Железобетонные трубы для открытой укладки**

6.2.1 Конструктивно-технические решения железобетонных труб для открытой укладки, их типы и геометрические параметры приведены в Б.2.

6.2.2 Согласно ГОСТ 6482 железобетонные трубы с круглым отверстием имеют диаметр условного прохода  $d_i = 300–3000$  мм и могут укладываться в траншеи на глубину до 10 м. Трубы диаметром  $d_i = 300–600$  мм конструируются без подошвы,  $d_i = 800–1600$  мм – с подошвой или без подошвы, а трубы  $d_i = 1800–2000$  мм рекомендуется конструировать с подошвой.

6.2.3 Полезная длина основных типов железобетонных труб, изготавливаемых прогрессивными методами радиального прессования и вибропрессования, находится в пределах 2,0–3,5 м. Для труб диаметром  $d_i = 300–1600$  мм, изготавливаемых методами центрифугирования и вертикального формования на виброплощадках, полезная длина может составлять  $l = 5$  м.

6.2.4 Минимальную толщину стенки в цилиндрической части трубы при ее конструировании рекомендуется принимать в пределах  $(0,15–0,06) d_i$  при увеличении  $d_i$  от 300 до 3000 мм.

6.2.5 Максимальный диаметр  $d_i$  труб с одинарным спиральным каркасом составляет 1400 мм, минимальный для труб с двойным спиральным каркасом – 1000 мм.

6.2.6 Минимальная толщина защитного слоя до рабочей спиральной арматуры должна составлять  $h_{зс, \min} = 20$  мм. При этом наружная поверхность железобетонных труб перед их укладкой должна быть защищена битумной обмазкой.

### **6.3 Железобетонные трубы для микротоннелирования**

6.3.1 Конструктивно-техническое решение железобетонных труб для микротоннелирования, их типы и геометрические параметры приведены в Б.3.

6.3.2 Трубы имеют диаметр условного прохода  $d_i = 400–2500$  мм и толщину стенки  $t = 100–300$  мм. При этом трубы с  $d_i = 400$  и 500 мм рекомендуется

проектировать с одинарным спиральным каркасом, а трубы диаметром  $d_i \geq 600$  мм должны быть с двойным спиральным каркасом.

6.3.3 Минимальная толщина защитного слоя бетона до спиральной арматуры должна быть  $h_{зс, \min} = 25$  мм для труб диаметром до  $d_i = 1000$  мм включительно и  $h_{зс, \min} = 30$  мм для труб  $d_i \geq 1200$  мм.

6.3.4 Трубы имеют следующие конструктивные особенности:

- один из типов труб – нагнетательный должен иметь форсунки для нагнетания бентонитового раствора во внешнее затрубное пространство;

- все типы труб снабжены компрессионными кольцами из ДСП, воспринимающими усиление проталкивания труб, и раструбной обечайкой различной длины в виде стального кольцевого элемента, замоноличенного на одном из торцов трубы заподлицо с ее наружной поверхностью. При этом другой конец имеет бетонную поверхность с кольцевым углублением, в котором размещается резиновое уплотнительное кольцо;

- все типы труб могут быть с внутренней футеровочной облицовкой.

## 7 Рекомендации по сбору и расчету нагрузок на трубы для открытой укладки

### 7.1 Общие положения и требования

7.1.1 Классификация нагрузок на трубы и методика их определения для трех основных способов их открытой укладки: в траншею, в насыпь и в прорезь на различные типы оснований, в т.ч. ниже уровня грунтовых вод, приведены в 7.2 – 7.8.

Схемы открытой укладки труб на различные типы оснований приведены в приложении В.

7.1.2 Грунты засыпки и грунты оснований трубопроводов условно разделены на четыре группы (Г-I – Г-IV), для каждой из которых приведены соответствующие деформационные характеристики (см. 7.4.2, таблица 4).

7.1.3 Рекомендации настоящего раздела позволяют определять величину предельной линейной нагрузки на единицу длины трубы.

### 7.2 Классификация и сочетания нагрузок

7.2.1 Нагрузки, действующие на трубы, подразделяются на: постоянные и временные. Временные нагрузки подразделяются на нагрузки длительного и кратковременного действия. Виды нагрузок и значения коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  приведены таблице 3.

Таблица 3 – Виды нагрузок

Вид нагрузки и ее обозначение	Коэффициент надежности $\gamma_f$
I Постоянные	
Собственный вес трубы $G_{св}$	1,1

Давление грунта засыпки: - вертикальное $p_{Г(v)}$ - горизонтальное $p_{Г(n)}$	1,2 1,2 (0,9)
<b>II Временные, длительного действия</b>	
Гидростатическое давление грунтовых вод, $p_w$	1,1 (0,9)
Вес транспортируемой жидкости $Q_{ж}$	1,1 (0,9)
<b>III Кратковременные</b>	
Давление, передающееся через грунт от подвижной нагрузки нерегулярного движения автомобильного транспорта максимального класса АК11 под нагрузку Н11: - вертикальное $p_{Т(v)}$ - горизонтальное $p_{Т(n)}$	1,3 1,2 (0,9)
Давление, передающееся через грунт от равномерно-распределенной нагрузки на поверхности $5 \text{ кН/м}^2$ (в местах, где движение транспорта невозможно): - вертикальное $p_{Г(v)}$	1,3
<p><b>Примечания</b></p> <p>1 Значения коэффициента надежности по нагрузке <math>\gamma_f</math>, указанные в скобках, принимают при расчете сечений, для которых нагрузка оказывает благоприятное (разгружающее) действие.</p> <p>2 Трубы не рассчитывают на временные нагрузки длительного действия от регулярного движения автотранспорта, т.к. согласно пункту 6.7.1 СП 32.13330.2018 пересечения самотечными (безнапорными) канализационными подземными трубопроводами из любых материалов (кроме чугунных труб) автомобильных дорог любых категорий должны устраиваться в футлярах.</p>	

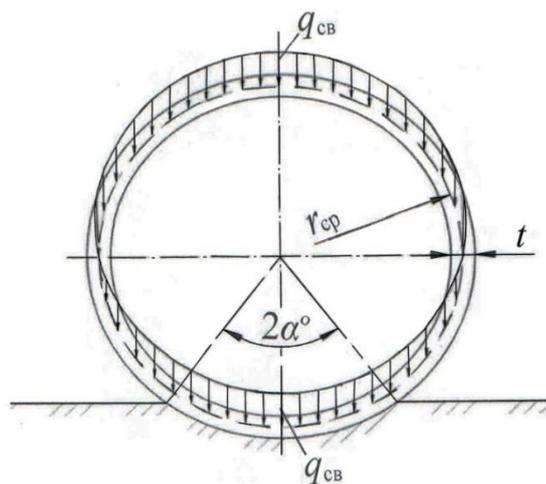
7.2.2 Расчет труб следует выполнять с учетом неблагоприятных сочетаний нагрузок. При этом должно учитываться местоположение трубопровода, инженерно-геологические условия укладки и условия эксплуатации трубопровода.

Коэффициенты сочетаний нагрузок принимают в соответствии с указаниями СП 20.13330.

7.2.3 Расчетные нагрузки определяются на основе нормативных, которые умножаются на коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$ .

### **7.3 Нагрузка от собственного веса трубы**

7.3.1 Схема воздействия вертикальной нагрузки собственного веса материала стенки трубы  $q_{св}$  представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Схема действия нагрузки веса материала стенки трубы**

7.3.2 Нормативную и расчетную (с коэффициентом надежности  $\gamma_{св} = 1,1$ ) нагрузки от собственного веса 1 пог.м трубы без подошвы, кН/м, определяют по формулам:

$$Q_{св}^n = 0,25\pi\rho_b (d_e^2 - d_i^2); \quad (1)$$

$$Q_{св} = 1,1Q_{св}^n = 0,864\rho_b (d_e^2 - d_i^2). \quad (2)$$

Для бетонных труб принимается удельный вес  $\rho_b = 2,4 \text{ т/м}^3 = 23,54 \text{ кН/м}^3$ , для железобетонных –  $\rho_b = 2,5 \text{ т/м}^3 = 24,53 \text{ кН/м}^3$ .

7.3.3 Расчетная нагрузка от собственного веса труб с подошвой вычисляется по формуле

$$Q_{св1} = \gamma_{св} S_T \rho_b, \quad (3)$$

где  $S_T$  – площадь поперечного сечения трубы с подошвой, определяемая по опалубочным чертежам или приложению Г.

#### **7.4 Нагрузки от вертикального и горизонтального давления грунта засыпки**

7.4.1 Величина давления грунта на трубы зависит от способа (схемы) их укладки. При строительстве трубопроводов открытым способом применяют следующие методы (схемы) укладки труб: в траншею или в насыпь на грунтовое непрофилированное или профилированное, или железобетонное основание, а также в прорезь на песчаную подушку (см. приложение В).

7.4.2 Грунты засыпки трубопроводов подразделяют на 4 условные группы, характеристики которых приведены в таблице 4.

7.4.3 При засыпке трубопроводов должно производиться послойное уплотнение грунта в пазухах траншеи с обеспечением коэффициента уплотнения  $K_{упл}$  не менее:

- 0,85 – при нормальной степени уплотнения;
- 0,93 – при повышенной степени уплотнения;
- 0,97 – при уплотнении песчаных грунтов намывом.

Для обеспечения расчетной работы трубы уплотнение грунта должно производиться не менее, чем на 30 см выше верха трубы.

Таблица 4 – Условные группы и характеристики грунтов засыпки труб

Условная группа грунта засыпки	Наименование грунта	Плотность $\rho_{гр}$ , кН/м <sup>3</sup>	Модуль деформации при уплотнении пазух $E_{гр}$ , МПа		
			нормальном	повышенном	намывом
Г-I	Пески, кроме пылеватых	16,7	7,0	14,0	21,5
Г-II	Пески пылеватые	17,2	3,9	7,4	9,8
Г-III	Супеси и суглинки	17,7	2,2	4,4	–
Г-IV	Глины	18,6	1,2	2,4	–

7.4.4 Ширина дна (основания) траншеи  $B_1$  в грунтах природной влажности должна быть не менее  $d_e+0,6$  м.

7.4.5 Ширину дна траншеи с вертикальными стенками (в прорезях) назначают не менее:

- $d_e+0,6$  м – для труб с  $d_e$  до 500 мм;
- $d_e+1,0$  м – то же, от 500 до 1200 мм;
- $d_e+1,4$  м – то же, свыше 1200 мм.

7.4.6 Наибольшую крутизну откосов траншеи, устраиваемых без креплений в однородных грунтах природной влажности, принимают по таблице 5.

Таблица 5 – Параметры траншей без креплений

Виды грунта	Глубина траншеи, м					
	до 1,5		от 1,5 до 3		более 3	
	Угол между направлением откоса и горизонталью	Отношение высоты откоса к его заложению $m_{от}$	Угол между направлением откоса и горизонталью	Отношение высоты откоса к его заложению $m_{от}$	Угол между направлением откоса и горизонталью	Отношение высоты откоса к его заложению $m_{от}$
1 Насыпные	56°	1:0,67	45°	1:1	38°	1:1,25
2 Песчаные влажные (ненасыщенные)	63°	1:0,5	45°	1:1	45°	1:1
3 Глинистые:						
а) супесь	76°	1:0,25	56°	1:0,67	50°	1:0,85
б) суглинок	90°	1:0	63°	1:0,50	53°	1:0,75
в) глина	90°	1:0	76°	1:0,25	63°	1:0,50
г) лес сухой	90°	1:0	63°	1:0,50	63°	1:0,50

4 Моренные: а) песчаные и супесчаные	76°	1:0,25	60°	1:0,57	53°	1:0,75
б) суглинистые	78°	1:0,2	63°	1:0,50	57°	1:0,65

Ширину траншеи на уровне верха трубы вычисляем по формуле

$$B = B_1 + 2 \frac{d_e \chi}{m_{от}}, \quad (4)$$

где  $\chi$  – коэффициент выступа трубы над профилированным, под углом  $2\alpha^\circ$  (см. рисунок 1), основанием траншеи (при  $2\alpha^\circ = 90^\circ \chi = 0,854$  и при  $2\alpha^\circ = 120^\circ \chi = 0,75$ );

$m_{от}$  – отношение высоты естественного откоса к его заложению (см. таблицу б).

Для труб с подошвой вместо произведения  $d_e \chi$  используется  $H_T$  – высота трубы.

Таблица 6 – Значения коэффициента  $k_{тр}$

$\frac{H}{B_{ср}}$	Коэффициент $k_{тр}$ при категории грунтов засыпки		
	Г-I	Г-II, Г-III	Г-IV
0	1,000	1,000	1,000
0,1	0,981	0,984	0,986
0,2	0,962	0,968	0,974
0,3	0,944	0,952	0,961
0,4	0,928	0,937	0,948
0,5	0,910	0,923	0,936
0,6	0,896	0,910	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	0,839	0,862	0,882
1,1	0,826	0,849	0,873
1,2	0,816	0,840	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	0,790	0,815
1,8	0,750	0,775	0,800
1,9	0,755	0,765	0,790
2	0,725	0,750	0,780
3	0,630	0,660	0,690
4	0,555	0,585	0,620
5	0,490	0,520	0,560
6	0,435	0,470	0,505
7	0,390	0,425	0,460
8	0,350	0,385	0,425
9	0,315	0,350	0,390
10	0,290	0,320	0,360

7.4.7 Расчетное значение нагрузки от вертикального давления грунта на 1 пог.м трубы определяется по формулам:

- при укладке труб в траншее:

$$Q_{r(v)} = \gamma_r \rho_{гр} H B k_{тр} \psi; \quad (5)$$

- при укладке труб в насыпи:

$$Q_{r(v)} = \gamma_r \rho_{гр} H d_e k_n; \quad (6)$$

- при укладке труб в прорези:

$$Q_{r(v)} = \gamma_r \rho_{гр} H d_e k_{пр}, \quad (7)$$

где  $H$ ,  $d_e$ ,  $B$  – геометрические размеры по рисункам В.1–В.6;

$$\psi = \frac{1}{1 + 2 \frac{P_{гр} \cdot (B - d_e)}{P_b \cdot \chi d_e}}; \quad (8)$$

$P_{гр}$  и  $P_b$  – параметры жесткости грунта засыпки и бетонного (железобетонного) сечения трубы:

$$P_{гр} = 1,25 E_{гр}; \quad (9)$$

$$P_b = \left( \frac{2 E_b}{1 - \nu^2} \right) \cdot (\delta / d_e)^3. \quad (10)$$

Если  $\psi \leq d_e / B$ , то принимают  $\psi = d_e / B$ .

7.4.8 Значения коэффициентов  $k_{тр}$  принимаются по таблице 6, а значения  $k_n$  (при  $H/d_e \geq 2,5$ ) и  $k_{пр}$  принимают по таблицам 7 и 8.

При  $0,5 < H/d_e < 2,5$  вместо  $k_n$  используют  $k'_n$ , определяемый по формуле

$$k'_n = 1,04 [k_n - 0,04 - (k_n - 1) \left( \frac{d_e}{2H} \right)^2]. \quad (11)$$

При  $H/d_e \leq 0,5$  принимают  $k_n = 1$ .

Таблица 7 – Значения коэффициентов  $k_n$  при  $H/d_e \geq 2,5$

Условная группа грунтов основания	Коэффициент $k_n$ для основания		
	плоского	грунтового	
		бетонного	
		спрофилированного по форме трубы с углом охвата	
		90°	120°
Г <sub>о</sub> -I	1,10	1,20	1,30
Г <sub>о</sub> -II	1,25	1,30	1,40
Г <sub>о</sub> -III	1,40	1,45	1,50
Г <sub>о</sub> -IV	1,60	1,60	1,60

Таблица 8 – Значения коэффициента  $k_{пр}$  при укладке труб в прорези

$h_{пр}/d_e$	0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
$k_{пр}$	1,0	0,83	0,71	0,63	0,57	0,52
Примечание – При промежуточных значениях $h_{пр}/d_e$ величину коэффициента $k_{пр}$ принимают по интерполяции.						

7.4.9 Если произведение  $(Bk_{тр}\psi)$  в формуле (5) окажется больше, чем  $(d_e k_n)$  в формуле (6), то для определения давления грунта на трубы, уложенные в траншее, вместо формулы (5) используется формула (6).

7.4.10 Расчетное значение нагрузки от горизонтального (бокового) давления грунта на трубы определяется по формулам:

- при укладке труб в траншее

$$Q_{г(н)} = \gamma_{г} \rho_{гр} H d_e k_{тр} \lambda_{тр}; \quad (12)$$

- при укладке труб в насыпи

$$Q_{г(н)} = \gamma_{г} \rho_{гр} (H + 0,5d_e) d_e \lambda_n. \quad (13)$$

При укладке труб в прорезь боковое давление грунта не учитывается.

7.4.11 Значения коэффициентов  $\lambda_{тр}$ ,  $\lambda_n$  и  $\eta$  принимают по таблице 9 в зависимости от категории грунта засыпки и степени его уплотнения.

Таблица 9 – Значения коэффициентов  $\lambda_{тр}$ ,  $\lambda_n$  и  $\eta$

Группа грунта засыпки	Коэффициенты $\lambda_{тр}$ , $\lambda_n$ и $\eta$ при степени уплотнения засыпки:									
	нормальной (не контролируемой)				повышенной (контролируемой)				плотной, при намыве (контролируемой)	
	При укладке труб в									
	траншею		насыпь		траншею		насыпь		траншею	
	$\lambda_{тр}$	$\eta$	$\lambda_n$	$\eta$	$\lambda_{тр}$	$\eta$	$\lambda_n$	$\eta$	$\lambda_{тр}$	$\eta$
Г-I	0,15	0,93	0,33	0,84	0,40	0,82	0,50	0,78	0,50	0,78
Г-II, Г-III	0,10	0,95	0,25	0,88	0,30	0,85	0,40	0,82	–	–
Г-IV	0,05	0,97	0,15	0,93	0,20	0,88	0,30	0,88	–	–
Примечание – Для грунтов групп Г-II, Г-III и Г-IV уплотнение намывом не допускается.										

7.4.12 Для всех типов грунтов, кроме глин, при заложении трубопровода ниже уровня грунтовых вод следует учитывать уменьшение плотности грунта засыпки. При этом давление на трубопровод грунтовых вод учитывается отдельно.

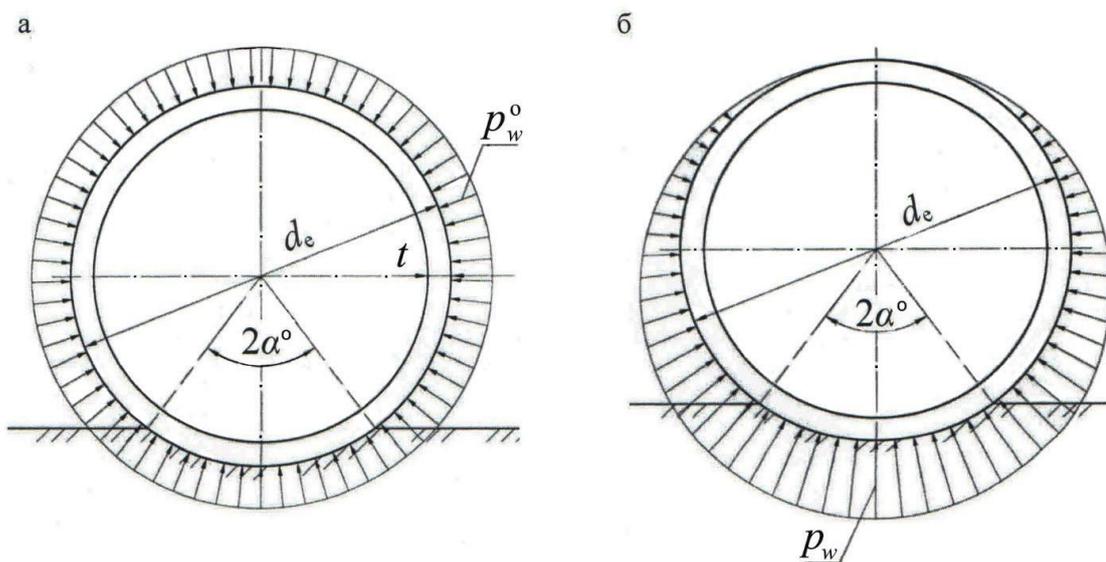
7.4.13 Нормативное значение плотности взвешенного в воде грунта засыпки,  $\text{кН/м}^3$ , определяют по формуле

$$\rho_{вз} \approx 17/(1 + e), \quad (14)$$

где  $e$  – коэффициент пористости грунта, определяемый по СП 22.13330.

## 7.5 Нагрузка от гидростатического давления грунтовых вод

7.5.1 Нормативное давление на трубы грунтовых вод учитывается в виде двух составляющих: равномерного давления  $p_w^o$ , равного напору воды над трубой (рисунок 2,а) и взвешивающего давления  $p_w$  (рисунок 2,б).



а – эпюра давления  $p_w^o$ ; б – эпюра давления  $p_w$

**Рисунок 2 – Схема воздействия грунтовых вод на трубу**

7.5.2 Давление  $p_w^o$  направлено радиально и вызывает равномерное сжатие продольных сечений стенки трубы, и его допускается не учитывать (рисунок 2,а).

7.5.3 Давление  $p_w$ , вызывающее всплытие трубы, также направлено радиально и является неравномерным. Его значение у лотка трубы (рисунок 2,б) определяется, в  $\text{кН/м}^2$ , по формуле

$$p_w = 9,8d_e. \quad (15)$$

7.5.4 Равнодействующая нагрузка  $Q_w$  давления грунтовых вод  $p_w$  направлена вертикально вверх.

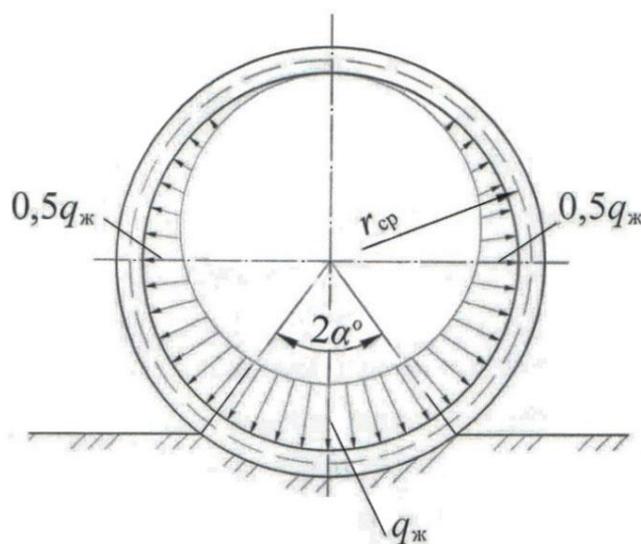
Нормативное значение  $Q_w^n$  на 1 пог.м трубы,  $\text{кН/м}$ , определяется по формуле

$$Q_w^n = 7,7d_e^2. \quad (16)$$

Расчетное значение нагрузки  $Q_w$  принимается с коэффициентом надежности  $\gamma_w = 1,1$  при расчете трубы на прочность и  $\gamma_w = 0,9$  при расчете на всплытие.

## 7.6 Нагрузка от давления транспортируемой жидкости

7.6.1 Нормативное давление на трубы от веса транспортируемой жидкости представлено в виде неравномерного давления  $q_{ж}$  (аналог давления  $p_w$  по 7.5.3) на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Схема давления на трубу транспортируемой жидкости**

7.6.2 Давление  $q_{ж}$  приложено к внутренней поверхности трубы и изменяется линейно в зависимости от уровня наполнения трубопровода.

7.6.3 Вертикальная нормативная и расчетная нагрузки на 1 пог.м трубы от сточных – атмосферных сточных и бытовых (канализационных) вод при их максимальном объемном весе  $\rho_{ж} = 1,06 \text{ т/м}^3$  (для канализационных стоков) и коэффициенте надежности по нагрузке  $\gamma_{ж} = 1,1$  определяются по формулам:

$$Q_{ж}^n = \frac{\pi}{4} \rho_{ж} d_i^2 = 0,832 d_i^2, \text{ т/м}^2, \quad (17)$$

$$Q_{ж}^n = 8,163 d_i^2, \text{ кПа}, \quad (18)$$

$$Q_{ж} = 1,1 Q_{ж}^n = 8,98 d_i^2, \text{ кПа}. \quad (19)$$

## 7.7 Нагрузка от автомобильного транспорта

7.7.1 Нормативные значения удельного вертикального и горизонтального давления на трубы, передающиеся через грунт засыпки, от временных подвижных нагрузок на поверхности земли определяются по формулам:

$$q_{т(в)} = \mu p_{т(в)} k_n; \quad (20)$$

$$q_{т(н)} = \mu p_{т(н)} \lambda_n, \quad (21)$$

где  $p_{т(в)}$  и  $p_{т(н)}$  – нормативное равномерно распределенное соответственно вертикальное и горизонтальное давление, передающееся через грунт от транспортных средств;

$k_n$  и  $\lambda_n$  – коэффициенты, принимаемые по таблицам 7 и 9 в зависимости от вида грунта основания трубопровода и степени уплотнения грунта засыпки;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий динамическое действие нагрузки, определяемый по таблице 10.

Таблица 10 – Значения коэффициента динамичности

Высота засыпки $H$ , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0 и более
Коэффициент динамичности $\mu$	1,17	1,14	1,10	1,07	1,04	1,0
Примечание – При промежуточных значениях высоты засыпки $H$ величину коэффициента $\mu$ принимают по интерполяции.						

7.7.2 Максимальная допускаемая в расчетах труб нагрузка от автомобильного транспорта – класса АК11 (Н11) по ГОСТ 32960. Расчет на кратковременные нагрузки от автомобильного транспорта класса АК11 (Н11) выполняется с коэффициентом надежности по нагрузке (таблица 3) от вертикального давления  $\gamma_f = 1,3$  и от горизонтального давления  $\gamma_f = 1,2$  (0,9).

7.7.3 Удельное нормативное давление от транспортных колесных средств класса АК11 (Н11), кПа, рассчитывается согласно СП 35.13330 по формуле

$$p_{T(v)} = \frac{186}{3 + H}, \quad (22)$$

где  $H$  – глубина засыпки грунта над верхом трубы.

7.7.4 Равнодействующие расчетной вертикальной и горизонтальной нагрузок, передающихся через грунт от воздействия транспортных средств, определяются по формулам:

$$Q_{T(v)} = \gamma_T \mu p_{T(v)} d_e k_n; \quad (23)$$

$$Q_{T(n)} = \gamma_T \mu p_{T(n)} d_e \lambda_n. \quad (24)$$

7.7.5 Нормативное значение вертикального давления  $p_v$ , кН/м, от подвижных нагрузок при глубине заложения труб менее 1 м определяют по методике СП 35.13330.

7.7.6 При укладке труб в прорезь горизонтальное давление  $p_n$  от воздействия транспортных средств не учитывают.

7.7.7 Для конкретных условий расположения (на местности) проектируемого трубопровода величину временной нагрузки от подвижных транспортных средств допускается уменьшать, при соответствующем обосновании, по согласованию с проектировщиком и заказчиком строительства трубопровода.

7.7.8 Для трубопроводов, прокладываемых в местах, где движение транспорта невозможно, в качестве временной нагрузки на поверхности земли принимают равномерно-распределенную нагрузку интенсивностью 5 кН/м<sup>2</sup>.

## 7.8 Эквивалентная линейная вертикальная нагрузка

7.8.1 Для упрощения расчетов и сопоставления расчетных нагрузок с фактической несущей способностью труб, полученной при их испытании нагружением согласно ГОСТ 8829, каждая равнодействующая из вертикальных и горизонтальных нормативных (или расчетных) нагрузок  $Q_i$ , приводится к

эквивалентной линейной нагрузке, а их совместное действие к вертикальной эквивалентной линейной нормативной нагрузке  $P_{\text{ЭКВ}}^n$  или расчетной  $P_{\text{ЭКВ}}$ .

7.8.2 Значения расчетной вертикальной эквивалентной линейной нагрузки  $P_{\text{ЭКВ}}$  (без учета гидростатического давления грунтовых вод) рекомендуется определять по формуле

$$P_{\text{ЭКВ}} = \eta \left[ (Q_{\Gamma(v)} - Q_{\Gamma(v)})\beta + (Q_{\text{св}} + Q_{\text{ж}})\beta_1 \right], \quad (25)$$

где  $\beta$  и  $\beta_1$  – коэффициенты приведения, характеризующие условия равенства изгибающих моментов от  $Q_v$  и  $P_{\text{ЭКВ}}$ , зависящие от вида нагрузки и способа опирания труб, принимаемые по таблице 11;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий условия укладки труб, принимаемый по таблице 9.

Таблица 11 – Значения коэффициентов приведения  $\beta$  и  $\beta_1$

Способ опирания труб	Коэффициенты приведения при нагрузках	
	от грунта и автомобильного транспорта - $\beta$	от собственного веса трубы и транспортируемой жидкости - $\beta_1$
<b>1 Труба с цилиндрической наружной опорной поверхностью</b>		
1.1 На плоское грунтовое основание с подбивкой засыпки	0,75	0,6
1.2 На плотное спрофилированное грунтовое основание с углом охвата $2\alpha^\circ = 90^\circ$	0,50	0,32
1.3 На железобетонный фундамент с углом охвата $2\alpha^\circ = 120^\circ$	0,35	0,20
<b>2 Труба с плоской подошвой</b>		
2.1 На плоское выравненное без уплотнения грунтовое основание	0,45	0,3
2.2 На плоское жесткое утрамбованное (уплотненное) песчано-щебеночное или песчаное грунтовое основание	0,40	0,25

## 8 Расчет изгибающих моментов в продольном сечении стенки трубы

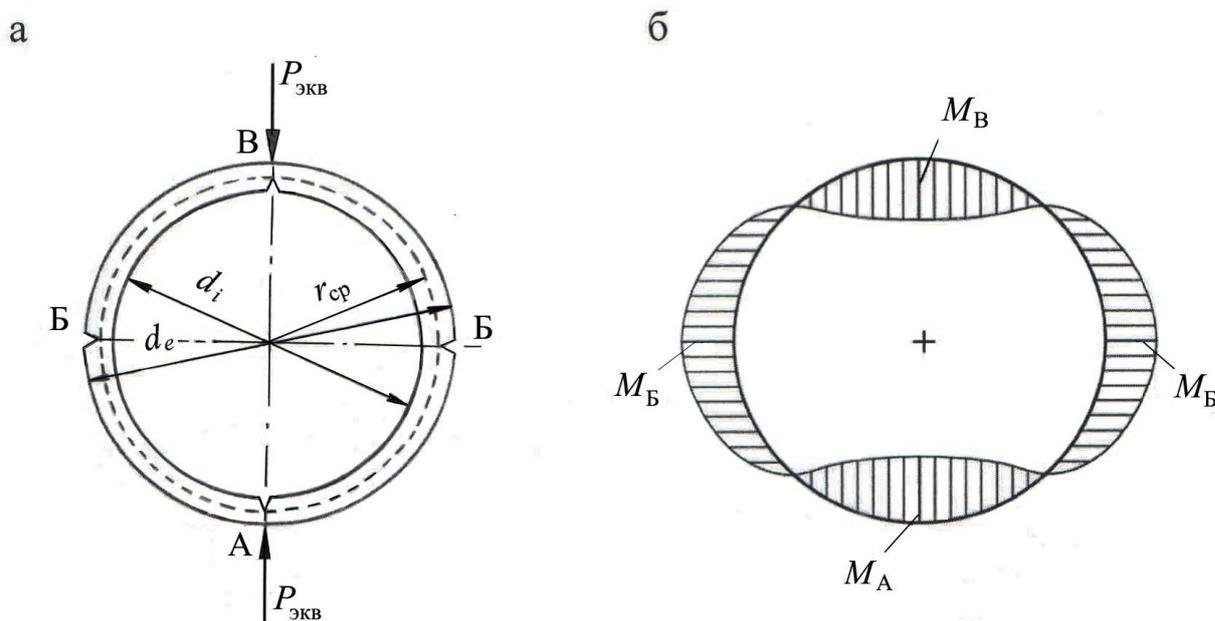
8.1 Внутренние усилия, возникающие в продольном сечении стенки трубы от действия вертикальных и горизонтальных нагрузок, определяют как для кольцевых изгибаемых элементов, находящихся в условиях плоской деформации.

8.2 Расчетная схема и эпюра изгибающих моментов трубы кольцевого сечения, уложенной на грунтовое основание, представлены на рисунке 4.

8.3 Для практических целей рекомендуется выполнять статический расчет труб с использованием эквивалентной вертикальной линейной нагрузки  $P_{\text{ЭКВ}}$ , действующей на трубу в точке В (шелыга) и в точке А (лоток) в

противоположном направлении в качестве реакции отпора (рисунок 4, а). При этом допускается не учитывать горизонтальные нагрузки, частично разгружающие трубу.

На схеме (рисунок 4, а) показано возможное образование трещин при воздействии линейной нагрузки.



а – схема действия нагрузки  $P_{\text{экв}}$ ; б – эпюра изгибающих моментов

**Рисунок 4 – Расчетная схема и эпюра изгибающих моментов в поперечном сечении стенки трубы**

8.4 Расчетные значения изгибающих моментов  $M_A, M_B, M_B$  (рисунок 4, б), возникающих в опасных продольных сечениях стенки трубы с цилиндрическими стенками, при статическом расчете определяются по формулам:

$$M_A = M_B = 0,318 P_{\text{экв}} r_{\text{ср}} b; \quad (26)$$

$$M_B = 0,182 P_{\text{экв}} r_{\text{ср}} b. \quad (27)$$

8.5 При расчете железобетонных труб по предельным состояниям первой группы (при проверке прочности), следует учитывать перераспределение изгибающего момента в стенке трубы на уровне вертикального и горизонтального диаметров

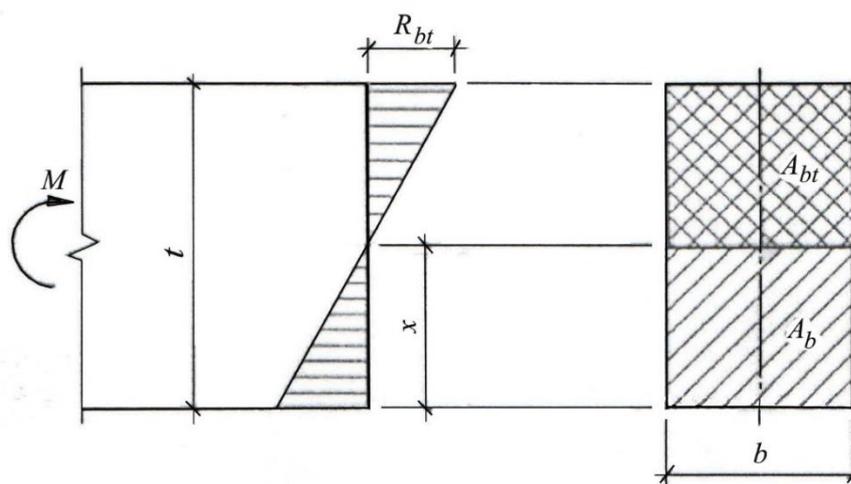
$$M'_A = M'_B = M'_B = 0,25 P_{\text{экв}} r_{\text{ср}} b. \quad (28)$$

8.6 Для труб, подвергающихся воздействию средне- и сильноагрессивной среды, расчетные изгибающие моменты вычисляются по формулам (26), (27), т.е. без учета их перераспределения.

## 9 Расчет бетонных и железобетонных труб для открытой укладки

### 9.1 Расчет бетонных и железобетонных труб по предельным состояниям первой группы

9.1.1 Схема усилий и эпюра напряжений в предельном состоянии стенки бетонной трубы представлены на рисунке 5.



**Рисунок 5 – Схема усилий и эпюра напряжений в продольном сечении стенки бетонной трубы**

9.1.2 Расчет на прочность продольных сечений стенки бетонной трубы производится как изгибаемого бетонного элемента из условия

$$M_{\max(A,B)} \leq M_{ult} = \gamma_{b1} R_{bt} W, \quad (29)$$

где  $M_{\max(A,B)}$  – максимальный изгибающий момент, возникающий в лотке или шельге трубы при наиболее неблагоприятном сочетании расчетных значений внешних нагрузок;

$\gamma_{b1} = 0,9$  – коэффициент условий работы для бетонных конструкций (согласно пункту 6.1.12 СП 63.13330.2018);

$R_{bt}$  – расчетное сопротивление бетона растяжению (таблица 1);

$W$  – момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна.

В расчете прочности продольных сечений стенки бетонной трубы допускается использовать упругопластический момент сопротивления сечения  $W = W_{pl}$ . Так как продольное сечение трубы является прямоугольным, то

$$W_{pl} = \frac{bt^2}{3,5}. \quad (30)$$

Пример расчета бетонной трубы приведен в приложении Е.

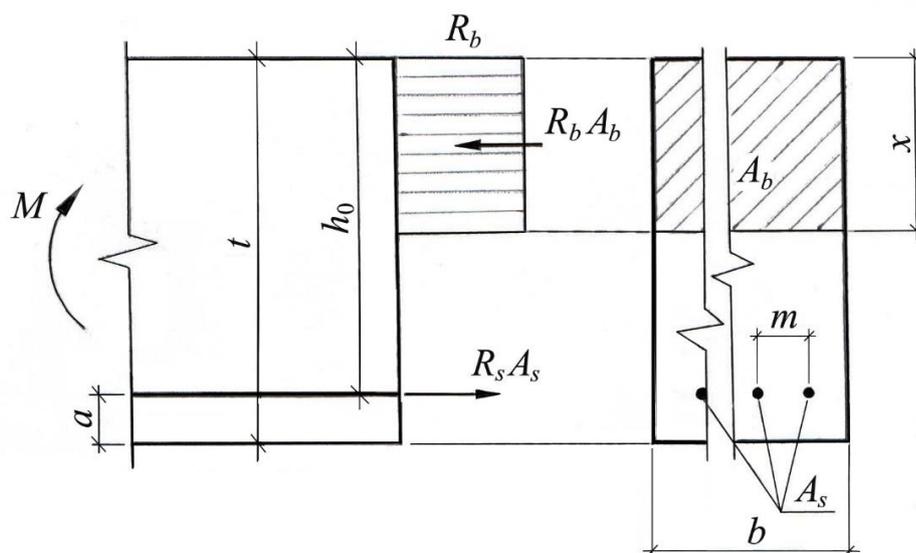
9.1.3 При расчете на прочность продольного сечения стенки железобетонной трубы как изгибаемого железобетонного элемента должно обеспечиваться условие:

$$M_{\max(A,B)} \leq M_{ult}, \quad (31)$$

где  $M_{ult}$  – предельный расчетный изгибающий момент, который может быть воспринят продольным сечением стенки трубы.

Расчет ведется с целью обеспечения прочности прямоугольного сечения стенки трубы высотой  $t$  и шириной  $b$  с одинарным или двойным каркасом с использованием трехлинейной диаграммы деформирования бетона.

9.1.4 Расчетное сечение стенки железобетонной трубы с одинарным спиральным арматурным каркасом приведено на рисунке б.



**Рисунок 6 – Схема для расчета железобетонных труб с одинарным спиральным каркасом**

Для железобетонной трубы с одинарным каркасом при расчете по предельным состояниям первой группы должно обеспечиваться условие

$$M_A \leq M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x), \quad (32)$$

где  $R_b$  – расчетное сопротивление тяжелого бетона (например, для бетона класса по прочности на сжатие В30  $R_b = 17$  МПа);

$x$  – высота сжатой зоны стенки труб, мм;

$h_0$  – расстояние между спиральной арматурой, работающей на растяжение, и наружной поверхностью стенки трубы, мм.

9.1.5 Расчетное сечение стенки железобетонной трубы с двойным спиральным арматурным каркасом приведено на рисунке 7.

Для железобетонной трубы с двойным каркасом при расчете по предельным состояниям первой группы должно обеспечиваться условие

$$M_A \leq M_{ult} = M_b + M_{sc} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{s1} (h_0 - a'), \quad (33)$$

где  $R_{sc}$  – нормативное сопротивление арматуры сжатию, принимаемое, например, для сталей классов В500  $R_{sc} = 415$  МПа;

$A_{s1}$  – площадь поперечного сечения сжатой арматуры, мм<sup>2</sup>/м.

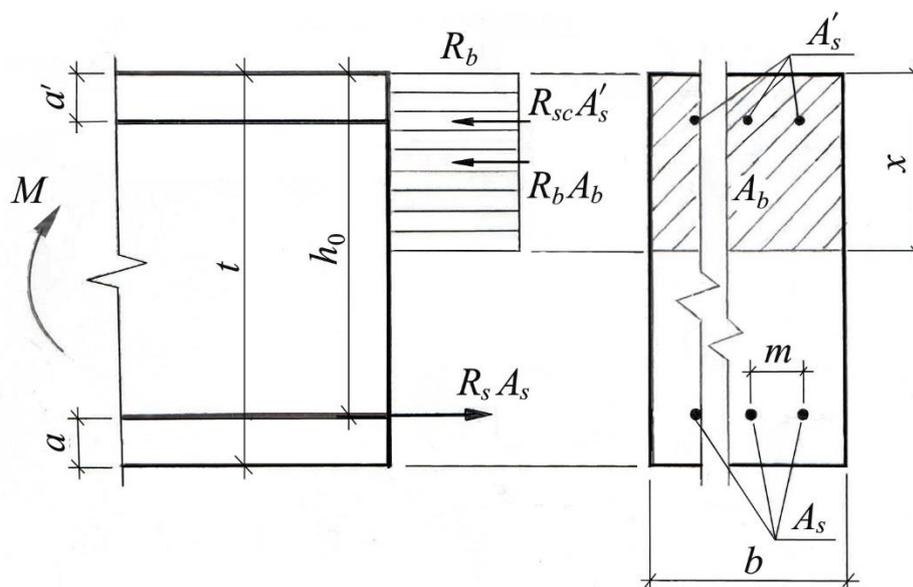


Рисунок 7 – Схема для расчета железобетонных труб с двойным спиральным арматурным каркасом

## 9.2 Расчет железобетонных труб по предельным состояниям второй группы

9.2.1 Расчет железобетонных труб по предельным состояниям второй группы сводится, в основном, к проверке трещинообразования и ширины раскрытия трещин.

### 9.2.2 Проверка трещинообразования

Расчеты на 1-м этапе сводятся к определению момента образования трещин на внутренней поверхности труб (лоток, шельга) с учетом неупругих деформаций растянутого бетона, который определяется по формуле

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl}, \quad (34)$$

и сравнению его с величиной расчетного изгибающего момента в вертикальном сечении трубы (лоток, шельга) без учета трещинообразования, величина которого определяется по формуле (26)

$$M_{A(max)} = 0,318 P_{экр} r_{cp}.$$

Если выполняется условие трещиностойкости

$$M_{A(max)} \leq M_{crc}, \quad (35)$$

то трещины не раскрываются и их величина не рассчитывается.

В случае  $M_{A(max)} > M_{crc}$  трещины образуются и их величина рассчитывается. При этом должно выполняться неравенство

$$M_{A(max)} > M_{crc} \geq M_A = 0,25 P_{экр}^* r_{cp}. \quad (36)$$

Если же условие (36) не выполняется, то необходимо усиливать армирование или повышать класс бетона.

В формуле (34) для расчета момента образования трещин:

$R_{bt,ser}$  – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению для предельных состояний второй группы (таблица 6.7 СП 63.13330.2018);

$W_{pl}$  – упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона, определяемый по формуле

$$W_{pl} = 1,3W_{red}, \quad (37)$$

где  $W_{red}$  – момент сопротивления приведенного сечения в растянутой зоне, который определяется по формуле

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t}, \quad (38)$$

где  $I_{red}$  – момент инерции приведенного сечения рассматриваемого участка стенки трубы относительно его центра тяжести;

$y_t$  – расстояние от наиболее растянутого (крайнего) волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента.

Для труб с одинарным каркасом

$$I_{red} = I_b + I_s \alpha. \quad (39)$$

Для труб с двойным каркасом при одинаковой площади поперечного сечения внутреннего и наружного каркасов ( $A_s = A_{s1}$ )

$$I_{red} = I_b + 2I_s \alpha, \quad (40)$$

где  $I_b$  и  $I_s$  – моменты инерции сечения бетона, растянутой и сжатой арматуры, рассчитываемые по формулам:

$$I_b = \frac{bt^3}{12}, \quad (41)$$

$$I_s = \frac{\pi d_s^4}{4}; \quad (42)$$

$\alpha$  – коэффициент приведения арматуры к бетону

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b}, \quad (43)$$

где  $E_s$  – модуль упругости стальной арматуры ( $E_s = 2 \cdot 10^5$  МПа);

$E_b$  – начальный модуль упругости бетона.

Значение  $y_t$  рассчитывают по формуле

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}}, \quad (44)$$

где  $S_{t,red}$  – статический момент площади приведенного продольного сечения элемента трубы относительно наиболее растянутого волокна бетона;

$A_{red}$  – площадь приведенного продольного сечения трубы.

Значения  $S_{t,red}$  определяют по формулам:

- для труб с одинарным каркасом:

$$S_{t,red} = S_b + S_s = 0,5bt^2 + A_s(t - h_0); \quad (45)$$

- для труб с двойным каркасом:

$$S_{t,red} = S_b + S_s = 0,5bt^2 + A_s(t - h_0) + A_{s1}(t - a'). \quad (46)$$

Значения  $A_{red}$  при  $A_s = A_{s1}$  рассчитывают по формулам:

- для труб с одинарным каркасом:

$$A_{red} = A_b + A_s \alpha = bt + A_s \alpha; \quad (47)$$

- для труб с двойным каркасом:

$$A_{red} = A_b + 2A_s \alpha = bt + 2A_s \alpha. \quad (48)$$

При условии (36) расчет величины ширины раскрытия трещин на внутренней поверхности трубы проводится для проверки неравенства  $\sigma_s \leq R_s^H$ .

Напряжение в растянутой арматуре для труб с двойным каркасом определяют по формуле

$$\sigma_s = \frac{M_{crc} - M_{sc}}{\left(h_0 - \frac{x}{3}\right)A_s} = \frac{M_{crc} - R_{sc}A_{s1}(h_0 - a')}{\left(h_0 - \frac{x}{3}\right)A_s}. \quad (49)$$

Для труб с одинарным каркасом  $M_{sc} = 0$ .

9.2.3 Допускается для труб с двойным каркасом определять напряжение в растянутой арматуре по формуле

$$\sigma_s^B = \frac{M_A - M_{sc}}{\left(h_0 - \frac{x}{3}\right)A_s^\Phi} = \frac{M_A - R_{sc}A_s(h_0 - a')}{\left(h_0 - \frac{x}{3}\right)A_s^\Phi}, \quad (50)$$

а для труб с одинарным каркасом по формуле

$$\sigma_s = \frac{M_A}{\left(h_0 - \frac{x}{3}\right)A_s^\Phi}. \quad (51)$$

При этом должно обеспечиваться условие

$$\sigma_s < R_{s,n}. \quad (52)$$

После этого рассчитывают площадь поперечного сечения растянутого бетона по формуле

$$A_{bt} = 1000(t - x) \quad (53)$$

и вычисляют базовое расстояние между смежными трещинами

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s}, \quad (54)$$

и если  $l_s \leq 400$  мм, принимают  $l_s = 400$  мм.

#### 9.2.4 Условие раскрытия трещин

Расчет по раскрытию трещин выполняют из условия

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (55)$$

где  $a_{crc}$  – расчетная ширина раскрытия трещин;

$a_{crc,ult}$  – предельно допустимая ширина раскрытия трещин.

#### 9.2.5 Определение расчетной ширины раскрытия трещин

Ширина раскрытия нормальных трещин на наружной и внутренней поверхностях стенки железобетонной трубы для открытой укладки в траншеях при контрольной нагрузке по трещиностойкости рассчитывается по уточненной (с учетом криволинейности труб) формуле (8.128) СП 63.13330.2018

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_T \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s, \quad (56)$$

где  $\varphi_1$  – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принимаемый для труб  $\varphi_1 = 1,4$ ;

$\varphi_2$  – коэффициент, учитывающий профиль рабочей арматуры и ее криволинейность в трубе, принимаемый равным  $\varphi_2 = 0,5$  для спиральной арматуры;

$\varphi_3$  – коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемый равным  $\varphi_3 = 1,0$  для труб как изгибаемых элементов;

$\varphi_T$  – коэффициент, учитывающий криволинейность поперечного бетонного сечения труб, принимаемый в зависимости от диаметра труб  $d_i$  по таблице 12;

$\psi_s$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами, принимаемый  $\psi_s = 0,56$  для труб как изгибаемых элементов при  $M_{crc} \approx 0,55M_A$  с учетом пункта 8.2.18 и формулы (8.138) СП 63.13330.2018;

$\sigma_s$  – напряжение в растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от внешней нагрузки;

$l_s$  – базовое расстояние между смежными нормальными трещинами;

$E_s = 2 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости арматурной стали.

Таблица 12 – Значения коэффициента  $\varphi_T$

Диаметр труб $d_i$ , мм	300 – 400	500	600	800	1000	1200 –1400	1600 –1800	2000 –2400	2600 –3000
Коэффициент $\varphi_T$	0,60	0,64	0,68	0,73	0,78	0,82	0,87	0,91	0,95

9.2.6 Предельно допустимая ширина раскрытия трещин  $a_{crc,ult}$  не должна превышать значений:

- 0,2 мм для труб, укладываемых открытым способом (кроме укладываемых в насыпях);

- 0,3 мм для труб, укладываемых в насыпях;

- 0,1 мм для труб, монтируемых микротоннелированием.

## 10 Расчет и подбор армирования железобетонных труб для открытой укладки

### 10.1 Трубы с одинарным спиральным каркасом

10.1.1 Для расчета и подбора армирования используется схема, приведенная на рисунке 6.

Расчет и подбор армирования предусматривает определение общей площади сечения и шага спиральной арматуры с предварительным вычислением параметров  $x$  и  $h_0$ . При этом должна учитываться минимальная допустимая величина бетонного защитного слоя и соблюдаться условие  $\xi = \frac{x}{h_0} \leq 0,5$ .

10.1.2 Площадь сечения спиральной арматуры на 1 пог. м трубы ( $b = 1$  м), в которой допускается образование трещин, определяется из соотношений

$$M_A \leq R_{b,n} b x (h_0 - 0,5x) \leq R_s A_s (h_0 - 0,5x), \quad (57)$$

где  $R_{b,n}$  – нормативное сопротивление тяжелого бетона;

$R_s$  – расчетное сопротивление растяжению арматуры;

$A_s$  – площадь поперечного сечения растянутой арматуры.

10.1.3 Согласно ГОСТ 31384–2017 (таблица Е.4) минимальная толщина защитного слоя бетона должна составлять 20 мм для ненапряженных железобетонных конструкций при воздействии слабо- и среднеагрессивных жидких сред и 25 мм – для сильноагрессивных сред.

Учитывая возможные допустимые отклонения (до 2 мм) от нормируемой толщины защитного слоя при изготовлении труб, рекомендуется принимать при расчетах их армирования минимальную допустимую толщину защитного слоя, равную  $h_{зс, \min} = 22$  мм для железобетонных труб с одинарным каркасом диаметром  $d_i = 1,4$  м и менее,  $h_{зс, \min} = 25$  мм для труб с двойным каркасом диаметром  $d_i < 2,0$  м, подвергающихся воздействию неагрессивных, слабо- и среднеагрессивных жидкостей, а для труб  $d_i \geq 2$  м, подвергающихся воздействию неагрессивной и агрессивных жидкостей всех видов –  $h_{зс, \min} = 25$  мм.

Соответственно должно соблюдаться условие

$$t - (h_0 + 0,5d_s) \geq h_{зс, \min}^{\min}, \quad (58)$$

где  $d_s$  – диаметр спиральной арматуры, мм.

10.1.4 Оптимальное расстояние между спиральной арматурой, работающей на растяжение, и наружной поверхностью стенки трубы, мм, рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$h_0 = 0,568t + \sqrt{0,004624t^2 - \frac{36,99M_A}{bR_{b,n}}}, \quad (59)$$

где размерность значения  $M_A^p$  – кН·мм.

10.1.5 Высота сжатой зоны стенки трубы вычисляется, мм, по формуле

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2000M_A}{bR_{b,n}}} . \quad (60)$$

10.1.6 Диаметр арматурного спирального каркаса рассчитывается по формуле

$$d_{ак} = 2 (0,5d_e - h_0). \quad (61)$$

10.1.7 Минимальная требуемая площадь сечения спиральной арматуры на 1 пог. м стенки трубы ( $b = 1000$  мм) определяется по формуле

$$A_{s,тр\text{еб}} = \frac{xbR_{b,ser}}{\gamma_{b1}R_{s,ser}}, \quad (62)$$

где  $R_{s,ser}$  – нормативное сопротивление растяжению спиральной арматуры.

10.1.8 Шаг спиральной арматуры  $m_\phi$ , мм, диаметром  $d_s$  должен иметь кратность 5 мм и подбираться с округлением в меньшую сторону по формуле

$$m_\phi \leq m \leq \frac{785d_s^2}{A_{s,тр\text{еб}}}. \quad (63)$$

При подборе шага спиральной арматуры должен учитываться минимальный шаг спирали, который может обеспечивать используемый арматурно-сварочный станок для изготовления каркасов. Практика показывает, что минимальный шаг спирали может составлять  $m_{\min} = 25\text{--}40$  мм.

10.1.9 С учетом фактического (выбранного) шага спиральной арматуры  $m_\phi \leq m$  фактическая площадь армирования 1 пог. м трубы составит

$$A_s^\phi = A_{s,тр\text{еб}} \frac{m}{m_\phi}. \quad (64)$$

10.1.10 Пример расчета и подбора армирования железобетонных труб с одинарным каркасом приведен в Ж.1.

## 10.2 Трубы с двойным спиральным каркасом

10.2.1 Для расчета и подбора рабочего армирования используется схема, приведенная на рисунке 7.

10.2.2 Двойной каркас применяется в трубах диаметром условного прохода не менее 1000 мм ( $d_i \geq 1000$  мм) по технологическим или конструктивным условиям.

По технологическим соображениям двойной каркас применяется в трубах, изготавливаемых с немедленной распалубкой (радиальное прессование, вибропрессование), если после распалубки на наружной поверхности трубы на свежееуплотненном бетоне появляются трещины.

По конструктивным соображениям двойной каркас применяется, если при вычислении высоты сжатой зоны стенки трубы  $x$  по формуле (60) значение под корнем – отрицательная величина или не выполняется условие ограничения относительной величины сжатой зоны по формуле (61).

10.2.3 Расстояние  $h_0$  между спиральной проволокой внутреннего каркаса и наружной поверхностью цилиндрической части трубы с двойным каркасом рекомендуется определять из условия обеспечения минимальной толщины бетонного защитного слоя  $h_{зс} = 30$  мм

$$h_0 = t - (h_{зс} + 0,5d_s). \quad (65)$$

Расстояние между наружной поверхностью стенки трубы и осью спиральной проволоки наружного каркаса принимается из соотношения

$$a' = h_{зс} + 0,5d_s = 30 + 0,5d_s. \quad (66)$$

10.2.4 Для железобетонных труб с двойным каркасом  $d_e < 2$  м рекомендуется принимать расчетную величину защитного слоя  $h_{зс} = 25$  мм и для труб  $d_e \geq 2$  м –  $h_{зс} = 30$  мм.

10.2.5 Диаметр внутреннего арматурного спирального каркаса  $d_{ак}$  вычисляется по формуле (61), а наружного  $d_{ак1}$  рассчитывается по формуле

$$d_{ак1} = 2(0,5d_e - a'). \quad (67)$$

10.2.6 Высоту сжатой зоны стенки трубы  $x$  рекомендуется принимать в пределах 25 – 30 мм.

10.2.7 При расчете площади поперечного сечения ( $A_s$  и  $A_{s1}$ ) и шагов ( $m$  и  $m_1$ ) спиральной арматуры соответственно для внутреннего и наружного каркасов рекомендуется принимается  $A_s = A_{s1}$  и  $m = m_1$ .

10.2.8 Минимально допустимую площадь поперечного сечения арматуры допускается определять по формуле

$$A_s = A_{s1} = \frac{R_{b,ser} x b (h_0 - 0,5x)}{\gamma_{b1} [R_{s,n} (h_0 - 0,5x) + R_{sc} (t - a')]} \quad (68)$$

10.2.9 Расчетный шаг спиралей в каркасах определяется по формуле (80) с учетом 10.1.8.

10.2.10 После проведения расчетов по рекомендуемым выше формулам необходимо проверять соотношение (34)

$$R_{b,n} b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{s1}^\Phi (h_0 - a') \geq M_A.$$

Если соотношение (34) не выполняется, то необходимо уменьшать расчетный шаг спирали или повышать класс бетона на сжатие.

Если у трубы  $h_0 < h_{зс, \min}$  и условие (34) выполняется, то проверка труб на трещинообразование не производится.

10.2.11 Пример расчета и подбора армирования трубы с двойным каркасом приведен в Ж.2.

### 10.3 Подбор разделительной арматуры для спиральных каркасов труб

10.3.1 Количество стержней продольной (разделительной) арматуры для каркасов в зависимости от  $d_i$  трубы определяется по таблице 13.

Таблица 13 – Количество разделительных продольных арматурных стержней в каркасах

Диаметр условного прохода трубы $d_i$ , мм	300	400–800	1000–1400	1500–3000
Количество разделительных стержней:				
- одинарный каркас	6	6–12	18–24	–
- двойной каркас	–	–	12–18	24–36

При определении количества стержней продольной арматуры должны также учитываться возможности спирально-сварочных станков заводов-изготовителей труб.

10.3.2 Для продольного разделительного армирования в каркасах труб используются стержни диаметром 6–8 мм (см. 5.2.3). При этом диаметр продольных стержней должен соответствовать диаметру спиральной арматуры или отличаться от него не более, чем на 2 мм.

## 11 Особенности расчета и подбора армирования железобетонных труб для микротоннелирования

### 11.1 Определение нагрузок от вертикального и горизонтального давления грунта

11.1.1 Для труб бестраншейной укладки методом микротоннелирования (закрытая проходка) вертикальное давление грунта определяют на основе СП 102.13330 с учетом высоты сводаобразования  $h_c$  вышележащих слоев грунта (рисунок 8).

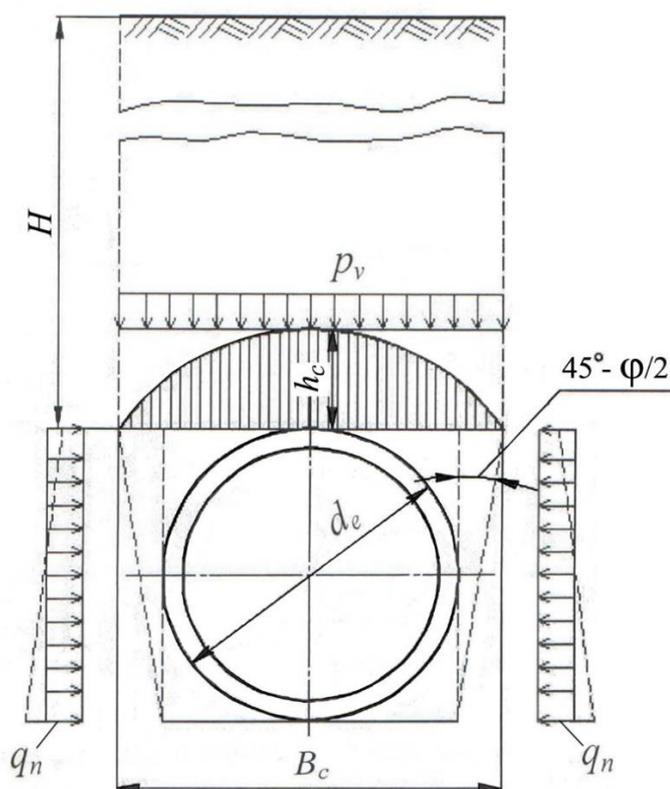


Рисунок 8 – Расчетная схема трубы при закрытой проходке

Значение  $h_c$  рассчитывают в зависимости от коэффициента крепости грунта  $f$  по формуле

$$h_c = \frac{B_c}{2f}, \quad (69)$$

где  $B_c$  – пролет сводообразования, рассчитываемый по схеме, приведенной на рисунке 8, в зависимости от наружного диаметра трубы  $d_e$ , кажущегося угла внутреннего трения грунта  $\varphi_k$  и коэффициента крепости грунта  $f$  определяют по формуле

$$B_c = d_e + 2d_e \operatorname{tg} \varphi_k. \quad (70)$$

Значение  $\varphi_k$  вычисляют в зависимости от значений  $f$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} f. \quad (71)$$

11.1.2 Значения коэффициента  $f$  принимают в пределах  $f = 0,1-0,25$  по СП 102.13330 в зависимости от характеристик грунта.

11.1.3 Расчетное значение вертикального давления грунта на 1 пог. м трубы определяют с коэффициентом надежности  $\gamma_{гм} = 1,5$  по формуле

$$Q_{c(v)} = \gamma_{гм} \rho_{г} h_c d_e. \quad (72)$$

11.1.4 Расчетное значение горизонтального (бокового) давления грунта на уровне горизонтального диаметра трубы определяют по формуле

$$Q_{c(n)} = \gamma_{гм} h_c d_e \tau_n, \quad (73)$$

где  $\tau_n$  – значение коэффициента бокового давления грунта, рассчитываемое по формуле

$$\tau_n = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi_k}{2} \right). \quad (74)$$

11.1.5 Для расчета вертикальной эквивалентной нагрузки на трубу используется формула (25) при значениях параметров:  $\eta = 1$ ;  $\beta = 0,4$  и  $\beta_1 = 0,25$  без учета транспортной нагрузки.

## **11.2 Определение продольных усилий в поперечных кольцевых сечениях стенки трубы**

11.2.1 Для трубопроводов, монтируемых методом микротоннелирования, расчет кольцевых сечений стенки трубы производят на действие продольных усилий, передающихся на трубы при их проталкивании за проходческим комплексом по условно прямолинейному или криволинейному участку тоннеля [3].

11.2.2 Усилие продавливания при микротоннелировании на прямолинейном участке складывается из усилий, необходимых для преодоления сопротивления продавливанию: начального сопротивления, трения о грунт, потерь от трения в элементах механизмов, сопротивления трению от статического давления трубы на грунт, адгезии между трубами и грунтом. Эти сопротивления могут изменяться в зависимости от инженерно-геологических условий, глубины заложения и методов продавливания.

Расчет общего усилия продавливания  $P$ , кН, производится (для гидравлического и грунтового пригруза забоя) по формуле

$$P = P_0 + P_1, \quad (75)$$

где  $P_0$  – начальное сопротивление, кН;

$P_1$  – усилие сопротивления трения и сцепления по боковой поверхности обделки, кН.

$$P_0 = (P_w + P_e) \pi (d_e/2)^2, \quad (76)$$

где  $P_w$  – давление внутри камеры, кН/м<sup>2</sup>;

$P_e$  – режущая сила, принимаемая для грунтового массива 150 кН/м<sup>2</sup>, для гравия до 300 кН/м<sup>2</sup>;

$$P_w = P_3 + 20,$$

где  $P_3$  – горизонтальное давление грунтового массива в забое, кН/м<sup>2</sup>, которое можно рассматривать как горизонтальную составляющую горного давления с учетом возможного образования свода давления при коэффициенте бокового распора  $\lambda = 0,5$ , с учетом временной нагрузки и взвешивающего действия грунтовых вод;

$$P_1 = f_0 L, \quad (77)$$

где  $f_0$  – сила сопротивления вокруг трубы, кН/м;

$L$  – длина продавливания, м;

$$f_0 = \beta [(\pi d_e q + w)\mu' + \pi d_e c'],$$

где  $\beta$  – понижающий коэффициент усилия продавливания, в зависимости от материала или грунта, соприкасающегося с внешней поверхностью трубы, равный:

- 0,15 – для бентонитового раствора,
- 0,35 – для ила и вязких грунтов,
- 0,45 – для песчаных грунтов,
- 0,60 – для гравия и песчано-гравийных грунтов,
- 0,75 – для твердого грунта;

$q$  – равномерная нагрузка, воспринимаемая трубой, кН/м<sup>2</sup>;

$w$  – масса на длину трубы, кН/м;

$\mu'$  – коэффициент трения трубы с грунтом;

$c'$  – адгезия труб с грунтом, кН/м<sup>2</sup>.

Т а б л и ц а 14 – Коэффициенты  $\mu'$  и  $c'$

Материал труб	$\mu'$	Среднее значение $\mu'_{\text{ср}}$	Сцепление $c'$ , кН/м <sup>2</sup>
Бетон по песку, гравию	0,53–0,60	0,55	0
Бетон по супеси	0,40–0,50	0,45	0,19–0,16
Бетон по суглинку	0,36–0,45	0,40	0,15
Бетон по глине	0,30–0,50	0,40	0,22–0,19
Бетон по раствору бентонитовой глины	0,10	0,10	0,05–0,10
Стеклопластик по песку	0,2–0,25	0,22	0
Стеклопластик по глине	0,15	0,15	0,10
Стеклопластик по раствору бентонитовой глины	0,10	0,10	0,05–0,10

### 11.2.3 Расчет труб для криволинейного участка

11.2.3.1 Схема расположения труб на криволинейном (в плане) участке трубопровода представлена на рисунке 9.

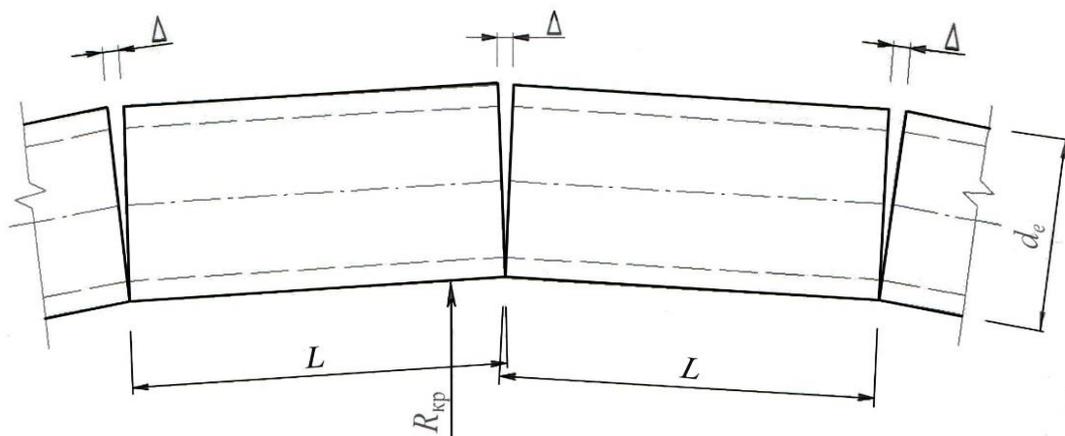


Рисунок 9 – Схема расположения труб при закрытой проходке на криволинейном участке трубопровода

11.2.3.2 Максимальный размер смещения торцов соседних труб  $\Delta$  определяют по формуле

$$\Delta = 0,5 L d_e / R_{кр}, \quad (78)$$

где  $L$  и  $R_{кр}$  – соответственно длина трубы и радиус кривизны трассы тоннеля.

11.2.3.3 При повороте торцов труб происходит сжатие компрессионных прокладок на торцевой поверхности трубы (по внутреннему радиусу) и ослабление сжатия или образование зазора между трубой и компрессионной прокладкой на остальной части.

11.2.3.4 Расчетная схема кольцевых сечений труб для микротоннелирования на давления, возникающие при продавливании, приведена на рисунке 10, где  $p_i$  – ордината эпюры давлений на торцевой поверхности трубы от продольного усилия продавливания  $N$ .

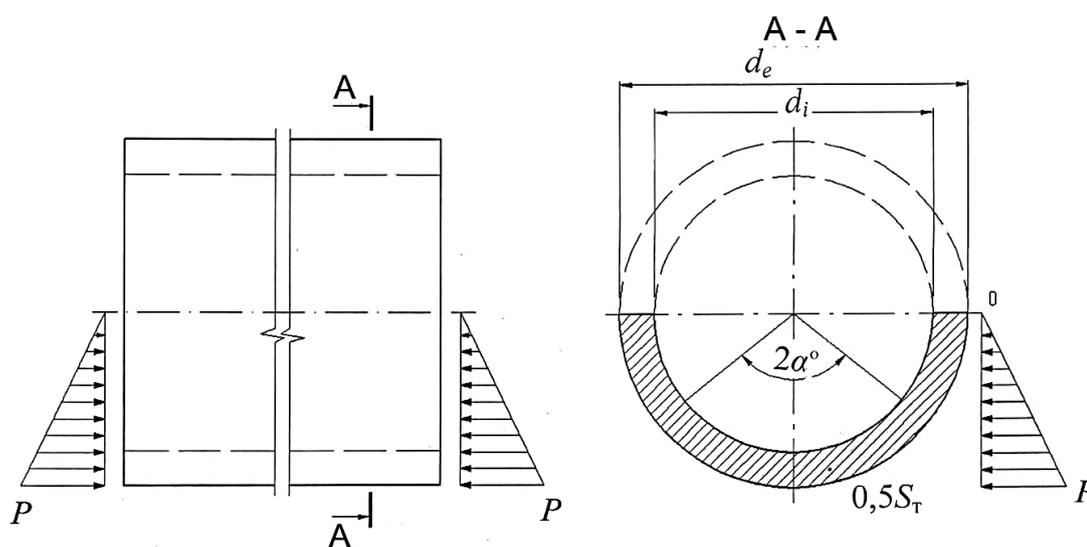


Рисунок 10 – Схема для расчета трубы на продольные нагрузки

11.2.3.5 Расчет выполняют из условия недопущения образования трещин в кольцевых сечениях трубы. Условие трещиностойкости кольцевого сечения трубы имеет вид

$$M \leq M_{crc}. \quad (79)$$

11.2.3.6 Момент трещиностойкости кольцевого сечения трубы  $M_{crc}$  определяют по формуле

$$M_{crc} = R_{bt} W_{c,pl}. \quad (80)$$

11.2.3.7 Изгибающий момент от силы обжатия сечения стенки трубы вычисляют по формуле

$$M = N e_0, \quad (81)$$

где  $e_0$  – эксцентриситет усилия продавливания  $N$  относительно продольной оси трубы;

$N$  – усилие продавливания, создаваемое гидравлическими домкратами.

11.2.3.8 Максимальное значение усилия продавливания  $N'_{max}$ , допускаемое при прохождении криволинейного участка трассы тоннеля, определяют по формуле

$$N'_{max} = \frac{R_{bt,ser} W_{c,pl}}{C e_0}, \quad (82)$$

где  $C$  – коэффициент безопасности, принимаемый равным 1,5.

Значение усилия продавливания  $N_{max}$  является предельно допустимым для труб данного участка трубопровода.

### 11.3 Армирование труб для микротоннелирования

11.3.1 При расчете армирования труб для микротоннелирования учитываются вертикальные нагрузки от грунта (со сводообразованием по 11.1.3), собственного веса трубы (по 7.3) и транспортируемой жидкости (по 7.6). Вертикальные транспортные нагрузки не учитываются.

Также допускается не учитывать горизонтальные нагрузки от грунта, которые частично разгружают трубу.

11.3.2 Расчет и подбор спирального армирования проводят согласно 10.1 (для труб с одинарным спиральным каркасом) и 10.2 (для труб с двойным спиральным каркасом).

11.3.3 Подбор и расчет продольного армирования труб проводят согласно 10.3 с обязательной проверкой прочности трубы по предельным состояниям первой группы при ее продавливании с учетом максимальных продольных нагрузок, значения которых рассчитывают по 11.2.

11.3.4 При одновременном продавливании труб на участке не более 150 м (11.2.2) должно выполняться соотношение

$$N_{\max} \leq \frac{0,5}{C} \left( R_b S_T + \alpha R_{sc} n_s \frac{\pi d_s^2}{4} \right) = 0,334 \left( R_{b,ser} S_T + 0,785 \alpha R_{sc} n_s d_s^2 \right) =$$

$$= 0,262 \left[ R_{b,ser} (d_e^2 - d_i^2) + \alpha R_{sc} n_s d_s^2 \right],$$
(83)

где  $S_T$  – площадь поперечного сечения трубы, определяемая по формуле

$$S_T = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2);$$
(84)

$n_s$  – количество равномерно распределенных по окружности продольных стержней;

$C = 1,5$  – коэффициент безопасности.

11.3.5 При продавливании труб на протяженном (более 150 м) криволинейном участке (11.2.3) максимальное усилие продавливания  $N'_{\max}$  рассчитывается по формуле (82).

Для подбора и расчета продольного армирования должно использоваться условие (83), в котором  $N_{\max}$  заменяется на  $N'_{\max}$ .

11.3.6 Пример расчета железобетонной трубы для микротоннелирования приведен в приложении И.

## 12 Расчет контрольных нагрузок для труб

### 12.1 Определение контрольных вертикальных нагрузок

12.1.1 Контрольные и испытательные вертикальные нагрузки на трубы рассчитываются с использованием коэффициента безопасности  $C$ , принимаемого в соответствии с ГОСТ 8829, и расчетной эквивалентной линейной нагрузки  $P_{\text{эКВ}}$  (подраздел 7.8).

12.1.2 Контрольная вертикальная нагрузка по прочности бетонных и железобетонных труб определяется по формуле

$$P_{\text{к}}^{\text{пр}} = C P_{\text{эКВ}},$$
(85)

где  $C$  – коэффициент безопасности, принимаемый равным 1,6 для бетонных труб и 1,3 – для железобетонных труб.

12.1.3 Контрольная линейная испытательная нагрузка по прочности определяется для бетонных и железобетонных труб без учета собственного веса трубы по формуле

$$P_{\text{и}}^{\text{пр}} = C \eta \left[ \beta (Q_{\Gamma} + Q_{\text{Т}}) + \beta_1 Q_{\text{ж}} \right].$$
(86)

12.1.4 Расчетная контрольная нагрузка по трещиностойкости вычисляется по формуле

$$P_{\text{к}}^{\text{тр}} = 0,55 P_{\text{к}}^{\text{пр}}.$$
(87)

12.1.5 Контрольная испытательная нагрузка по трещиностойкости железобетонных труб вычисляется по формуле

$$P_{\text{и}}^{\text{тр}} = 0,55 P_{\text{и}}^{\text{пр}}.$$
(88)

12.1.6 При прочностных испытаниях железобетонных труб нагружением по однолинейной схеме, приведенной на рисунке 4,а, ширина раскрытия трещин при контрольных нагрузках по трещиностойкости не должна превышать значений, указанных в 9.2.5.

### **13 Особенности конструирования и армирования труб с плоской подошвой**

13.1 Бетонные и железобетонные трубы с плоской подошвой, используемые при открытой укладке трубопроводов, являются более эффективными по сравнению с трубами, имеющими цилиндрическую опорную наружную поверхность, т.к. подвергаются существенно меньшим эквивалентным нагрузкам (7.8.2) и не требуют трудоемкого устройства профилированного основания под углом 90° или 120°.

13.2 Геометрические параметры труб с плоской подошвой, необходимые для их конструирования и расчетов, приведены на рисунке Г.1.

13.3 Расчетная схема для определения площади поперечного сечения трубы с плоской подошвой, необходимая для расчета вертикальной нагрузки от собственного веса трубы, приведена на рисунке Г.2.

13.4 Для железобетонных труб с плоской подошвой рекомендуется (при подтверждении расчета для диаметров  $d_i = 1000\text{--}1600$  мм) использование одинарного спирального каркаса при обязательной надежной фиксации его проектного положения.

13.5 Схемы армирования одинарным спиральным каркасом железобетонных труб с плоской подошвой приведены на рисунке Г.3 (с использованием цилиндрического каркаса) и на рисунке Г.4 (с использованием овоидального каркаса).

13.6 Использование овоидального каркаса (по сравнению с цилиндрическим) обеспечивает дополнительную (на 10%–15%) экономию арматуры.

Армирование трубы с использованием овоидального каркаса предусматривает применение составного каркаса состоящего из трех частей: непосредственно овоидального каркаса, расположенного в основной средней части трубы, и двух относительно коротких каркасов – раструбного конического и цилиндрического втулочного, расположенных в концевых (раструбной и втулочной) частях трубы, что показано на рисунке Г.5. При этом овоидальный каркас жестко крепится к цилиндрическому и коническому каркасам сваркой или вязальной проволокой.

13.7 Овоидальный арматурный каркас может быть изготовлен на арматурно-сварочном станке или получен сплющиванием исходного цилиндрического каркаса.

13.8 Проектное положение овоидального каркаса должно обеспечиваться специальными фиксаторами двух типов из пластмассы или стальной арматуры в количестве не меньше 9 шт., устанавливаемых по 3 шт. под углом 120° в одной плоскости поперечного сечения каркаса. При этом внешние штыри фиксаторов 1-го типа должны упираться в образующий стык плоской и цилиндрических

поверхностей опалубки, а фиксаторы 2-го типа – во внутреннюю поверхность (точка В на рисунке 4) опалубки, формирующую наружную поверхность шельги трубы.

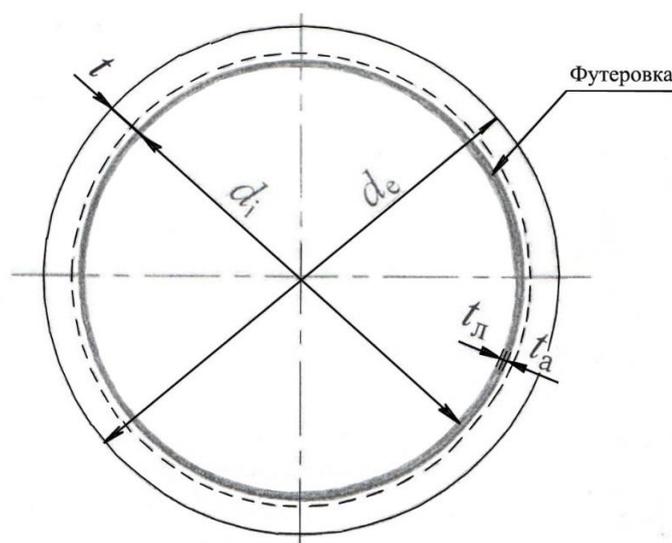
13.9 Примеры расчета и конструирования труб с плоской подошвой приведены в приложениях Е, К, раздел Ж.2.

#### 14 Особенности расчета труб с внутренней полимерной облицовкой

14.1 Как было указано в 5.3, внутренняя полимерная (полиэтиленовая или полипропиленовая) облицовка труб применяется с двумя видами анкерных элементов: точечных, расположенных в шахматном порядке, или Т-образных (непрерывных), направленных параллельно оси трубы.

Конструктивное решение и размеры указанных полимерных листов с анкерами приведены в приложении Д.

Поперечное сечение трубы без подошвы с внутренней полимерной облицовкой показано на рисунке 11.



$t$  – общая толщина стенки трубы,  $t_{л}$  – толщина полимерного листа,  $t_a$  – высота анкера

**Рисунок 11 – Поперечное сечение трубы с внутренней полимерной облицовкой**

14.2 Внутреннюю полимерную облицовку рекомендуется использовать в трубах для трубопроводов внешних сетей, транспортирующих агрессивные жидкости, например, хозяйственно-бытовые канализационные жидкости.

14.3 Трубы с внутренней полимерной облицовкой имеют диаметр  $d_i \geq 0,8$  м, т.к. для них должна обязательно выполняться приварка вручную полимерных полос между футеровками смежных труб для создания надежной преграды проникновению в полости между торцами труб агрессивной жидкости, транспортируемой по трубопроводу.

14.4 При расчетах труб с внутренней полимерной облицовкой величина расчетного внутреннего радиуса бетонной части трубы должна приниматься больше номинального радиуса  $r_{ср}$  на величину:

-  $t_{л}+t_a$  – при использовании полимерного чехла типа T-LOCK с Т-образными анкерами;

-  $t_{л}+0,5t_a$  – при применении чехлов типа V-LOCK с дискретными анкерами.

14.5 Наиболее эффективным, существенно улучшающим деформативно-прочностные характеристики труб, является применение внутреннего полимерного чехла с анкерами для бетонных труб, т.к. такой чехол фактически выполняет роль поверхностного армирования.

14.6 Расчет бетонной трубы с полимерной облицовкой проводится по прочности (без раскрытия трещин) по предельным состояниям первой группы при воздействии изгибающего момента  $M_B$  в точках Б (рисунок 4, б), рассчитываемого по формуле (86).

При этом формула (86) примет вид

$$M_{B(п)} = 0,182 P_{\text{экв}} r_{\text{ср}(п)} b, \quad (89)$$

где  $r_{\text{ср}(п)}$  – средний расчетный диаметр трубы, учитывающий наличие полимерного чехла, величина которого принимается с учетом вида и геометрических параметров чехлов (пункт 14.4).

Схема для расчета бетонной трубы с внутренней полимерной облицовкой приведена на рисунке 12.

При расчете бетонной трубы с полимерным чехлом по первой группе предельных состояний (по прочности) должны обеспечиваться соотношения

$$M_{B(п)} \leq M_{\text{ср}} = \gamma_{bl} R_{bt} W_{pl} \leq M_{\text{ult}} = R_b b x (h_0 - 0,5x) - 0,9 R_{п} A_{п} t, \quad (90)$$

где  $\gamma_{bl}$  и  $R_{bt}$  – принимаются с учетом рекомендаций 9.1.2;

$R_{п}$  – прочность полимерного листа на растяжение, принимаемая по данным таблицы 2;

$A_{п}$  – площадь поперечного сечения полимерного листа толщиной  $t_{п}$  (без анкеров), равная  $A_{п} = b t_{п}$ ;

$W_{pl}$  – упругопластический момент бетонного элемента продольного сечения трубы, рассчитываемый по формуле

$$W_{pl} = \frac{b t_1^3}{3,5}, \quad (91)$$

$t_1$  – толщина бетона в стенке трубы:  $t_1 = t - t_{п}$ .

При этом допускается принимать  $x = 0,5t$  и  $h_0 = t$ .

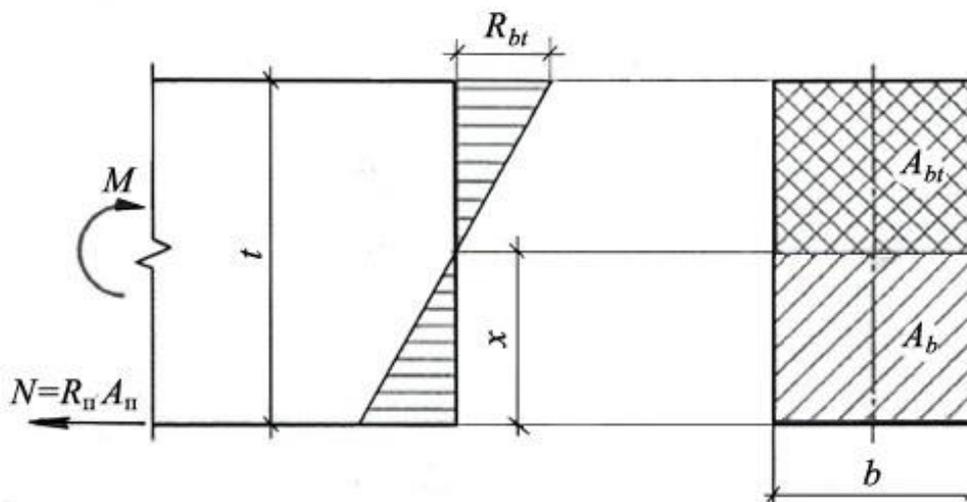


Рисунок 12 – Расчетная схема бетонной трубы с внутренней полимерной облицовкой

14.7 Поскольку внутренняя полимерная облицовка водонепроницаема, то при ее применении, например, для железобетонных труб с плоской подошвой, армированных одинарным оvoidальным каркасом, толщина защитного слоя бетона в наиболее опасном сечении трубы – шельге может быть меньше, чем это рекомендовано в 10.1.3 (порядка 5–10 мм), что позволит дополнительно снизить расход арматурной стали на 10% –15%.

14.8 В железобетонных трубах, армированных цилиндрическим каркасом, при применении внутренней полимерной облицовки может быть получена некоторая экономия спиральной арматуры: до 3%–4% для труб с одинарным каркасом и до 1%–2% – для труб с двойным каркасом.

14.9 Для расчета армирования железобетонных труб с внутренней полимерной облицовкой рекомендуется использовать следующие формулы:

- для труб с одинарным армированием:

$$A_s = \frac{R_{b,n}bx(h_0 - 0,5x) - 0,9R_{пt}t}{\gamma_{b1}R_s(h_0 - 0,5x)}; \quad (92)$$

- для труб с двойным армированием:

$$A_s = A_{s1} = \frac{R_{b,n}bx(h_0 - 0,5x) - 0,9R_{пt}t}{\gamma_{b1} [R_s(h_0 - 0,5x) + R_{sc}(h_0 - a)]}, \quad (93)$$

где  $\gamma_{b1} = 0,9$  – коэффициент, учитывающий продолжительное действие нагрузки на трубу при эксплуатации трубопровода.

14.10 Пример расчета бетонной трубы с полимерной облицовкой приведен в приложении К.

## Приложение А

### Основные буквенные обозначения

#### А.1 Геометрические характеристики

- $a_{crc}$  – расчетная ширина раскрытия трещин в стенке железобетонной трубы;
- $A_s$  и  $A_{s1}$  – площади поперечного сечения спиральной арматуры, работающей соответственно на растяжение и сжатие;
- $B$  – ширина траншеи на уровне верха трубы;
- $B_{cp}$  – средняя ширина траншеи (на уровне  $0,5H$ );
- $B_{пр}$  – ширина прорези в траншее;
- $d_e$  – наружный диаметр трубы;
- $d_i$  – внутренний диаметр трубы (диаметр условного прохода);
- $d_{cp}$  – средний диаметр трубы;
- $d_{ак}, d_{ак1}$  – диаметр арматурного цилиндрического спирального каркаса;
- $H$  – высота засыпки трубы грунтом над верхом ее основной цилиндрической части;
- $h_0$  – расстояние от растянутой спиральной арматуры до наружной поверхности стенки трубы;
- $h_{зс}, h_{зс, min}$  – принятая и минимальная допустимая толщина защитного слоя бетона до арматуры;
- $h_{пр}$  – высота прорези над верхом цилиндрической части трубы;
- $h_c$  – высота сводообразования грунта при микротоннелировании;
- $l_1$  – длина трубы геометрическая (полная);
- $l$  – длина трубы полезная;
- $m, m_{ф}$  – расчетный и фактический шаг между спиралями рабочей арматуры в трубе;
- $R_{кр}, R_{min}$  – полный и наименьший радиус кривизны трубопровода, монтируемого микротоннелированием;
- $W_{pl}$  – момент сопротивления кольцевого (поперечного) сечения трубы с учетом деформаций растянутого бетона;
- $\chi d_e$  – высота трубы над грунтовым основанием;
- $r_{cp}$  – средний радиус трубы;
- $t$  – толщина стенки трубы в ее основной цилиндрической части;
- $t_{п}$  – толщина плоской подошвы трубы;
- $t_{л}$  – толщина полимерного футеровочного листа;
- $t_a$  – высота анкера полимерного футеровочного листа;
- $2\alpha^\circ$  – угол охвата трубы профилированным грунтовым основанием или бетонным фундаментом;
- $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта;
- $S_T$  – площадь поперечного сечения трубы;
- $x$  – высота сжатой зоны бетона в продольном сечении стенки трубы.

## **А.2 Усилия, нагрузки**

$M_{A(B,B)}$  – расчетные изгибающие моменты, возникающие в опасных точках поперечного сечения трубы;

$M'_{A(B,B)}$  – перераспределенные расчетные изгибающие моменты в опасных точках поперечного сечения трубы;

$M_{ult}$  – предельный расчетный изгибающий момент, который может быть воспринят продольным сечением стенки трубы;

$M_{crc}$  – изгибающий момент начала трещинообразования в стенке трубы;

$N$  – усилие продавливания, создаваемое гидродомкратами при микротоннелировании;

$P_k$  – контрольная вертикальная нагрузка;

$G_{cb}$  – собственный вес трубы;

$G_j$  – вес транспортируемой жидкости;

$Q_r^n, Q_r$  – нормативная и расчетная нагрузки вертикального давления грунта засыпки;

$Q_{jn}^n, Q_{j}$  – нормативная и расчетная нагрузки от веса транспортируемой жидкости;

$p_{T(v)}$  – удельное нормативное вертикальное давление, передающееся через грунт от временной транспортной нагрузки;

$Q_{cb}^n, Q_{cb}$  – нормативная и расчетная вертикальные нагрузки от собственного веса труб;

$p_{r(v)}$  – вертикальное давление грунта засыпки;

$p_{r(n)}$  – горизонтальное давление грунта засыпки;

$p_w$  – гидростатическое давление грунтовых вод;

$P_{экв}$  – расчетная линейная эквивалентная нагрузка, приложенная вдоль продольной образующей (равнодействующая внешних нагрузок).

## **А.3 Физические характеристики материалов**

$R_{b,n}$  – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию;

$R_b, R_{b,ser}$  – расчетные сопротивления бетона осевому сжатию для предельных состояний соответственно первой и второй групп;

$R_{bt,n}$  – нормативное сопротивление бетона осевому растяжению;

$R_{bt}, R_{bt,ser}$  – расчетные сопротивления бетона осевому растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;

$R_s, R_{sc}$  – расчетные сопротивления арматуры растяжению и сжатию;

$E_b$  – начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении;

$E_{b,red}$  – приведенный модуль деформации сжатого бетона;

$E_s$  – модуль упругости арматуры;

$\sigma_s$  – напряжения в растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от внешней нагрузки;

$E_{гр}$  – модуль деформаций грунта засыпки;

$E_l$  – модуль упругости полимерных листов;

$\rho_r, \rho_b, \rho_{жб}, \rho_{ж}$  – соответственно значения плотности грунта, бетона, железобетона и транспортируемой жидкости;

$\alpha$  – отношение модулей упругости арматуры  $E_s$  и бетона  $E_b$ .

#### **А.4 Коэффициенты**

$f$  – коэффициент крепости грунта по Протодьяконову;

$k_{тр}$  – коэффициент вертикального давления грунта в траншее;

$k_n$  – коэффициент концентрации вертикального давления грунта;

$k_{пр}$  – коэффициент, учитывающий особенности укладки труб в прорези;

$\tau_n$  – коэффициент бокового давления грунта в траншее,

$\psi$  – коэффициент, учитывающий разгрузку трубы грунтом пазух траншеи;

$\gamma_f (\gamma_r, \gamma_t, \gamma_{св}, \gamma_{ж}, \gamma_w)$  – коэффициент надежности по нагрузке (от воздействия грунта, транспорта, собственного веса, транспортирующей жидкости, грунтовых вод);

$\gamma_{bt}$  – коэффициент надежности по бетону при расчете по предельным состояниям первой группы;

$\gamma_{b1}$  – коэффициент условий работы для бетонных и железобетонных труб при длительном воздействии нагрузок;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий боковое давление грунта при расчете эквивалентной линейной нагрузки;

$\mu$  – коэффициент динамичности при транспортной нагрузке;

$e_r$  – коэффициент пористости грунта;

$\beta$  и  $\beta_1$  – коэффициенты приведения, учитывающие способ опирания труб в траншее;

$C$  – коэффициент безопасности к нагрузке на трубы.

## Приложение Б

### Конструктивно-технические решения, типы и геометрические параметры труб

#### Б.1 Бетонные трубы

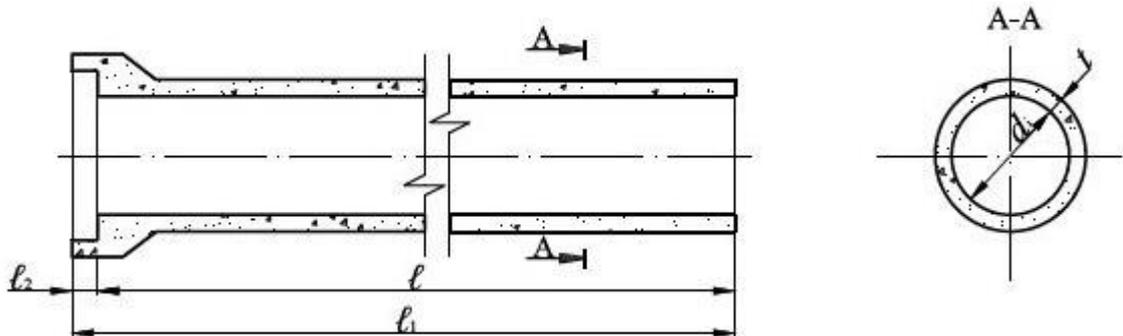


Рисунок Б.1.1 – Труба типа БТ со стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами

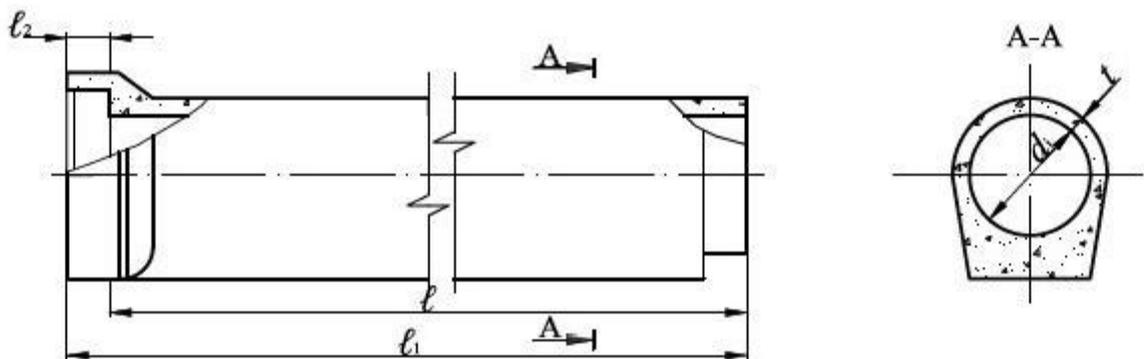


Рисунок Б.1.2 – Труба типа БТП с подошвой и со стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами

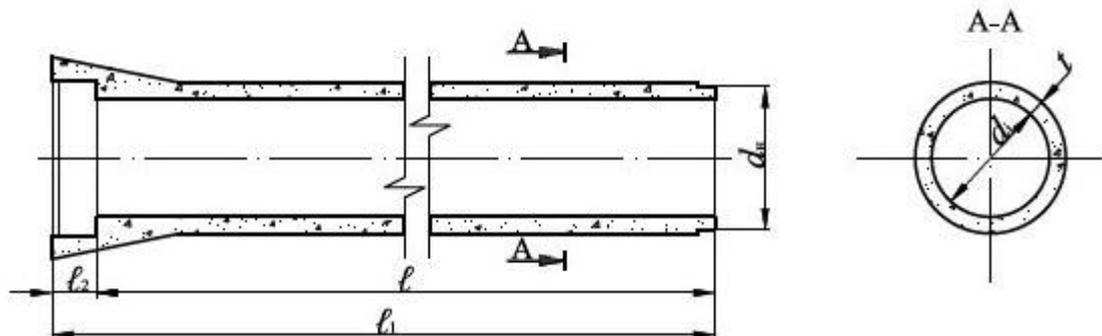
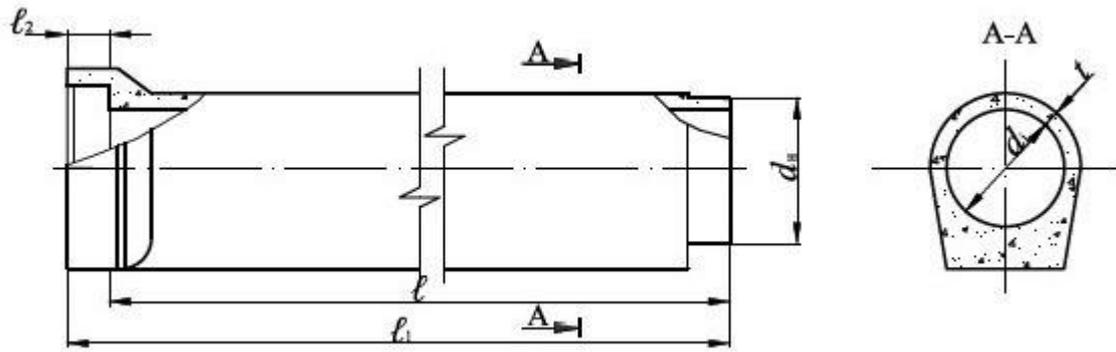
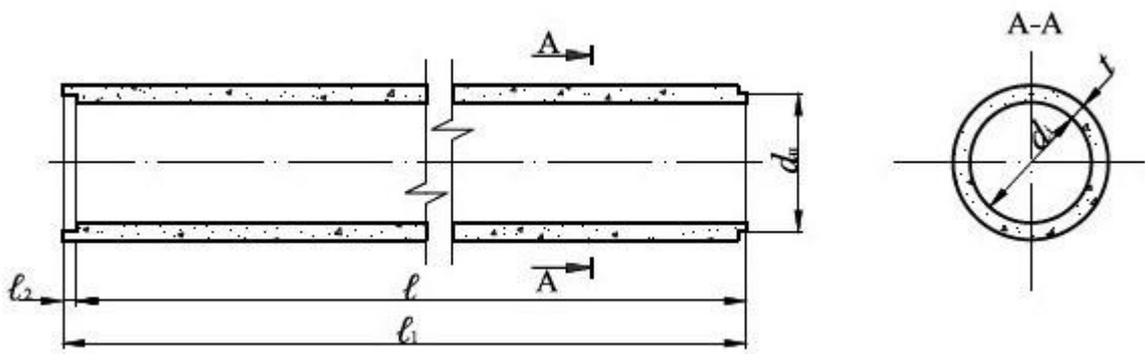


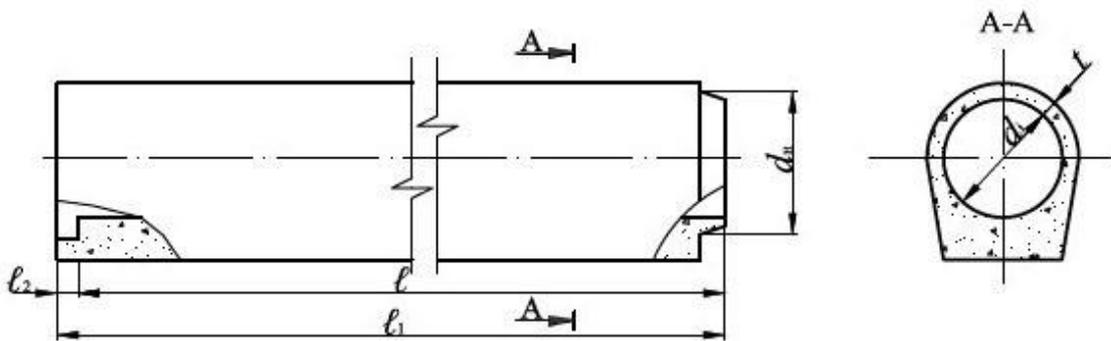
Рисунок Б.1.3 – Труба типа БТС со ступенчатой поверхностью втулочного конца и стыками, уплотняемыми резиновыми кольцами



**Рисунок Б.1.4 – Труба типа БТСП с подошвой и ступенчатой поверхностью втулочного конца и стыками, уплотняемыми резиновыми кольцами**



**Рисунок Б.1.5 – Труба типа БТФ со стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами**



**Рисунок Б.1.6 – Труба типа БТФП с подошвой и стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами**

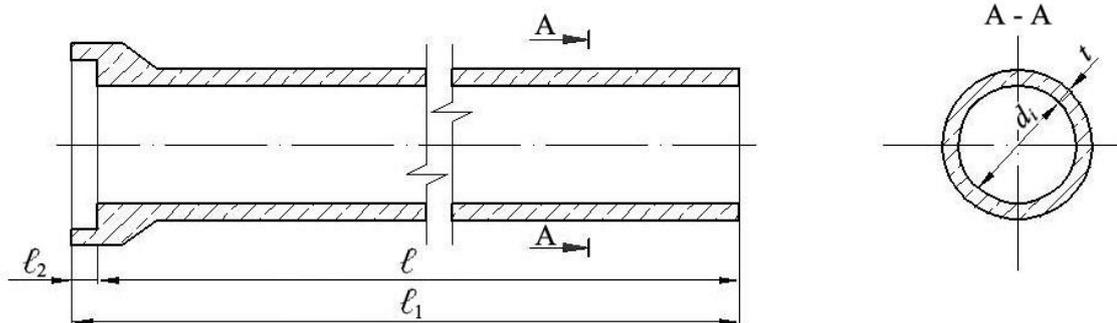
Т а б л и ц а Б.1 — Рекомендуемые основные размеры бетонных труб

Размеры в миллиметрах

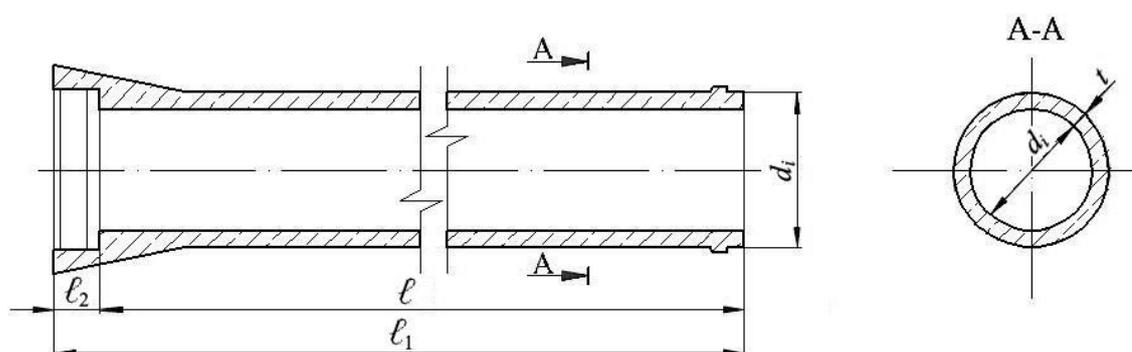
Тип трубы	Внутренний диаметр $d_i$	Рекомендуемые размеры			
		Полезная длина $l$	Минимальная толщина стенки $t$	Глубина раструба $l_2$	Глубина фальца $l_2$
БТ	150	1000	25	50	—
	200		30	50	
	300	1500	45	80	
	400		55	100	
	500	2000	65	100	
	600		75	100	
	800		95	110	
	1000		105	110	
1200		130	120		
БТП	600	2000	75	100	—
	800		95	110	
	1000		105	110	
	1200		130	120	
БТС	400	1500	55	145	—
	500		65	155	
	600	2000	75	155	
	800		95	165	
	1000		105	175	
БТСЛ	600	2000	75	155	—
	800		95	165	
	1000		105	175	
	1200		130	120	
БТФ	300	1500	45	—	25
	400		55		25
	500	2000	65		30
	600		75		35
	800		95		55
БТФП	1000	2000	105	—	75
	1200		130		75

Примечание – В настоящей таблице приведены значения полезной длины, толщины стенки, глубин раструба и фальцев для различных типов труб, которые рекомендуется принимать при разработке рабочих чертежей труб. При экономическом обосновании допускаются изготовление и применение труб других размеров.

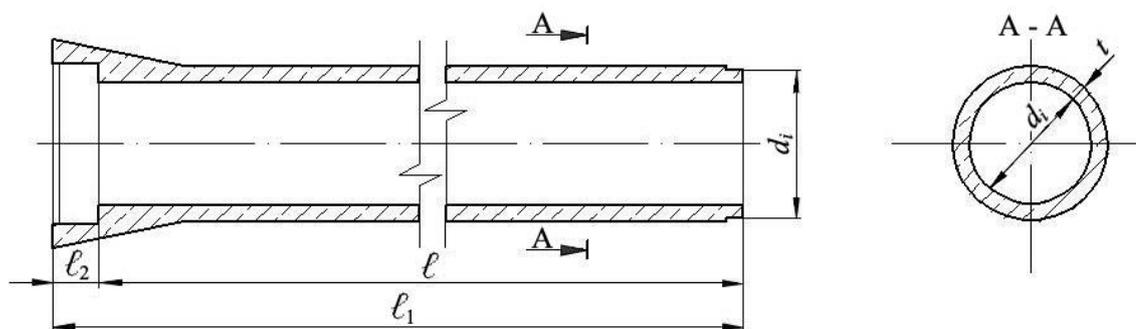
## Б.2 Железобетонные трубы для траншейной укладки



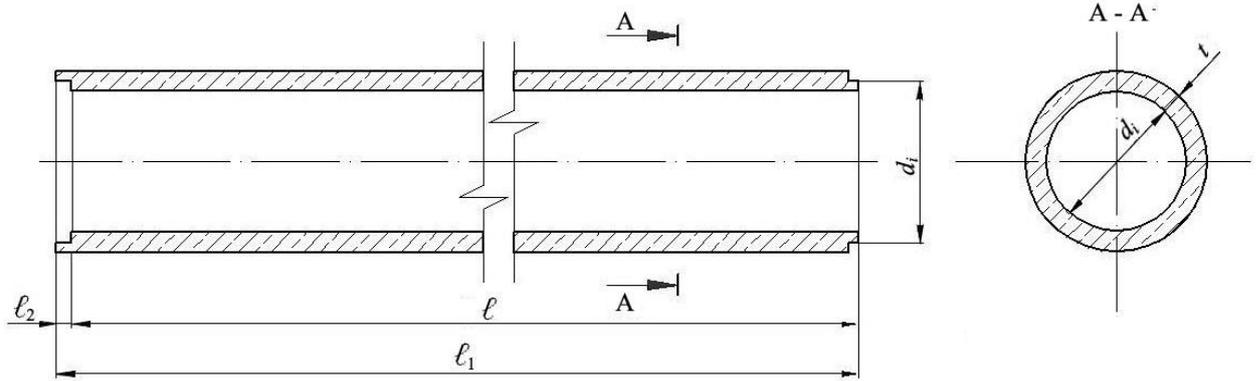
**Рисунок Б.2.1** – Труба типа Т со стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами



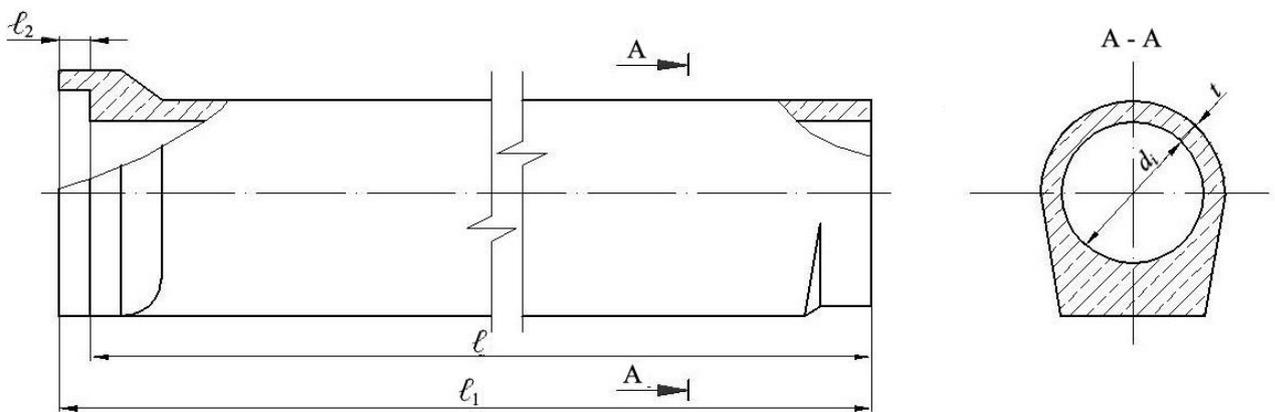
**Рисунок Б.2.2** – Труба типа ТБ с упорным буртиком и стыками, уплотняемыми резиновыми кольцами или другими эластомерными материалами



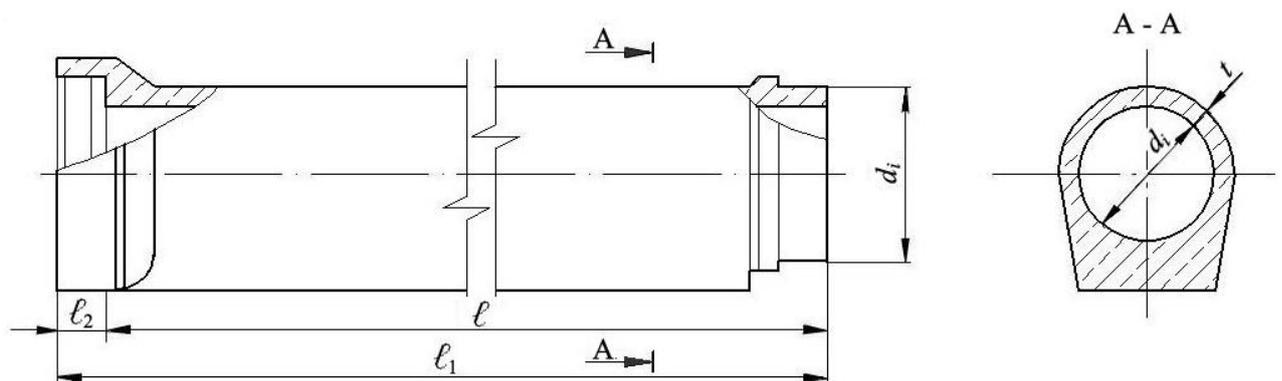
**Рисунок Б.2.3** – Труба типа ТС со стыками, уплотняемыми резиновыми кольцами или другими эластомерными материалами



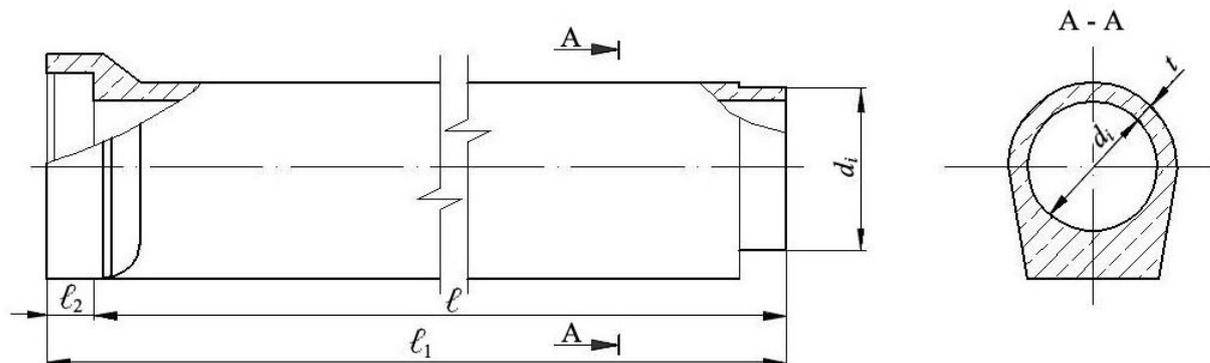
**Рисунок Б.2.4 – Труба типа ТФ фальцевая со стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами**



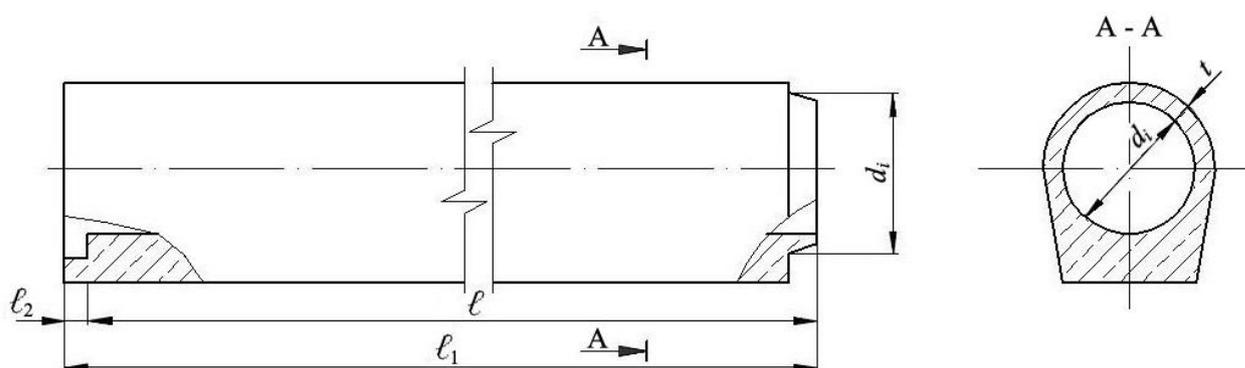
**Рисунок Б.2.5 – Труба типа ТП с подошвой и стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами**



**Рисунок Б.2.6 – Труба типа ТБП с подошвой и стыками, уплотняемыми резиновыми кольцами или другими эластомерными материалами**



**Рисунок Б.2.7 – Труба типа ТСП с подошвой и стыками, уплотняемыми резиновыми кольцами или другими эластомерными материалами**



**Рисунок Б.2.8 – Труба типа ТФП фальцевая с подошвой и стыками, уплотняемыми твердеющими герметиками или другими материалами**

Таблица Б.2 – Рекомендуемые основные размеры железобетонных труб

Размеры в миллиметрах

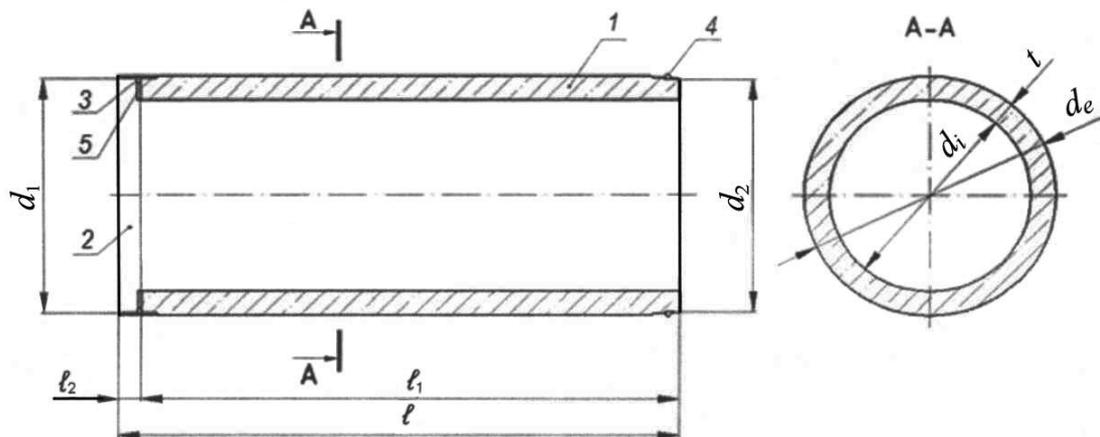
Тип трубы	Внутренний диаметр $d_j$	Рекомендуемые размеры				
		Полезная длина $l$	Минимальная толщина	Глубина раструба $l_2$	Глубина фальца $l_2$	
Т, ТБ, ТС, ТФ	300	2000	45	80	25	
	400	2500	50			
	500	(5000)	55	100	25	
Т, ТП, ТБ, ТС, ТБП, ТСП,	800	2500—3000 (5000)	80	110	55	
	1000		100		80	
	1200		110		100	
ТП, ТБП, ТСП, ТФП	1800	2500	125	120	100	
	2000		130			130
	2200		140			135

**Примечания**

1 В таблице приведены значения полезной длины  $l$ , толщины стенки  $t$ , глубин раструба и фальцев для различных типов труб, которые рекомендуется принимать при разработке рабочих чертежей труб. При экономическом обосновании допускается изготовление и применение труб других размеров.

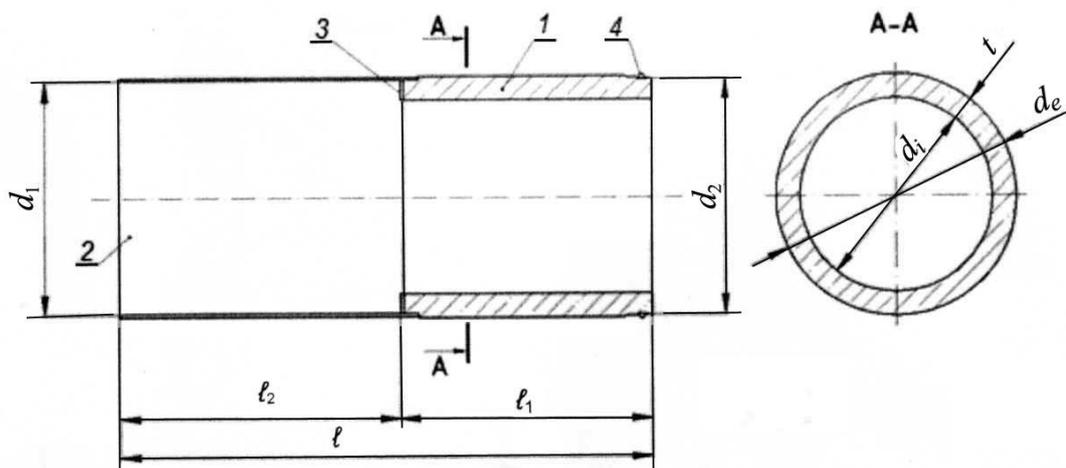
2 В скобках указаны длины труб, изготавливаемых методом центрифугирования.

### Б.3 Железобетонные трубы для микротоннелирования



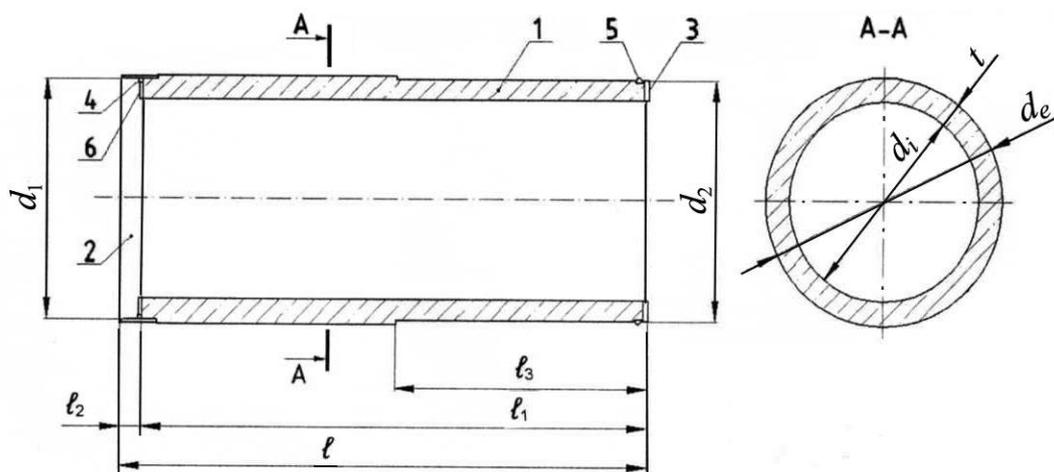
1 – бетонная часть трубы; 2 – раструбная обечайка стальная; 3 – уплотнитель; 4 – уплотнительная манжета; 5 – компрессионное кольцо (ДСП);  $d_i$  – внутренний диаметр трубы;  $d_e$  – наружный диаметр трубы;  $t$  – толщина стенки трубы;  $d_1$  – внутренний диаметр раструбной обечайки;  $d_2$  – диаметр втулочного конца трубы;  $l$ ,  $l_1$  – размеры трубы по ее длине;  $l_2$  – глубина раструба

**Рисунок Б.3.1 – Трубы типов Т (рядовая), Т<sub>н</sub> (нагнетательная), Т<sub>з</sub> (защитовая)**



1 – бетонная часть трубы; 2 – кожух стальной; 3 – кольцо стальное упорное; 4 – уплотнительная манжета;  $d_i$  – внутренний диаметр трубы;  $d_e$  – наружный диаметр трубы;  $t$  – толщина стенки трубы;  $d_1$  – внутренний диаметр раструбной обечайки;  $d_2$  – диаметр втулочного конца трубы;  $l$ ,  $l_1$  – размеры трубы по ее длине;  $l_2$  – глубина раструба

**Рисунок Б.3.2 – Труба типа 1Тс (первая стационарная)**



1 – бетонная часть трубы; 2 – раструбная обечайка стальная; 3 – упорное кольцо; 4 – уплотнитель; 5 – уплотнительная манжета; 6 – компрессионное кольцо;  $d_i$  – внутренний диаметр трубы;  $d_e$  – наружный диаметр трубы;  $t$  – толщина стенки трубы;  $d_1$  – внутренний диаметр раструбной обечайки;  $d_2$  – диаметр втулочного конца трубы;  $l$ ,  $l_1$ ,  $l_3$  – размеры трубы по ее длине;  $l_2$  – глубина раструба

**Рисунок Б.3.3 – Труба типа 2Тс (вторая стационарная)**

Таблица Б.3 – Рекомендуемые основные размеры труб диаметром 800–2400 мм

Марка трубы	Размеры в миллиметрах							
	Геометрические параметры							
	$d_i$	$d_1$	$d_2$	$d_e$	$l$	$l_1$	$l_2$	$t$
Т, Т <sub>н</sub> и Т <sub>з</sub>	800	1097	1051	1100	3110	3000	110	150
	1000	1280	1230	1280	3120	3000	120	140
	1200	1491	1444	1494	3120	3000	120	147
	1500	1776	1730	1780	3150	3000	150	140
	2000	2500	2450	2500	3150	3000	150	250
	2400	3000	2950	3000	3150	3000	150	300
	2500	2976	2938	3000	3150	3000	150	250
1Тс	1000	1280	1230	1280	3120	1370	1750	140
	1200	1491	1444	1492	3150	1750	1400	146
	1500	1776	1730	1780	2460	420	2040	140
	2000	2498	2450	2500	2590	440	2150	250
	2400	2998	2950	3000	1830	480	1350	300
	2500	2970	2938	3000	2500	480	2020	250
2Тс	1000	1280	1247	1248	3140	3120	120	124
	1200	1491	1466	1466	3200	3080	120	133
	1500	1776	1736	1736	3150	3000	150	218
	2000	2500	2452	2452	3150	3000	150	226
	2400	3000	2956	2956	1930	1780	150	278
	2500	2976	2940	3000	3150	3000	150	250

## Приложение В

### Схемы открытой укладки труб на различные типы оснований

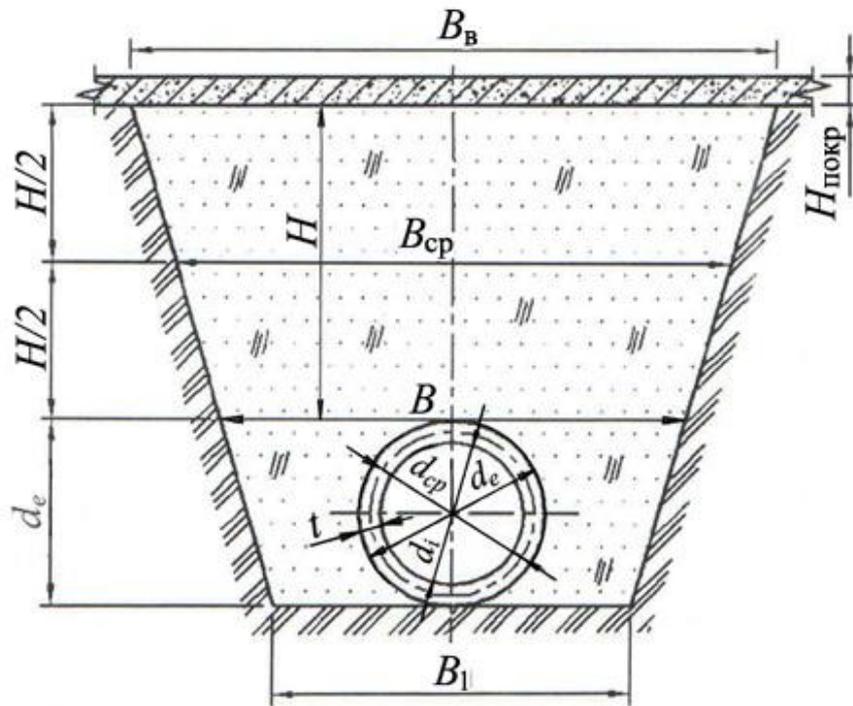


Рисунок В.1 – Укладка труб диаметром  $d_i = 300 \div 500$  мм без подошвы на плоское грунтовое основание

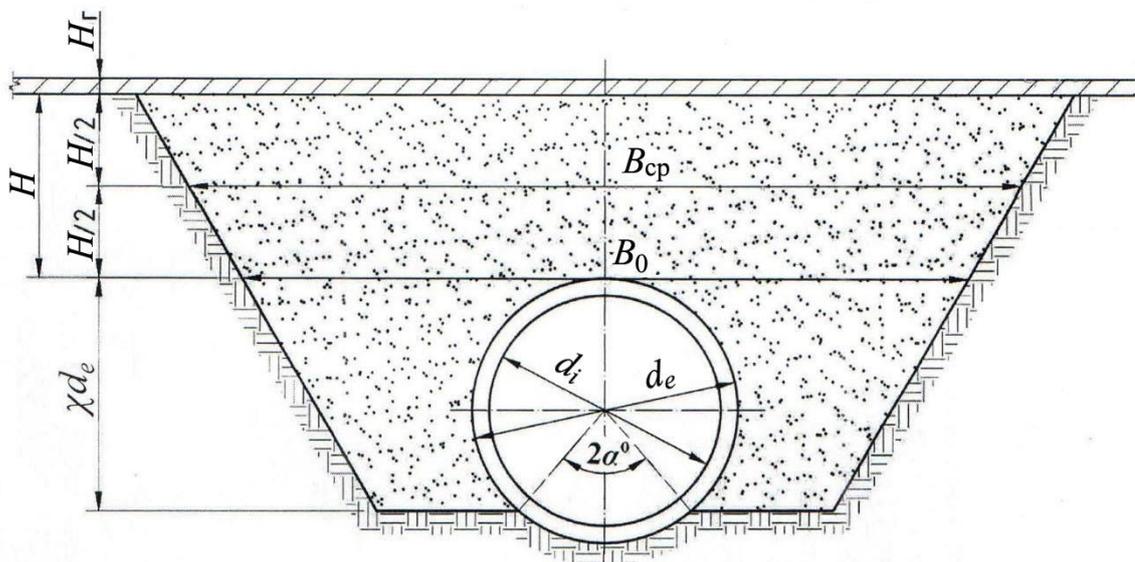
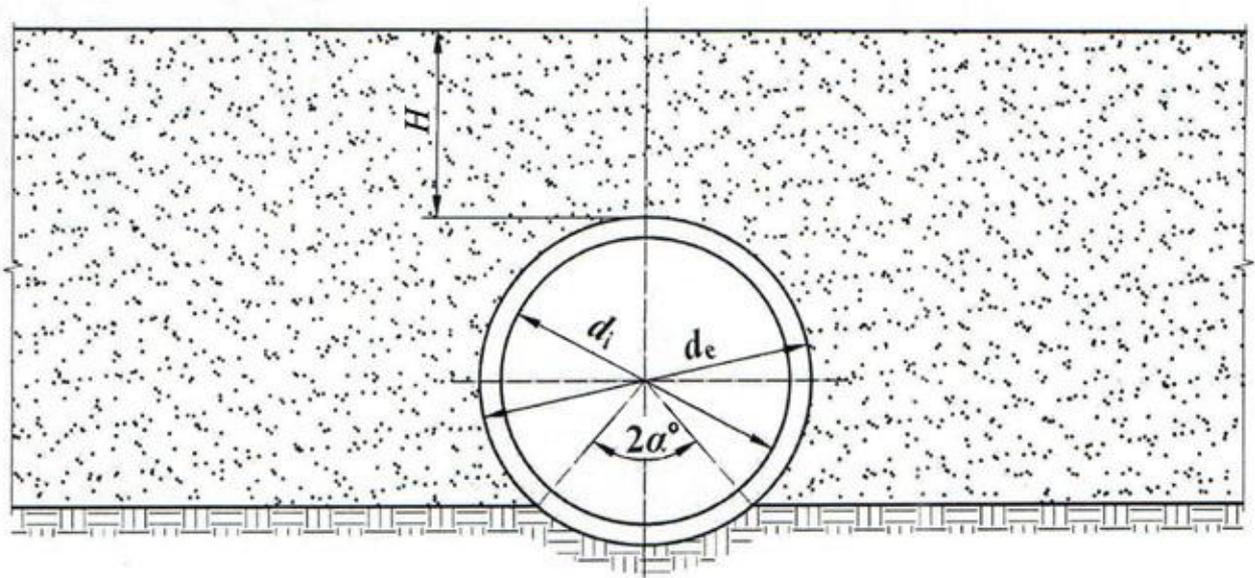
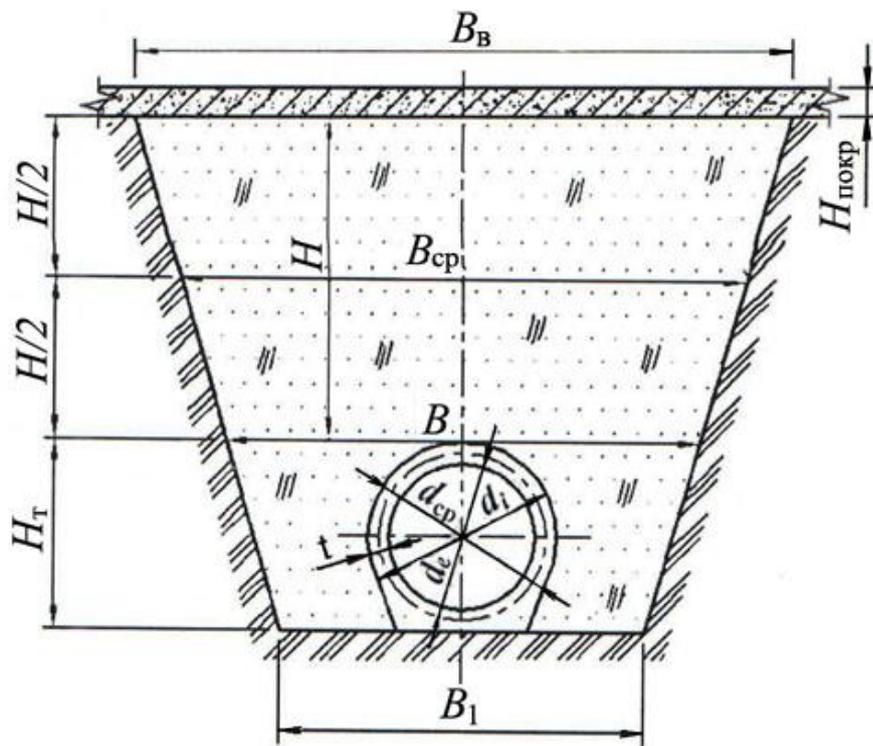


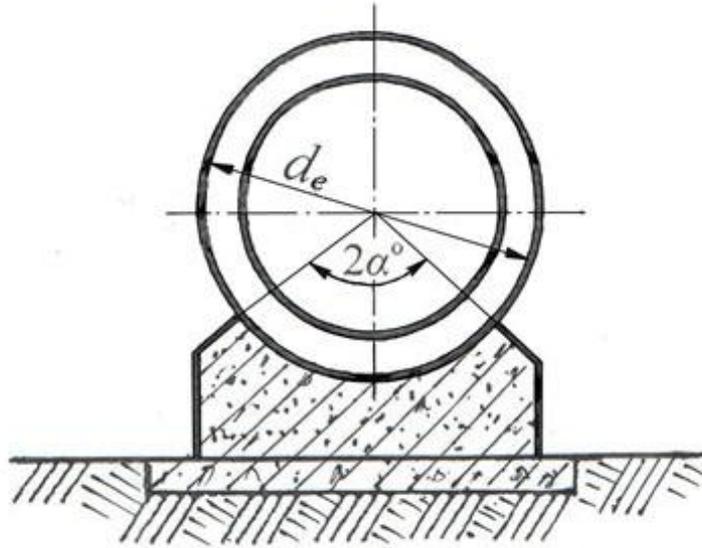
Рисунок В.2 – Укладка труб  $d_i \geq 600$  мм без подошвы на грунтовое профилированное основание



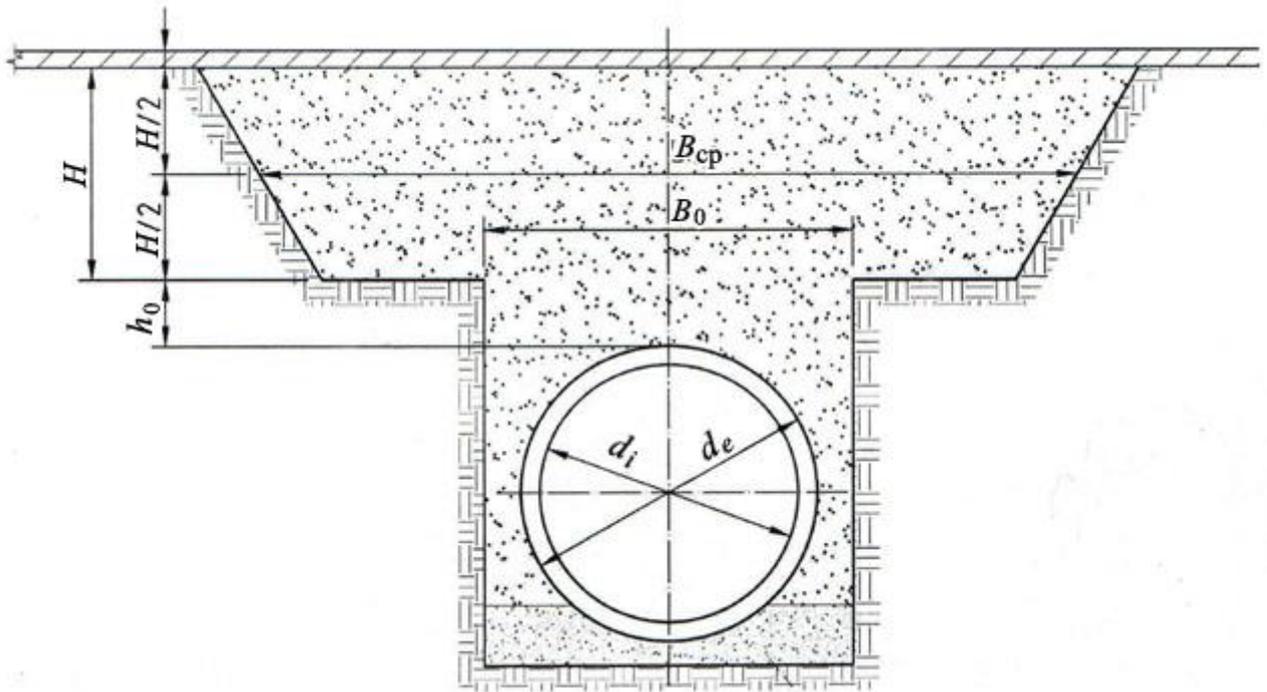
**Рисунок В.3 – Укладка труб в насыпь на грунтовое профилированное основание**



**Рисунок В.4 – Укладка труб с подошвой на плоское грунтовое основание**



**Рисунок В.5 – Укладка труб на железобетонный фундамент с выкружкой**

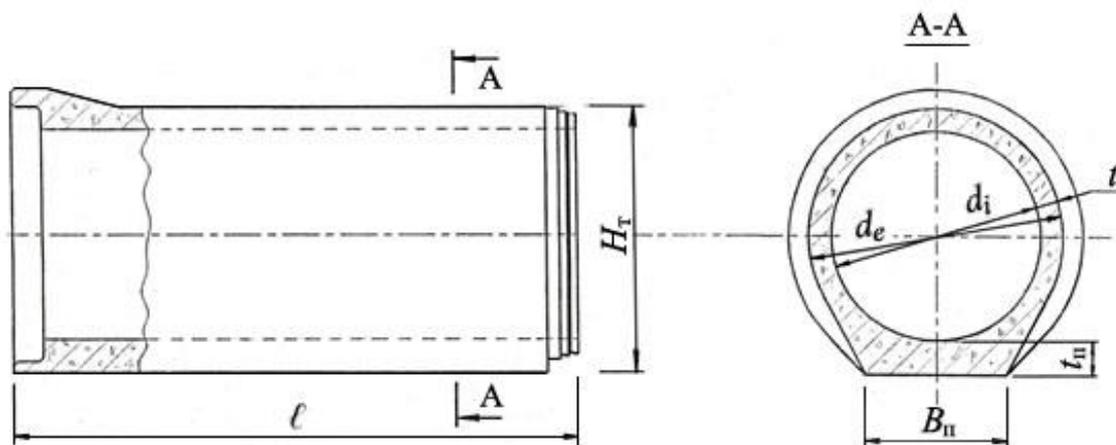


**Рисунок В.6 – Укладка труб в прорезь на песчаную подушку**

## Приложение Г

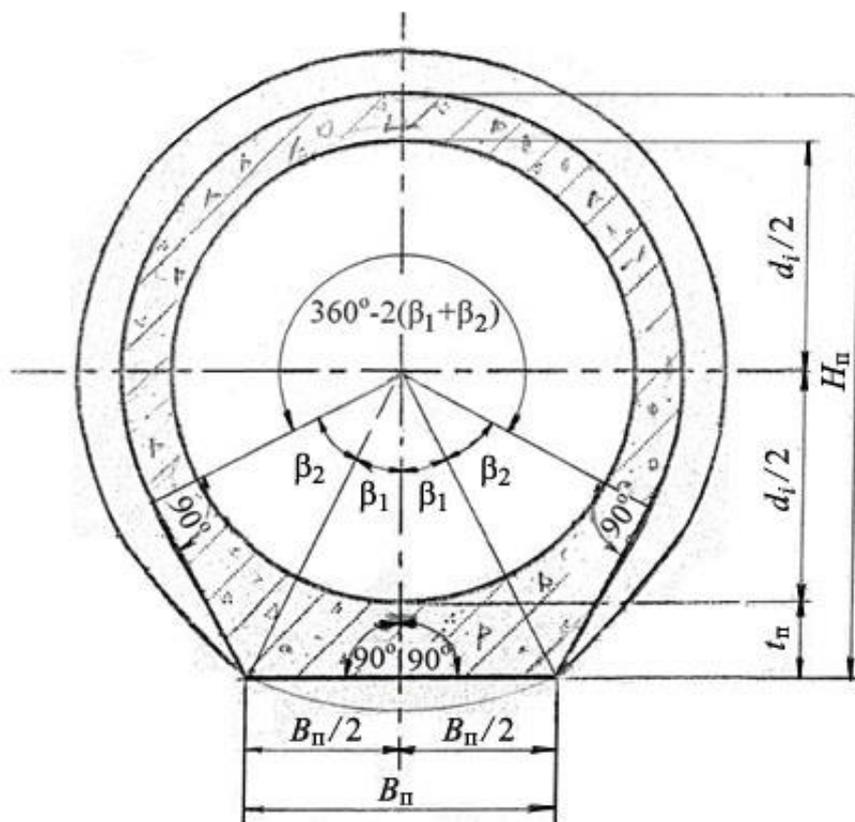
### Геометрические параметры и армирование труб с плоской подошвой

Г.1 Основные геометрические параметры трубы с плоской подошвой приведены на рисунке Г.1.



*Рисунок Г.1 – Основные геометрические параметры трубы с подошвой*

Г.2 Расчетная схема для определения площади поперечного сечения цилиндрической части трубы с подошвой приведена на рисунке Г.2.



*Рисунок Г.2 – Схема для расчета площади поперечного сечения трубы с подошвой*

Г.3 При расчетах площади поперечного сечения трубы рекомендуется предварительно принимать значение угла  $\beta_1 = 30^\circ$ , а толщину подошвы вычислять по формулам, м:

$$\text{- для труб } d_e < 2,0 \text{ м} - t_{\text{п}} = t + 0,05; \quad (\text{Г.1})$$

$$\text{- для труб } d_e \geq 2,0 \text{ м} - t_{\text{п}} = t + 0,03, \quad (\text{Г.1a})$$

где  $t$  – толщина стенки трубы в основной цилиндрической части, равная

$$t = 0,5 (d_e - d_i). \quad (\text{Г.2})$$

Г.4 Ширина подошвы трубы вычисляется по формуле

$$B_{\text{п}} = 2 (0,5d_i + t_{\text{п}}) \text{tg } \beta_1. \quad (\text{Г.3})$$

Г.5 Сопряженный с углом  $\beta_1$  угол  $\beta_2$  вычисляется по формуле

$$\beta_2 = \arccos \left( \frac{d_e}{B_{\text{п}}} \sin \beta_1 \right). \quad (\text{Г.4})$$

Г.6 Расчетная высота трубы вычисляется по формуле

$$H_{\text{т}} = t_{\text{п}} + 0,5 (d_i + d_e). \quad (\text{Г.5})$$

Г.7 Площадь поперечного сечения трубы с подошвой определяется по формуле

$$S_{\text{т}} = S_{\text{ц}} + 2(S_1 + S_2) - S_{\text{сек}}, \quad (\text{Г.6})$$

где  $S_{\text{ц}}$  – площадь поперечного сечения цилиндрической части трубы, вычисляемая по формуле

$$S_{\text{ц}} = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \frac{360^\circ - \alpha}{360^\circ}, \quad (\text{Г.7})$$

$$\alpha = 2(\beta_1 + \beta_2); \quad (\text{Г.8})$$

$S_1$  – площадь прямоугольного треугольника с катетами, равными  $0,5B_{\text{п}}$  и  $0,5d_i + t_{\text{п}}$ , вычисляемая по формуле

$$S_1 = 0,5 (0,5d_i + t_{\text{п}})^2 \text{tg } \beta_1; \quad (\text{Г.9})$$

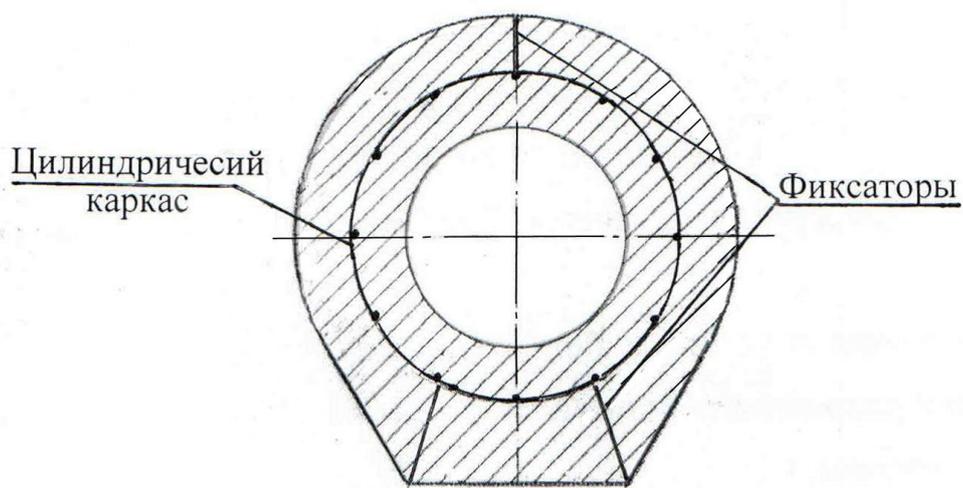
$S_2$  – площадь прямоугольного треугольника с катетами, равными  $0,5d_e$  и  $0,5d_e \text{tg } \beta_2$ , вычисляемая по формуле

$$S_2 = 0,125d_e^2 \text{tg } \beta_2; \quad (\text{Г.10})$$

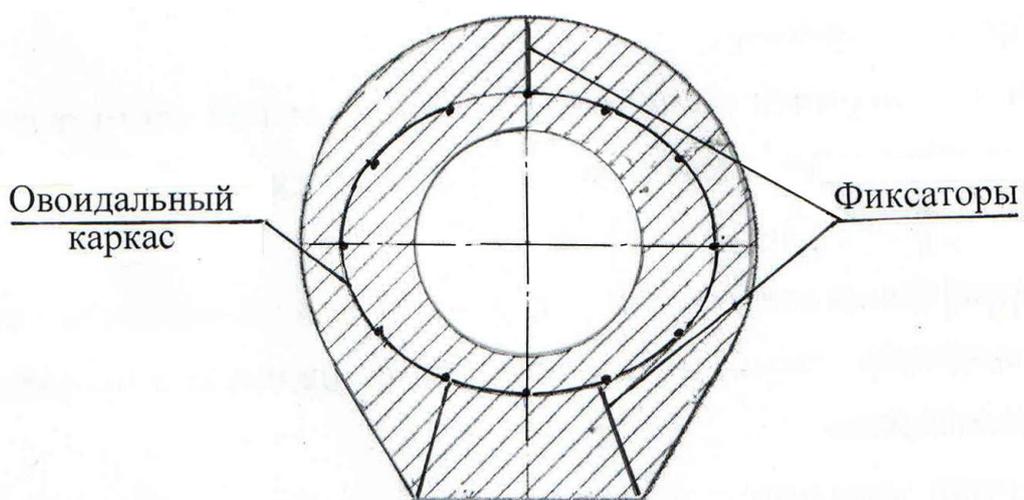
$S_{\text{сек}}$  – площадь сектора, образованного внутренним диаметром трубы  $d_i$  с углом  $\alpha$ , вычисляемая по формуле

$$S_{\text{сек}} = \frac{\pi d_i^2}{4} \left( \frac{\alpha}{360^\circ} \right). \quad (\text{Г.11})$$

Г.8 Схемы армирования одинарным каркасом железобетонных труб с плоской подошвой и его фиксации приведены на рисунках Г.3 и Г.4. При этом на рисунке Г.3 показано армирование цилиндрическим каркасом, а на рисунке Г.4 – овоидальным каркасом с их фиксацией в форме для изготовления труб с плоской подошвой.

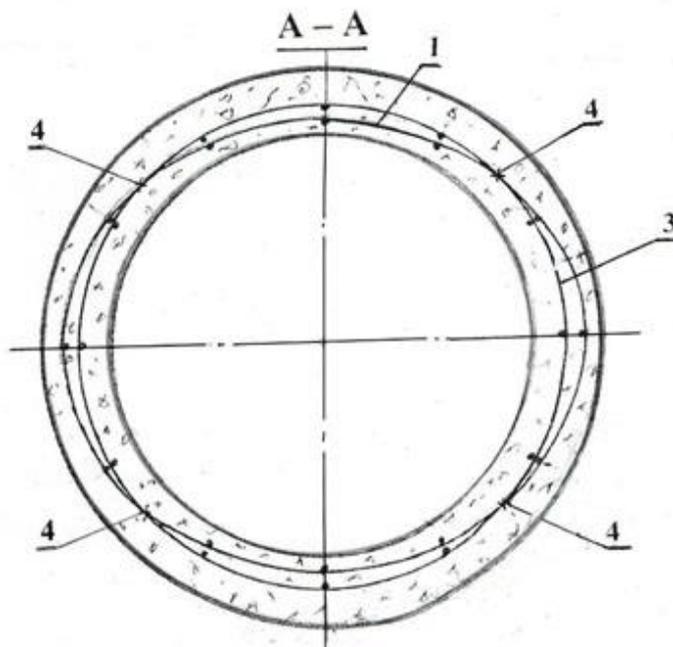
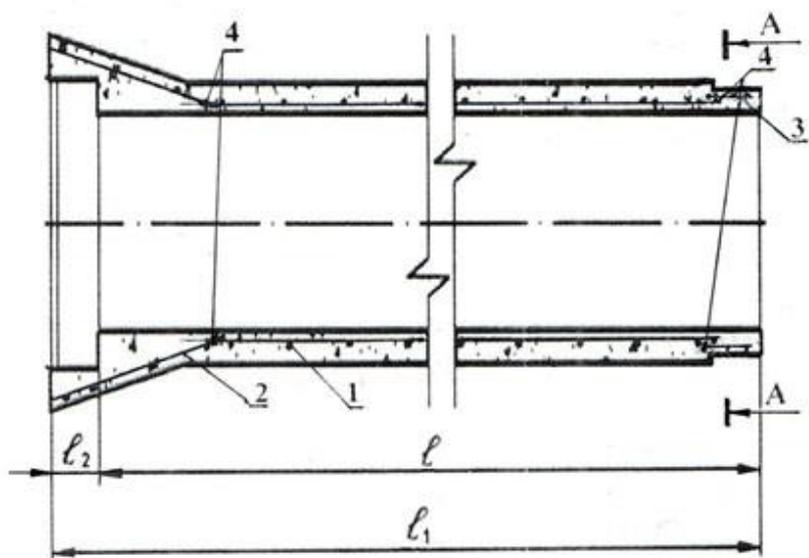


**Рисунок Г.3 – Схема размещения и фиксации цилиндрического арматурного каркаса в форме**



**Рисунок Г.4 – Схема размещения и фиксации овоидального арматурного каркаса в форме**

Г.9 Конструкция составного арматурного каркаса, состоящего из основного – овоидального каркаса, размещаемого в средней цилиндрической части трубы, а также конического (для армирования раструба трубы) и цилиндрического (для армирования втулочной части трубы) приведена на рисунке Г.5.

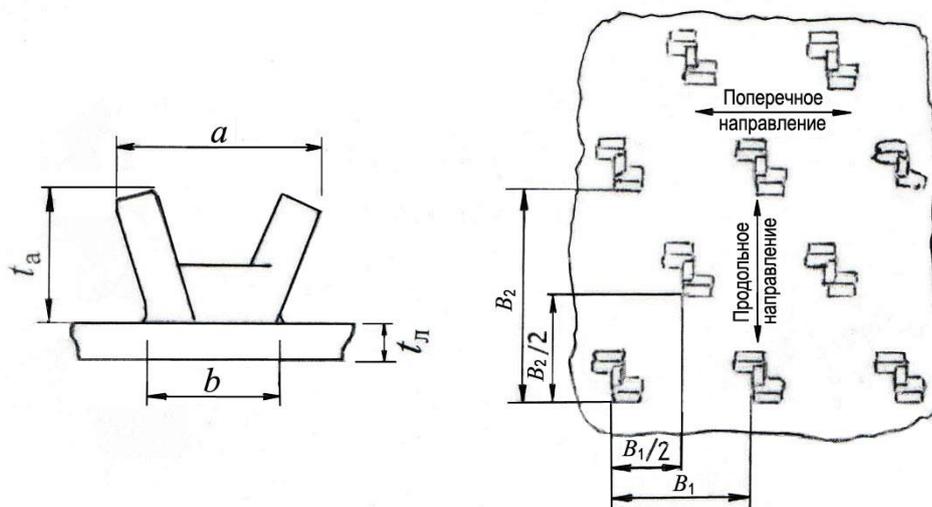


1 – овоидальный каркас; 2 – конический раструбный каркас;  
3 – цилиндрический втулочный каркас; 4 – места сочленения каркасов

**Рисунок Г.5 – Конструкция составного арматурного каркаса**

## Приложение Д Конструкция и размеры полимерных листов для футеровки труб

### Д.1 Листы с анкерами типа V-LOCK [1]



$t_{л}$  – толщина листа,  $B_1$  и  $B_2$  – шаги анкеров в поперечном и продольном направлениях,  $t_a$ ,  $a$  и  $b$  – размеры головки

**Рисунок Д.1 – Лист полимерный анкерный типа V-LOCK**

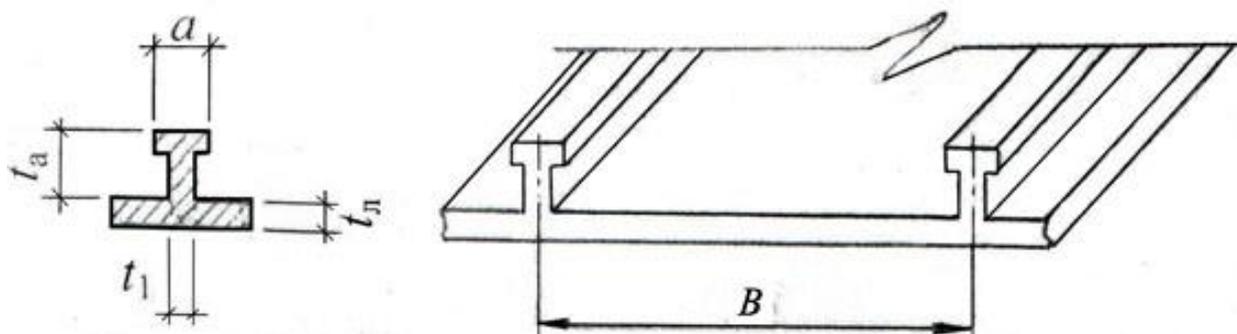
Таблица Д.1 – Размеры листов типа V-LOCK

$t_{л}$ , мм ( $\pm 10\%$ )	$B_1$ , мм	$B_2$ , мм	$t_a$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	Ширина листа, м ( $\pm 1\%$ )	Длина листа, м ( $\pm 1\%$ )	Вес* 1 м <sup>2</sup> , кг ( $\pm 10\%$ )
4,0	60 $\pm$ 1,0	84 $\pm$ 1,0	13 $\pm$ 0,5	21 $\pm$ 0,5	16 $\pm$ 0,5	2,0	3,0	4,4
5,0								5,5
6,0								6,7

\*Справочные данные.

Примечание – По согласованию с заказчиком допускается изготовление листов другой длины.

### Д.2 Листы с анкерами типа T-LOCK [1]



$t_{л}$  – толщина листа,  $t_1$  – толщина ножки анкерного ребра,  $B$  – шаг анкерных ребер,  $t_a$  – высота анкерных ребер,  $a$  – ширина головки анкерных ребер

**Рисунок Д.2 – Лист полимерный анкерный типа T-LOCK**

Таблица Д.2 – Размеры листов типа T-LOCK

$t_l$ , мм ( $\pm 10\%$ )	$t_1$ , мм	$B$ , мм	$t_a$ , мм	$a$ , мм	Ширина листа, м ( $\pm 1\%$ )	Длина листа, м ( $\pm 1\%$ )	Вес* 1 м <sup>2</sup> , кг ( $\pm 10\%$ )
4,0	3,8 $\pm$ 0,5	63,5 $\pm$ 1,0	9,5 $\pm$ 1,0	9,0 $\pm$ 0,5	0,75; 1,0	3,0	4,4
5,0	4,0 $\pm$ 0,5	28,0 $\pm$ 1,0	14,0 $\pm$ 1,0	4,0 $\pm$ 0,5	1,5; 2,0	3,0	7,1
*Справочные данные. Примечание – По согласованию с заказчиком допускается изготовление листов другой длины.							

## Приложение Е

### Пример расчета бетонной трубы

*Исходные данные.* Бетонная труба диаметром условного прохода  $d_i = 600 \text{ мм} = 0,6 \text{ м}$  с плоской подошвой, укладываемая в траншею с высотой засыпки  $H = 2,2 \text{ м}$  грунтом из суглинка (группа Г-III). Труба укладывается на утрамбованный грунт для безнапорного трубопровода ливневой канализации, расположенного выше уровня грунтовых вод.

*Требуется:* подобрать толщину стенки трубы  $t$ , определить минимальный класс прочности бетона на растяжение и контрольную испытательную нагрузку.

#### Е.1 Уточнение геометрических параметров трубы и ее положения в траншее

##### Е.1.1 Расчет геометрических параметров трубы

Согласно рекомендациям 6.1.3 определяем исходную для расчета толщину стенки трубы  $t = 0,17d_i = 0,17 \cdot 600 = 102 \text{ мм}$ . Принимаем ближайшую нормированную толщину стенки трубы  $t = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$ .

Используя схему укладки трубы, приведенную на рисунке В.4, вычисляем:

- наружный диаметр трубы  $d_e = d_i + 2t = 600 + 2 \cdot 100 = 800 \text{ мм} = 0,8 \text{ м}$ ;

- средний диаметр трубы  $d_{cp} = 0,5(d_i + d_e) = 0,5(600 + 800) = 700 \text{ мм} = 0,7 \text{ м}$ ;

- средний радиус трубы  $r_{cp} = 0,5d_{cp} = 0,5 \cdot 700 = 350 \text{ мм} = 0,35 \text{ м}$ .

Высоту подошвы определяем по формуле (Г.1)

$$t_{\text{п}} = t + 0,05 = 0,1 + 0,05 = 0,15 \text{ м}.$$

Расчетную высоту трубы (над подошвой) определяем по формуле (Г.5)

$$H_{\text{т}} = d_e + 0,05 = 0,8 + 0,05 = 0,85 \text{ м}.$$

Согласно рекомендациям Г.3 принимаем значение угла  $\beta_1 = 30^\circ$ , ( $\sin \beta_1 = 0,5$ ;  $\text{tg } \beta_1 = 0,577$ ).

По формуле (Г.3) определяем ширину подошвы трубы

$$B_{\text{п}} = 2(0,5d_i + t_{\text{п}}) \text{tg } \beta_1 = 2(0,5 \cdot 0,6 + 0,15) \cdot 0,577 = 0,519 \text{ м}.$$

По формуле (Г.4) рассчитываем величину угла  $\beta_2$

$$\beta_2 = \arccos \left( \frac{d_e \sin \beta_1}{B_{\text{п}}} \right) = \arccos \left( \frac{0,8}{0,519} \sin 30^\circ \right) = 39,5^\circ,$$

$$\text{tg } \beta_2 = \text{tg } 39,5^\circ = 0,824.$$

По формуле (Г.8) определяем угол  $\alpha$

$$\alpha = 2(\beta_1 + \beta_2) = 2(30^\circ + 39,5^\circ) = 139^\circ.$$

Для определения расчетной площади поперечного сечения трубы по формуле (Г.6) вычисляем:

- площадь цилиндрической части трубы  $S_{\text{ц}}$  по формуле (Г.7)

$$S_{\text{ц}} = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \frac{360^\circ - \alpha}{360^\circ} = \frac{3,14}{4} (0,8^2 - 0,6^2) \frac{360^\circ - 139^\circ}{360^\circ} = 0,135 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_1$  по формуле (Г.9)

$$S_1 = 0,5(0,5d_i + t_n)^2 \operatorname{tg} \beta_1 = 0,5(0,5 \cdot 0,6 + 0,15)^2 \cdot 0,577 = 0,058 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_2$  по формуле (Г.10)

$$S_2 = 0,125d_e^2 \operatorname{tg} \beta_2 = 0,125 \cdot 0,8^2 \cdot 0,824 = 0,066 \text{ м}^2;$$

- площадь сектора  $S_{\text{сек}}$  по формуле (Г.11)

$$S_{\text{сек}} = \frac{\pi d_i^2}{4} \left( \frac{\alpha}{360^\circ} \right) = \frac{\pi \cdot 0,6^2 \cdot 139^\circ}{4 \cdot 360^\circ} = 0,109 \text{ м}^2.$$

По формуле (Г.2) определяем расчетную площадь поперечного сечения трубы

$$S_{\text{т}} = S_{\text{ц}} + 2(S_1 + S_2) - S_{\text{сек}} = 0,135 + 2(0,058 + 0,066) - 0,109 = 0,274 \text{ м}^2.$$

### Е.1.2 Расчет параметров положения трубы в траншее

Для расчета используются условия укладки трубы по рисунку В.4.

Высота засыпки грунта до верха трубы  $H = 2,2$  м.

Расчетная ширина основания траншеи (см. пункт 7.4.4)

$$B_1 = d_e + 0,6 = 0,8 + 0,6 = 1,4 \text{ м.}$$

Ширина траншеи на уровне верха трубы при  $m_{\text{от}} = 1:0,75$  (для суглинка по таблице 6)

$$B = B_1 + 2H_{\text{т}} m_{\text{от}} = 1,4 + 2 \cdot 0,85 \cdot 0,75 = 2,675 \text{ м.}$$

Ширина верха траншеи составит

$$B_{\text{в}} = B_1 + 2(H + H_{\text{т}}) m_{\text{от}} = 1,4 + 2(2,2 + 0,85) \cdot 0,75 = 5,975 \text{ м.}$$

Средняя ширина траншеи над верхом трубы составит

$$B_{\text{ср}} = 0,5(B + B_{\text{в}}) = 0,5(2,675 + 5,975) = 4,325 \text{ м.}$$

### Е.2 Расчет нагрузок на трубу

Е.2.1 Расчет нагрузок на трубу проводим при наиболее неблагоприятном их сочетании и наибольших значениях вертикальных нагрузок, в частности, с учетом транспортной нагрузки класса Н11, и без учета горизонтальных нагрузок, разгружающих трубу.

#### Е.2.2 Определение вертикальной нагрузки от грунта

Е.2.2.1 Вычисляем соотношение  $H/B_{\text{ср}} = 2,2/4,325 = 0,509$ .

Е.2.2.2 По данным таблицы 6 для  $H/B_{\text{ср}} = 0,705$  находим значение  $k_{\text{тр}} = 0,92$ .

Е.2.2.3 Для определения коэффициента  $\psi$  находим из формулы (9) жесткость грунта засыпки, приняв  $E_{\text{гр}} = 2,2$  МПа по таблице 4

$$P_{\text{гр}} = 1,25 \cdot 2,2 = 2,75 \text{ МПа.}$$

По формуле (10) с учетом  $E_b = 32500$  МПа и  $\nu_b = 0,2$  (согласно СП 63.13330) находим приведенную жесткость трубы

$$P_{\text{л}} = \frac{E_b}{4(1-\nu_b^2)} \left( \frac{t}{r_{\text{сп}}} \right)^3 = \frac{32500}{4(1-0,2^2)} \left( \frac{0,1}{0,35} \right)^3 = 197,4 \text{ МПа.}$$

Е.2.2.4 По формуле (8) находим коэффициент нагрузки трубы грунтом

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{2P_{\text{гр}}(B-d_e)}{P_{\text{л}}H_{\text{T}}}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 2,75(2,675-0,8)}{197,4 \cdot 0,85}} = 0,942 .$$

Так как  $\psi = 0,942 > d_e/B = \frac{0,8}{2,675} = 0,3$ , то для определения расчетной вертикальной нагрузки используем  $\psi=0,942$ .

Е.2.2.5 Учитывая, что  $H/d_e = 2,2/0,8=2,75 > 2,5$ , по таблице 7 принимаем  $k_{\text{н}}=1,4$ .

Е.2.2.6 Так как условие по 7.4.9

$$Bk_{\text{тр}}\psi = 2,675 \cdot 0,92 \cdot 0,942 = 2,32 \geq d_e k_{\text{н}} = 0,8 \cdot 1,4 = 1,12$$

выполняется, то расчетное вертикальное давление грунта вычисляем по формуле (6)

$$Q_{\text{г}} = \gamma_{\text{г}} \rho_{\text{гр}} H d_e k_{\text{н}} = 1,15 \cdot 17,7 \cdot 2,2 \cdot 0,8 \cdot 1,4 = 50,15 \text{ кН/м.}$$

### Е.2.3 Определение вертикальной нагрузки от собственного веса трубы

Е.2.3.1 Расчетную нагрузку от собственного веса трубы вычисляем по формуле (3)

$$Q_{\text{св}} = \gamma_{\text{св}} S_{\text{T}} \rho_b = 1,1 \cdot 0,274 \cdot 23,54 = 7,09 \text{ кН/м.}$$

### Е.2.4 Определение вертикальной нагрузки от веса транспортируемой жидкости

Е.2.4.1 По формуле (19) определяем расчетную вертикальную нагрузку от веса транспортируемой жидкости

$$Q_{\text{ж}} = 8,98 d_i^2 = 8,98 \cdot 0,6^2 = 3,24 \text{ кН/м.}$$

### Е.2.5 Определение вертикальной нагрузки от автотранспортных средств

Е.2.5.1 По формуле (22) определяем удельную нормативную нагрузку от колесных транспортных средств класса Н11

$$p_{\text{т(в)}} = \frac{186}{3+H} = \frac{186}{3+2,2} = 35,77 \text{ кН/м}^2.$$

Е.2.5.3 По формуле (23) определяем (при  $\mu=1$ ) расчетную вертикальную транспортную нагрузку:

$$Q_{\text{т}} = \gamma_{\text{т}} \mu p_{\text{т(в)}} d_e k_{\text{н}} = 1,3 \cdot 1 \cdot 35,77 \cdot 0,8 \cdot 1,4 = 52,08 \text{ кН/м.}$$

### Е.3 Определение расчетной вертикальной эквивалентной нагрузки

Е.3.1 Согласно таблице 9 при нормальном уплотнении грунта коэффициент  $\eta = 0,95$ . По таблице 11 для плоского уплотненного грунтового основания принимаем  $\beta = 0,4$  и  $\beta_1 = 0,25$ .

Е.3.2 Определяем расчетную вертикальную эквивалентную нагрузку в лотке и шельге трубы по формуле (25)

$$P_{\text{эkv}} = \eta \left[ (Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma})\beta + (Q_{\text{св}} + Q_{\text{ж}})\beta_1 \right] = \\ = 0,95 \left[ (35,77 + 52,08)0,4 + (7,09 + 3,24)0,25 \right] = 35,84 \text{ кН/м};$$

### Е.4. Определение расчетного изгибающего момента от вертикальных нагрузок

Е.4.1 По формуле (26) определяем расчетный изгибающий момент в лотке и шельге трубы

$$M_A = M_B = 0,318 P_{\text{эkv}} r_{\text{ср}} = 0,318 \cdot 35,84 \cdot 0,35 = 3,99 \text{ кНм/м}.$$

Е.4.2 По формуле (30) определяем момент сопротивления для крайнего растянутого волокна в шельге для элемента стенки трубы размерами  $b = 1,0$  м и  $t = 0,1$  м

$$W = \frac{bt^2}{3,5} = \frac{1 \cdot 0,1^2}{3,5} = 0,00286 \text{ м}^3.$$

Е.4.3 По преобразованной формуле (29) определяем величину сопротивления бетона растяжению, необходимую для восприятия расчетного изгибающего момента

$$\frac{M_{\text{ult}}}{0,9W} = \frac{3,99}{0,9 \cdot 0,00167} = 2654 \text{ кН/м}^2 \approx 2,65 \text{ МПа}.$$

Е.4.4 Согласно таблице 1 расчетное сопротивление бетона растяжению обеспечивается при применении бетона класса  $B_t 3,6$ , для которого  $R_{bt} = 2,80 > 2,65$  МПа.

### Е.5 Определение контрольной нагрузки при испытании трубы на прочность

По формуле (86) определяем контрольную нагрузку при испытании трубы на прочность без учета ее веса при  $C_b = 1,6$

$$P_{\text{и}}^{\text{пр}} = C \eta \left[ (Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma})\beta + Q_{\text{ж}}\beta_1 \right] = \\ = 1,6 \cdot 0,95 \left[ (35,77 + 52,08)0,4 + 3,24 \cdot 0,25 \right] = 54,64 \text{ кН/м}.$$

## Приложение Ж

### Примеры расчета железобетонных труб для открытой укладки

#### Ж.1 Труба с одинарным каркасом

*Исходные данные.* Железобетонная труба диаметром условного прохода  $d_i = 600$  мм = 0,6 м без подошвы с толщиной цилиндрической части  $t = 65$  мм, 3-й группы по несущей способности, армированная одинарным спиральным каркасом. Труба укладывается на грунтовое из супеси (группа Г-III) профилированное основание с углом охвата  $2\alpha^\circ = 90^\circ$  и используется для трубопровода транспортирующего слабоагрессивные жидкости. Трубопровод расположен выше уровня грунтовых вод.

*Требуется:* рассчитать армирование (тип и диаметр арматурной проволоки, шаг спирали и диаметр арматурного каркаса), определить контрольные нагрузки и проверить ширину раскрытия трещин при контрольной нагрузке.

#### Ж.1.1 Уточнение исходных данных

##### Ж.1.1.1 Геометрические параметры трубы

Вычисляем:

- наружный диаметр трубы  $d_e = d_i + 2t = 600 + 2 \cdot 65 = 730$  мм = 0,73 м;
- средний диаметр трубы  $d_{cp} = 0,5(d_i + d_e) = 0,5(600 + 730) = 665$  мм = 0,665 м;
- средний радиус трубы  $r_{cp} = 0,5d_{cp} = 0,5 \cdot 665 = 332,5$  мм = 0,3325 м.

##### Ж.1.1.2 Геометрические параметры положения трубы в траншее

Для расчетов принимаем условия укладки трубы по рисунку В.2.

Высота засыпки грунта до верха трубы  $H = 6$  м (для 3-й группы по несущей способности).

Расчетная ширина основания траншеи

$$B_1 = d_e + 0,6 = 0,73 + 0,6 = 1,33 \text{ м.}$$

Согласно 7.4.6 для  $\alpha = 45^\circ$  коэффициент выступа трубы  $\chi = 0,854$ .

Ширину траншеи на уровне верха трубы при  $m_{от}^{-1} = 0,5$  (для супеси по таблице 5), определяем по формуле (4)

$$B = B_1 + 2d_e\chi m_{от}^{-1} = 1,33 + 2 \cdot 0,73 \cdot 0,854 \cdot 0,5 = 1,95 \text{ м.}$$

Ширина верха траншеи составит

$$B_B = B_1 + 2 m^{-1}(H + \chi d_e) = 1,33 + 2 \cdot 0,5(6 + 0,854 \cdot 0,73) = 7,95 \text{ м.}$$

Средняя ширина траншеи над верхом трубы

$$B_{cp} = 0,5(B + B_B) = 0,5(1,95 + 7,95) = 4,95 \text{ м.}$$

#### Ж.1.2 Расчет нагрузок на трубу

Ж.1.2.1 Расчет нагрузок на трубу проводим при наиболее неблагоприятном их сочетании и наибольших значениях вертикальных нагрузок, в частности, с учетом транспортной нагрузки класса Н11 и без учета горизонтальных разгружающих трубу нагрузок.

### Ж.1.2.2 Определение вертикальной нагрузки от грунта

Ж.1.2.2.1 Вычисляем соотношение  $H/B_{cp} = 6,0/4,95 = 1,21$ .

Ж.1.2.2.2 С учетом данных таблицы 6 для  $H/B_{cp} = 1,21$  находим значение  $k_{гр}=0,839$ .

Ж.1.2.2.3 Для определения коэффициента  $\psi$  находим из формулы (9) жесткость грунта засыпки, приняв по таблице 4  $E_{гр}=2,2$  МПа

$$P_{гр} = 1,25 \cdot E_{гр} = 1,25 \cdot 2,2 = 2,75 \text{ МПа.}$$

По формуле (10) с учетом  $E_b = 32500$  МПа и  $\nu_b = 0,2$  находим приведенную жесткость железобетонной трубы

$$P_{п} = \frac{E_b}{4(1-\nu_b^2)} \left( \frac{t}{r_{cp}} \right)^3 = \frac{32500}{4(1-0,2^2)} \left( \frac{0,065}{0,3325} \right)^3 = 63,22 \text{ МПа.}$$

Ж.1.2.2.4 По формуле (8) находим коэффициент разгрузки трубы грунтом

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{P_{гр}(B-d_e)}{P_{п}\chi d_e}} = \frac{1}{1 + \frac{2,75(1,95-0,73)}{63,22 \cdot 0,854 \cdot 0,73}} = 0,919.$$

Так как  $\psi = 0,919 > d_e/B = \frac{0,73}{1,95} = 0,374$ , то для определения расчетной вертикальной нагрузки используем  $\psi = 0,919$ .

Ж.1.2.2.5 Так как  $H/d_e = 6/0,73 = 8,2 > 2,5$ , то принимаем по таблице 7  $k_{н}=1,45$ .

Ж.1.2.2.6 Проверяем условие по 7.4.9

$$Bk_{гр}\psi = 1,95 \cdot 0,854 \cdot 0,919 = 1,53 \geq d_e k_{н} = 0,73 \cdot 1,45 = 1,06.$$

Следовательно, для расчета вертикальной нагрузки на трубу от грунта необходимо использовать формулу (6).

Ж.1.2.2.7 По формуле (6) определяем при  $n_{г} = 1,15$  и  $\rho_{гр} = 17,7$  кН/м<sup>3</sup> расчетную вертикальную нагрузку от давления грунта на 1 пог. м трубы

$$Q_{г} = \gamma_{г}\rho_{гр}Hd_e k_{н} = 1,15 \cdot 17,7 \cdot 6,0 \cdot 0,73 \cdot 1,45 = 129,27 \text{ кН/м.}$$

### Ж.1.2.3 Определение вертикальной нагрузки от собственного веса трубы

По формуле (2) определяем расчетную вертикальную нагрузку от собственного веса железобетонной трубы без подошвы:

$$Q_{св} = 0,864 \rho_b (d_e^2 - d_i^2) = 0,864 \cdot 24,53 (0,73^2 - 0,6^2) = 3,66 \text{ кН/м.}$$

### Ж.1.2.4 Определение вертикальной нагрузки от веса транспортируемой жидкости

По формуле (18) определяем расчетную нагрузку от веса транспортируемой жидкости

$$Q_{ж} = 8,98d_i^2 = 8,98 \cdot 0,6^2 = 3,23 \text{ кН/м.}$$

### Ж.1.2.5 Расчет нагрузки от вертикального давления транспортных средств

По формуле (22) определяем удельную нормативную нагрузку от колесных транспортных средств для класса Н11

$$p_{т(в)} = \frac{186}{3 + H_{np}} = \frac{186}{3 + 6,0} = 20,67 \text{ кН/м.}$$

По формуле (23) определяем (при  $\mu = 1$ ) расчетную вертикальную транспортную нагрузку

$$Q_{т(в)} = \gamma_{т} \mu p_{т(в)} d_e k_n = 1,3 \cdot 1 \cdot 20,67 \cdot 0,73 \cdot 1,45 = 28,44 \text{ кН/м.}$$

### Ж.1.3 Определение расчетной вертикальной эквивалентной нагрузки

Ж.1.3.1 По таблице 9 при нормальном уплотнении грунта группы Г-III принимаем коэффициент  $\eta = 0,95$ . По таблице 11 используем для расчета коэффициенты  $\beta = 0,5$  и  $\beta_1 = 0,32$ .

Ж.1.3.2 По формуле (25) определяем расчетную вертикальную эквивалентную нагрузку

$$\begin{aligned} P_{э\text{кв}} &= \eta \left[ (Q_{г(в)} + Q_{т(в)}) \beta + (Q_{св} + Q_{ж}) \beta_1 \right] = \\ &= 0,95 \left[ (129,27 + 28,44) 0,5 + (3,66 + 3,23) 0,32 \right] = 77,0 \text{ кН/м.} \end{aligned}$$

### Ж.1.4 Определение расчетного изгибающего момента в вертикальном поперечном сечении трубы

Расчетный изгибающий момент в вертикальном сечении (лотке) трубы с учетом его перераспределения и трещинообразования определяем по формуле (28)

$$M_A = 0,25 P_{э\text{кв}} r_{ср} = 0,25 \cdot 77,0 \cdot 0,3325 = 6,4 \text{ кНм.}$$

### Ж.1.5 Расчет и подбор спирального армирования трубы

Ж.1.5.1 По формуле (59) при  $R_{b,ser} = 22$  МПа (для бетона класса В30) рассчитываем  $h_0$

$$\begin{aligned} h_0 &= 0,568t + \sqrt{0,004624t^2 - \frac{36,99M_A}{bR_{b,ser}}} = \\ &= 0,568 \cdot 65 + \sqrt{0,004624 \cdot 65^2 - \frac{36,99 \cdot 6400}{1000 \cdot 22}} = 36,92 + 4,42 = 41,34 \approx 40 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Ж.1.5.2 Принимаем для спирального армирования проволоку диаметром  $d_s = 6$  мм класса В500 и проверяем по формуле (58) толщину бетонного защитного слоя от внутренней поверхности до спиральной арматуры

$$h_{зс} = t - (h_0 + 0,5d_s) = 65 - (40 + 0,5 \cdot 6) = 22 \leq h_{зс, \text{min}} = 22 \text{ мм.}$$

Условие (58) удовлетворяется.

Ж.1.5.3 Определяем по формуле (61) диаметр арматурного каркаса

$$d_{ак} = 2(0,5d_e - h_0) = 2(0,5 \cdot 730 - 40) = 650 \text{ мм.}$$

Ж.1.5.4 Принимаем класс бетона В30 ( $R_{b,n} = 22$  МПа) и по формуле (60) вычисляем высоту сжатой зоны стенки трубы

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2000M_A}{bR_{b,n}}} = 40 - \sqrt{40^2 - \frac{2000 \cdot 6400}{1000 \cdot 22}} = 8,1 \text{ мм.}$$

Проверяем условие пункта 10.1.1 по соотношению  $x_0$  и  $h_0$ :

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{8,1}{40} = 0,203 < 0,5.$$

Условие удовлетворяется.

Ж.1.5.5 По формуле (62) находим минимальную требуемую площадь поперечного сечения спиральной арматуры класса В500 с  $R_{s,ser} = 500$  МПа в стенке трубы на 1 пог.м

$$A_{s,трреб} = \frac{xbR_{b,ser}}{\gamma_{b1}R_{s,ser}} = \frac{8,1 \cdot 1000 \cdot 22}{0,9 \cdot 500} = 396 \text{ мм}^2/\text{м.}$$

Ж.1.5.6 По формуле (63) находим шаг спиральной арматуры ( $d_s = 6$  мм)

$$m \leq \frac{785d_s^2}{A_{s,трреб}} = \frac{785 \cdot 6^2}{396} = 71,36 \text{ мм,}$$

принимаем  $m_\phi = 65$  мм  $< m = 68,98$  мм.

Ж.1.5.7 Фактическую площадь поперечного сечения спиральной арматуры в стенке 1 пог.м трубы вычисляем по формуле (62)

$$A_s^\phi = 396 \frac{71,36}{65} = 434,8 \text{ мм}^2/\text{м.}$$

### Ж.1.6 Подбор продольного армирования

Согласно таблице 13 для продольного армирования должны быть использованы 9 или 12 стержней (в зависимости от конструкции арматурно-сварочного станка) из стали класса А240 диаметром  $d_s = 6$  мм.

### Ж.1.7 Расчет контрольных и испытательных нагрузок

Ж.1.7.1 По формуле (85) при  $C_{жб} = 1,3$  определяем контрольную вертикальную нагрузку по прочности трубы

$$P_k^{пр} = C_{жб} P_{экр} = 1,3 \cdot 77,0 = 100,1 \text{ кН/м.}$$

Ж.1.7.2 По формуле (87) рассчитываем контрольную вертикальную нагрузку по трещиностойкости трубы

$$P_k^{тр} = 0,55 P_k^{пр} = 0,55 \cdot 100,1 = 55,06 \text{ кН/м.}$$

Ж.1.7.3 По формуле (86) определяем вертикальную нагрузку для испытаний на прочность трубы без учета ее собственного веса

$$P_{и}^{пр} = C_{ж\delta} \eta \left[ \beta(Q_{г} + Q_{т}) + \beta_1 Q_{ж} \right] =$$

$$= 1,3 \cdot 0,95 \left[ 0,5(129,27 + 28,44) + 0,32 \cdot 2,94 \right] = 98,55 \text{ кН/м.}$$

Ж.1.7.4 По формуле (88) находим испытательную нагрузку для контроля трещиностойкости трубы

$$P_{и}^{тр} = 0,55 P_{и}^{пр} = 0,55 \cdot 98,55 = 54,2 \text{ кН/м.}$$

### Ж.1.8 Проверка величины раскрытия трещин

Ж.1.8.1 По формуле (51) находим напряжение в спиральной арматуре при образовании трещин в бетоне

$$\sigma_s = \frac{M_A}{\left( h_0 - \frac{x}{3} \right) A_s^\phi} = \frac{6,4 \cdot 10^6}{\left( 40 - \frac{8,1}{3} \right) 434,8} = 394,5 \text{ МПа.}$$

Ж.1.8.3 Условие (52) соблюдается, т.к.  $\sigma_s = 394,5 < R_{s,n} = 500$  МПа.

Ж.1.8.4 По формуле (53) находим расчетную площадь сечения растянутого бетона

$$A_{bt} = 1000(t - x) = 1000(65 - 8,1) = 56900 \text{ мм}^2/\text{м.}$$

Ж.1.8.5 По формуле (54) находим значение базового расстояния между трещинами

$$l_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s = 0,5 \frac{56900 \cdot 6}{434,8} = 392,6 \text{ мм.}$$

Ж.1.8.6 По формуле (56) с учетом значений  $\varphi_1 = 1,4$ ;  $\varphi_2 = 0,5$ ;  $\varphi_3 = 1,0$ ;  $\varphi_T = 0,62$  и  $\psi = 0,56$  (согласно пункту 9.1.3 и таблице 12) вычисляем расчетную величину раскрытия трещины

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_m \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s = 1,4 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 0,62 \cdot 0,56 \frac{394,5}{2 \cdot 10^5} 392,6 = 0,19 \text{ мм.}$$

Условие (55) по предельной величине раскрытия трещин удовлетворяется, т.к.  $a_{crc} = 0,19 \text{ мм} < 0,2 \text{ мм} = a_{crc,ult}$ .

## Ж.2 Труба с двойным каркасом

*Исходные данные.* Железобетонная труба с подошвой диаметром условного прохода  $d_i = 2000$  мм = 2,0 м с толщиной стенки в цилиндрической части  $t = 200$  мм, 3-й группы по несущей способности, армированная двойным спиральным каркасом. Труба укладывается на утрамбованный грунт из супеси (группа Г-III) выше уровня грунтовых вод для трубопровода, транспортирующего слабоагрессивные жидкости.

*Требуется:* рассчитать армирование (тип и диаметр арматурной проволоки, шаг спирали и диаметр арматурного каркаса), определить контрольные испытательные нагрузки и проверить возможность трещинообразования.

### Ж.2.1 Уточнение исходных данных

#### Ж.2.1.1 Геометрические параметры трубы

Вычисляем:

- наружный диаметр трубы

$$d_e = d_i + 2t = 2000 + 2 \cdot 200 = 2400 \text{ мм} = 2,4 \text{ м};$$

- средний диаметр трубы

$$d_{cp} = 0,5(d_i + d_e) = 0,5(2000 + 2400) = 2200 \text{ мм} = 2,2 \text{ м};$$

- средний радиус трубы

$$r_{cp} = 0,5d_{cp} = 0,5 \cdot 2200 = 1100 \text{ мм} = 1,1 \text{ м};$$

- высота трубы с подошвой (по формуле Г.10)

$$H_T = d_e + 0,03 = 2,4 + 0,03 = 2,43 \text{ м}.$$

Высоту подошвы определяем по формуле (Г.1а)

$$t_{п} = t + 0,03 = 0,2 + 0,03 = 0,23 \text{ м}.$$

Согласно рекомендациям пункта Г.3 принимаем значение угла  $\beta_1 = 30^\circ$  ( $\sin \beta_1 = 0,5$ ;  $\text{tg } \beta_1 = 0,577$ ).

По формуле (Г.3) определяем ширину подошвы трубы

$$B_{п} = 2(0,5d_i + t_{п}) \text{tg } \beta_1 = 2(0,5 \cdot 2,0 + 0,23) \cdot 0,577 = 1,37 \text{ м}.$$

По формуле (Г.4) рассчитываем величину угла  $\beta_2$

$$\beta_2 = \arccos \left( \frac{d_e}{B_{п}} \sin \beta_1 \right) = \arccos \left( \frac{2,4}{1,37} \cdot 0,5 \right) = \arccos 0,876 = 28,8^\circ,$$

$$\text{tg } \beta_2 = \text{tg } 28,8^\circ = 0,55.$$

По формуле (Г.8) определяем угол  $\alpha$ :

$$\alpha = 2(\beta_1 + \beta_2) = 2(30^\circ + 28,8^\circ) = 117,6^\circ.$$

Для определения расчетной площади поперечного сечения трубы по формуле (Г.6) вычисляем:

- площадь  $S_{п}$  по формуле (Г.7)

$$S_{\text{ц}} = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \frac{360^\circ - \alpha}{360^\circ} = \frac{3,14}{4} (2,4^2 - 2,0^2) \frac{360^\circ - 117,6^\circ}{360^\circ} = 0,931 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_1$  по формуле (Г.9)

$$S_1 = 0,5(0,5d_i + t_{\text{п}})^2 \text{tg } \beta_1 = 0,5(0,5 \cdot 2,0 + 0,23)^2 0,577 = 0,436 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_2$  по формуле (Г.10)

$$S_2 = 0,125d_e^2 \text{tg } \beta_2 = 0,125 \cdot 2,4^2 \cdot 0,55 = 0,396 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_{\text{сек}}$  по формуле (Г.11)

$$S_{\text{сек}} = \frac{\pi d_i^2}{4} \left( \frac{\alpha}{360^\circ} \right) = \frac{\pi \cdot 2,0^2}{4} \left( \frac{117,6}{360} \right) = 1,026 \text{ м}^2.$$

По формуле (Г.2) определяем расчетную площадь поперечного сечения трубы

$$S_{\text{т}} = S_{\text{ц}} + 2(S_1 + S_2) - S_{\text{сек}} = 0,931 + 2(0,436 + 0,396) - 1,026 = 1,57 \text{ м}^2.$$

### Ж.2.1.2 Условия и параметры укладки труб в траншее

Для расчетов принимаем условия укладки трубы по рисунку В.2.

Высота засыпки грунта до верха трубы  $H = 6$  м (для 3-й группы по несущей способности).

Расчетная ширина основания траншеи

$$B_1 = d_e + 0,6 = 2,4 + 0,6 = 3,0 \text{ м.}$$

Ширину траншеи на уровне верха трубы при  $m_{\text{от}}^{-1} = 0,5$  (для супесей), определяем по формуле (4)

$$B = B_1 + 2 H_{\text{т}} m_{\text{от}}^{-1} = 3,0 + 2 \cdot 2,43 \cdot 0,5 = 5,43 \text{ м.}$$

Ширина верха траншеи составит

$$B_{\text{в}} = B_1 + 2(H + H_{\text{т}}) m_{\text{от}}^{-1} = 3,0 + 2(6 + 2,43) 0,5 = 11,43 \text{ м.}$$

Средняя ширина траншеи над верхом трубы

$$B_{\text{ср}} = 0,5(B + B_{\text{в}}) = 0,5(5,43 + 11,43) = 8,43 \text{ м.}$$

### Ж.2.2 Расчет нагрузок на трубу

Ж.2.2.1 Расчет нагрузок на трубу проводим при наиболее неблагоприятном их сочетании и наибольших значениях вертикальных нагрузок, в частности, с учетом транспортной нагрузки класса Н14, и без учета горизонтальных нагрузок от грунта, разгружающих трубу.

#### Ж.2.2.2 Определение вертикальной нагрузки от грунта

Ж.2.2.2.1 Вычисляем соотношение  $H/B_{\text{ср}} = 6,0/8,43 = 0,712$ .

Ж.2.2.2.2 С учетом данных таблицы б для  $H/B_{\text{ср}} = 0,712$  по интерполяции находим значение

$$k_{\text{тр}} = 0,896 + \frac{0,896 - 0,883}{0,7 - 0,8} (0,712 - 0,7) = 0,894.$$

Ж.2.2.2.3 Для определения коэффициента  $\psi$  находим из формулы (9) жесткость грунта засыпки, приняв по таблице 4  $E_{гр} = 2,2$  МПа

$$P_{гр} = 1,25 \cdot E_{гр} = 1,25 \cdot 2,2 = 2,75 \text{ МПа.}$$

По формуле (10) с учетом  $E_b = 32500$  МПа и  $\nu_b = 0,2$  находим приведенную жесткость железобетонной трубы:

$$P_{л} = \frac{E_b}{4(1-\nu_b^2)} \left( \frac{t}{r_{сп}} \right)^3 = \frac{32500}{4(1-0,2^2)} \left( \frac{0,2}{1,1} \right)^3 = 50,87 \text{ МПа.}$$

Ж.2.2.2.4 По формуле (8) находим коэффициент разгрузки трубы грунтом

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{P_{гр}(B-d_e)}{P_{л}\chi d_e}} = \frac{1}{1 + \frac{2,75(5,43-0,73)}{50,87 \cdot 1 \cdot 2,4}} = 0,936.$$

Так как  $\psi = 0,936 > d_e/B = \frac{2,4}{5,43} = 0,44$ , то для определения расчетной вертикальной нагрузки используем  $\psi = 0,936$ .

Ж.2.2.2.5 Учитывая, что  $H/d_e = 6/2,4 = 2,5$ , то по таблице 7 принимаем значение  $k_n = 1,4$  и проверяем условие по пункту 7.4.9

$$B k_{тр} \psi = 5,43 \cdot 0,894 \cdot 0,936 = 4,543 > d_e k_n = 2,4 \cdot 1,4 = 3,36.$$

Следовательно, для расчета вертикальной нагрузки на трубу от грунта необходимо использовать формулу (6).

Ж.2.2.2.6 По формуле (6) определяем при  $n_r = 1,15$  и  $\rho_{гр} = 17,7$  кН/м<sup>3</sup> расчетную вертикальную нагрузку от давления грунта на 1 пог. м трубы

$$Q_r = \gamma_r \rho_{гр} H d_e k_n = 1,15 \cdot 17,7 \cdot 6,0 \cdot 2,4 \cdot 1,4 = 410,36 \text{ кН/м.}$$

### Ж.2.2.3. Определение нагрузки от собственного веса трубы

По формуле (3) определяем расчетную нагрузку от собственного веса трубы с  $S_T = 1,57$  м<sup>2</sup>

$$Q_{св} = \gamma_{св} S_T \rho_b = 1,1 \cdot 1,57 \cdot 24,53 = 42,36 \text{ кН/м.}$$

### Ж.2.2.4 Определение вертикальной нагрузки от веса транспортируемой жидкости

По формуле (18) определяем расчетную нагрузку от веса транспортируемой жидкости

$$Q_{ж} = 8,98 d_e^2 = 8,98 \cdot 2,0^2 = 35,92 \text{ кН/м.}$$

### Ж.2.2.5 Расчет вертикального давления от транспортных средств

Ж.2.2.5.2 По формуле (22) определяем удельную нормативную нагрузку от колесных транспортных средств для Н11

$$P_{т(v)} = \frac{186}{3+H} = \frac{186}{3+6,0} = 20,67 \text{ кН/м.}$$

Ж.2.2.5.3 По формуле (23) определяем (при  $\mu = 1$ ) расчетную вертикальную транспортную нагрузку

$$Q_T = \gamma_T \mu p_{T(v)} d_e k_H = 1,3 \cdot 1 \cdot 20,67 \cdot 2,4 \cdot 1,4 = 90,27 \text{ кН/м.}$$

### Ж.2.3 Определение расчетной эквивалентной нагрузки

Ж.2.3.1 По таблице 9 при нормальном уплотнении грунта группы Г-III принимаем коэффициент  $\eta = 0,95$ . По таблице 11 принимаем для расчета коэффициенты  $\beta = 0,4$  и  $\beta_1 = 0,25$ .

Ж.2.3.2 По формуле (25) определяем расчетную вертикальную эквивалентную нагрузку

$$\begin{aligned} P_{\text{эkv}} &= \eta \left[ (Q_T + Q_{\text{г}}) \beta + (Q_{\text{св}} + Q_{\text{ж}}) \beta_1 \right] = \\ &= 0,95 \left[ (410,36 + 90,27) 0,4 + (42,36 + 35,92) 0,25 \right] = 208,83 \text{ кН/м.} \end{aligned}$$

### Ж.2.4 Определение расчетного изгибающего момента в вертикальном поперечном сечении трубы

Расчетный изгибающий момент в лотке и шельге трубы определяем по формуле (26)

$$M_A = 0,318 P_{\text{эkv}} r_{\text{cp}} = 0,318 \cdot 208,83 \cdot 1,1 = 73,05 \text{ кНм.}$$

### Ж.2.5 Расчет и подбор спирального армирования трубы

Ж.2.5.1 Принимаем для внутреннего и наружного каркасов диаметр спиральной арматуры  $d_s = 8$  мм из стали В500.

Ж.2.5.2 По формуле (65) определяем параметр  $h_0$  и по (61) диаметр внутреннего спирального каркаса  $d_{\text{ак}}$

$$h_0 = t - (30 + 0,5 d_s) = 200 - (30 + 0,5 \cdot 8) = 166 \text{ мм,}$$

$$d_{\text{ак}} = 2(0,5 d_e - h_0) = 2(0,5 \cdot 2400 - 166) = 2068 \text{ мм} = 2,068 \text{ м.}$$

Ж.2.5.3 По формуле (66) определяем расстояние от спирали наружного каркаса для внешней поверхности трубы и диаметр наружного армированного каркаса по формуле (67)

$$a' = 30 + 0,5 d_s = 30 + 0,5 \cdot 8 = 34 \text{ мм,}$$

$$d_{\text{ак1}} = 2(0,5 d_e - a') = 2(0,5 \cdot 2400 - 34) = 2332 \text{ мм} = 2,332 \text{ м.}$$

Ж.2.5.4 Принимаем  $\xi = 0,15 < 0,5$  и вычисляем высоту сжатой зоны

$$x = 0,15 h_0 = 0,15 \cdot 166 = 24,9 \text{ мм.}$$

Ж.2.5.5 По формуле (68) подсчитываем минимально необходимую площадь поперечного сечения спиральной арматуры для каждого каркаса при  $R_{b,ser} = 22$  МПа (для бетона класса В30),  $R_s = 435$  МПа и  $R_{sc} = 415$  МПа (для арматуры класса В500)

$$A_s = A_{s1} = \frac{R_{b,ser} \cdot x b (h_0 - 0,5x)}{\gamma_{b1} [R_s (h_0 - 0,5x) - R_{sc} (h_0 - a')]} =$$

$$= \frac{22 \cdot 24,9 \cdot 1000 (166 - 0,5 \cdot 24,9)}{0,9 [435 (166 - 0,5 \cdot 24,9) - 415 (166 - 34)]} = 768,6 \text{ мм}^2/\text{м}.$$

Ж.2.5.6 По формуле (63) определяем расчетный шаг спиральной арматуры

$$m = \frac{785 d_s^2}{A_s} = \frac{785 \cdot 8^2}{768,6} = 65,4 \text{ мм}.$$

Принимаем  $m_\phi = 65 \text{ мм} < m = 65,4 \text{ мм}$ .

Ж.2.5.7 Вычисляем по (64) фактическую площадь поперечного сечения спиральной арматуры

$$A_s^\phi = A_{s1}^\phi = A_s \frac{m}{m_\phi} = 768,6 \frac{65,4}{65,0} = 773,3 \text{ мм}^2/\text{м}.$$

Ж.2.5.8 Проверяем условие (83)

$$M_{ult} = R_{b,ser} b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{s1}^\phi (h_0 - a') \geq M_A$$

$$22 \cdot 1000 \cdot 24,9 (166 - 0,5 \cdot 24,9) + 415 \cdot 773,3 (166 - 34) = 84114690 + 42361374 =$$

$$= 126476064 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^3 = 126,48 \text{ кНм} > M_A = 73,05 \text{ кНм}.$$

Условие удовлетворяется.

## Ж.2.6 Подбор продольного армирования

Согласно таблице 13 для продольного разделительного армирования каждого каркаса должны использоваться 24 – 36 стержней из стали класса А240 диаметром  $d_s = 6 \text{ мм}$ .

## Ж.2.7 Проверка трещинообразования

Ж.2.7.1 Для расчета величины момента трещинообразования предварительно вычисляем:

- коэффициент приведения арматуры к бетону, приняв модуль упругости стальной арматуры  $E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  и начальный модуль упругости бетона класса В30  $E_b = 32,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b} = \frac{2 \cdot 10^5}{32,5 \cdot 10^3} = 6,15;$$

- приведенную площадь продольного сечения стенки трубы по формуле (47)

$$A_{red} = b t + 2 A_s \alpha = 1000 \cdot 200 + 2 \cdot 773,3 \cdot 6,15 = 209511,6 \text{ мм}^2;$$

- статический момент площади приведенного продольного сечения стенки трубы относительно наиболее растянутого волокна бетона по формуле (46)

$$\begin{aligned}
S_{t,red} &= 0,5bt^2 + A_s(t - h_0) + A_{s1}(t - a') = \\
&= 0,5 \cdot 1000 \cdot 200^2 + 773,3(200 - 166) + 773,3(200 - 34) = \\
&= 20154,7 \cdot 10^3 \text{ мм}^3;
\end{aligned}$$

- расстояние наиболее растянутого (крайнего) волокна бетона от центра тяжести приведенного продольного сечения элемента трубы по формуле (44)

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}} = \frac{20154,7 \cdot 10^3}{209511,6} = 96,2 \text{ мм};$$

- моменты инерции сечения бетона, растянутой и сжатой арматуры по формулам (41) и (42):

$$I_b = \frac{bt^3}{12} = \frac{1000 \cdot 200^3}{12} = 666,7 \cdot 10^6 \text{ мм}^4;$$

$$I_s = \frac{\pi d_s^4}{4} = \frac{3,14 \cdot 8^4}{4} = 3217 \text{ мм}^4;$$

- момент инерции приведенного продольного сечения элемента трубы по формуле (40)

$$I_{red} = I_b + 2I_s\alpha = 666,7 \cdot 10^6 + 2 \cdot 3217 \cdot 6,15 = 666,74 \cdot 10^6 \text{ мм}^4;$$

- момент сопротивления приведенного сечения в растянутой зоне по формуле (41)

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t} = \frac{666,74 \cdot 10^6}{96,2} = 6,93 \cdot 10^6 \text{ мм}^3;$$

- упругопластический момент сопротивления продольного сечения трубы по формуле (37)

$$W_{pl} = 1,3W_{red} = 1,3 \cdot 6,93 \cdot 10^6 = 9,01 \cdot 10^6 \text{ мм}^3;$$

- расчетный момент трещинообразования по формуле (33) для бетона класса В30,  $R_{bt} = 1,75 \text{ МПа}$ :

$$M_{crc} = R_{bt}W_{pl} = 1,75 \cdot 9,01 \cdot 10^6 = 15,768 \cdot 10^6 \text{ МПа} \cdot \text{мм} = 15768 \cdot 10^3 \text{ кНм}.$$

Ж.2.7.2 Условие (36) выполняется с существенным запасом, т.к.

$$M_{crc} = 15768 \cdot 10^3 > M_A = 73,05 \text{ кНм},$$

следовательно, трещины при расчетных нагрузках не образуются и расчет по раскрытию трещин не проводится.

### Ж.2.8 Расчет испытательной нагрузки по прочности трубы

По формуле (86) определяем расчетную вертикальную испытательную нагрузку по прочности трубы без учета ее собственного веса

$$\begin{aligned}
P_{и}^{пр} &= C_{жб} \eta \left[ \beta(Q_{г} + Q_{т}) + \beta_1 Q_{ж} \right] = \\
&= 1,3 \cdot 0,95 \left[ 0,4(410,36 + 90,27) + 0,25 \cdot 35,92 \right] = 218,2 \text{ кН/м}.
\end{aligned}$$

## Приложение И

### Пример расчета железобетонной трубы для микротоннелирования

*Исходные данные.* Железобетонная труба для микротоннелирования внутренним диаметром  $d_i = 1500$  мм = 1,5 м типа Т (рядовая), монтируемая в трубопроводе на глубине  $H = 8$  м с использованием бентонитового раствора, закачиваемого в затрубное пространство. Трубопровод прокладывается в грунтах с коэффициентом крепости  $f = 0,2$ . Максимальное расстояние между домкратными шахтами не превышает 150 м. Трубопровод предназначен для транспортирования слабоагрессивных жидкостей.

*Требуется:* подобрать толщину стенки трубы, класс прочности бетона на сжатие, рассчитать спиральное армирование (шаг и диаметр арматурного каркаса), подобрать продольное армирование, определить вертикальные контрольные нагрузки и проверить трещинообразование, а также определить максимальное усилие, которое может выдержать труба при ее продавливании.

#### И.1 Уточнение исходных данных

##### И.1.1 Геометрические параметры трубы

По данным таблицы Б.3.1 принимаем:

- толщину стенки трубы в ее основной цилиндрической части  $t = 140$  мм;
- полезную длину трубы  $\ell = 3000$  мм и полную длину трубы  $\ell_1 = 3150$  мм;
- наружный диаметр трубы

$$d_e = d_i + 2t = 1,5 + 2 \cdot 0,14 = 1,78 \text{ м};$$

- средний радиус трубы

$$r_{\text{cp}} = 0,5(d_i + d_e) = 0,5(1,78 + 1,5) = 1,64 \text{ м}.$$

##### И.1.2 Условия и параметры положения трубы в грунте

И.1.2.1 При заданном коэффициенте крепости грунта  $f = 0,2$  определяем значение кажущегося угла внутреннего трения грунта по формуле (71)

$$\varphi_k = \arctg f = \arctg 0,2 = 11,3^\circ.$$

И.1.2.2 По формуле (70) вычисляем величину пролета сводаобразования:

$$B_c = d_e - 2d_e \text{tg} \varphi_k = 1,78 + 2 \cdot 1,78 \cdot \text{tg} 11,3^\circ = 2,49 \text{ м}.$$

И.1.2.3 Рассчитываем высоту сводаобразования по формуле (69)

$$h_c = \frac{B_c}{2f} = \frac{2,49}{2 \cdot 0,2} = 6,23 \text{ м}.$$

#### И.2 Расчет вертикальных нагрузок на трубу

##### И.2.1 Определение вертикальной нагрузки от грунта

Расчет продолжительных вертикальных нагрузок на трубу проводим без учета горизонтальных нагрузок от грунта.

Вертикальные расчетные нагрузки от грунта рассчитываем по формуле (72) с учетом коэффициента надежности  $\gamma_{ГМ} = 1,5$  и плотности грунта  $\rho_{Г} = 17,7$  кН/м<sup>3</sup>

$$Q_{c(v)} = \gamma_{ГМ} \rho_{Г} h_c d_e = 1,5 \cdot 17,7 \cdot 6,23 \cdot 1,78 = 294,4 \text{ кН/м.}$$

### **И.2.2 Расчет нагрузок от собственного веса трубы**

По формуле (2) определяем расчетную нагрузку от собственного веса железобетонной трубы

$$Q_{св} = 0,864 \rho_b (d_e^2 - d_i^2) = 0,864 \cdot 24,53 (1,73^2 - 1,5^2) = 15,9 \text{ кН/м.}$$

### **И.2.3 Расчет нагрузки от веса транспортируемой жидкости**

По формуле (19) определяем расчетную нагрузку от веса транспортируемой жидкости

$$Q_{ж} = 8,98 d_i^2 = 8,98 \cdot 1,5^2 = 20,2 \text{ кН/м.}$$

### **И.2.4 Определение расчетной вертикальной эквивалентной нагрузки**

С учетом рекомендаций пункта 11.1.5 ( $\eta = 1,0$ ,  $\beta = 0,4$ ,  $\beta_1 = 0,3$ ) определяем расчетную эквивалентную вертикальную нагрузку по формуле (25)

$$\begin{aligned} P_{эkv} &= \beta Q_{Г(v)} + \beta_1 (Q_{св} + Q_{ж}) = \\ &= 0,4 \cdot 294,4 + 0,3(15,9 + 20,2) = 128,59 \text{ кН/м.} \end{aligned}$$

### **И.3 Определение расчетного изгибающего момента в вертикальном поперечном сечении трубы**

Расчетный изгибающий момент в лотке и шельге трубы определяем с учетом его перераспределение по формуле (28)

$$M'_A = 0,25 P_{эkv} r_{ср} = 0,25 \cdot 128,59 \cdot 1,64 = 52,72 \text{ кНм.}$$

### **И.4 Расчет и подбор спирального армирования трубы**

И.4.1 Для армирования используется двойной спиральный каркас. Принимаем для внутреннего и наружных каркасов диаметр спиральной арматуры  $d_s = 8$  мм и стали В500.

И.4.2 По формуле (65) определяем параметр  $h_0$

$$h_0 = t - (30 + 0,5d_s) = 140 - (30 + 0,5 \cdot 8) = 114 \text{ мм.}$$

И.4.3 Вычисляем по формуле (61) диаметр внутреннего спирального каркаса

$$d_{ак} = 2(0,5d_e - h_0) = 2(0,5 \cdot 1780 - 114) = 1552 \text{ мм.}$$

И.4.4 По формуле (66) определяем расстояние от спирали наружного каркаса для внешней поверхности трубы

$$a' = 30 + 0,5d_s = 30 + 0,5 \cdot 8 = 34 \text{ мм.}$$

И.4.5 Определяем по формуле (67) диаметр наружного каркаса

$$d_{ак1} = 2(0,5d_e - a') = 2(0,5 \cdot 1780 - 34) = 1712 \text{ мм.}$$

И.4.6 Принимаем  $\xi=0,2 < 0,5$  и вычисляем высоту сжатой зоны

$$x = 0,2h_0 = 0,2 \cdot 114 = 22,8 \text{ мм.}$$

И.4.7 По формуле (68) подсчитываем минимально необходимую площадь поперечного сечения спиральной арматуры для каждого каркаса при  $R_{b,ser} = 29 \text{ МПа}$  (для бетона класса В40)

$$\begin{aligned} A_s = A_{s1} &= \frac{R_{b,ser} \cdot x b (h_0 - 0,5x)}{\gamma_{b1} [R_s (h_0 - 0,5x) + R_{sc} (h_0 - a')] } = \\ &= \frac{29 \cdot 22,8 \cdot 1000 (114 - 0,5 \cdot 22,8)}{0,9 [435 (114 - 0,5 \cdot 22,8) + 415 (114 - 34)]} = 919,4 \text{ мм}^2/\text{м.} \end{aligned}$$

И.4.8 По формуле (63) определяем расчетный шаг спиралей арматуры

$$m = \frac{785 d_s^2}{A_s} = \frac{785 \cdot 8^2}{919,4} = 54,6 \approx 55 \text{ мм.}$$

Принимаем  $m_\phi = m = 55 \text{ мм}$  и фактическую площадь спиральной арматуры

$$A_s^\phi = A_{s1}^\phi = 919,4 \text{ мм}^2/\text{м.}$$

И.4.9 Проверяем условие (33)

$$\begin{aligned} M_{ult} &= R_{b,ser} b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A_{s1}^\phi (h_0 - a') = \\ &= 29 \cdot 1000 \cdot 22,8 (114 - 0,5 \cdot 22,8) + 415 \cdot 919,4 (114 - 34) = \\ &= 60683 \text{ кН} \cdot \text{мм} \approx 60,7 \text{ кНм} > M'_A = 52,72 \text{ кНм.} \end{aligned}$$

Условие (33) удовлетворяется; согласно рекомендациям пункта 10.2.10 проверка на трещинообразование трубы не производится.

## И.5. Подбор и расчет продольного армирования

И.5.1 Согласно таблице 13 для продольного армирования принимаем для каждого каркаса внутреннего и наружного по 24 стержня диаметром  $d_s = 8 \text{ мм}$  из арматурной стали класса В500 с расчетной прочностью на сжатие  $R_{sc} = 415 \text{ МПа}$ .

И.5.2 Всего в трубе располагаются  $n_s = 2 \cdot 24 = 48$  продольных стержней с общей площадью поперечного сечения

$$A_{sc} = 48 \frac{\pi}{4} d_s^2 = 48 \frac{3,14}{4} 8^2 = 2412,7 \text{ мм}^2.$$

И.5.3 Площадь поперечного сечения трубы, рассчитываемая по формуле (84), составляет

$$S_\tau = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) = \frac{3,15}{4} (1,73^2 - 1,5^2) = 0,743 \text{ м}^2.$$

## И.6 Расчет испытательной нагрузки по прочности трубы

По формуле (86) определяем расчетную вертикальную испытательную нагрузку по прочности трубы без учета ее собственного веса

$$\begin{aligned} P_{и}^{пр} &= C_{жб} (\beta Q_\Gamma + \beta_1 Q_\kappa) = \\ &= 1,3 (0,4 \cdot 294,4 + 0,3 \cdot 20,2) = 160,97 \text{ кН / м.} \end{aligned}$$

## И.7. Расчет максимальной предельной нагрузки на трубу

И.7.1 При продавливании трубы по условиям примера имеет место ее центральное сжатие.

И.7.2 По формуле (83) определяем величину равномерной нагрузки, которую может выдержать труба

$$\begin{aligned} N_{T(\min)} &= 0,262 \left[ R_{b,ser} (d_e^2 - d_i^2) + \alpha R_{sc} n_s d_s^2 \right] = \\ &= 0,262 \left[ 29(1,73^2 - 1,5^2) + 6,15 \cdot 415 \cdot 48 \cdot 0,008^2 \right] = \\ &= 8,59 \text{ МПа} \cdot \text{м}^2 = 8590 \text{ кН}. \end{aligned}$$

И.7.3 Максимальное давление, которое может выдержать труба при продольных нагрузках, составит

$$q_{ult} = \frac{N_T}{S_T} = \frac{8590}{0,743} = 11561 \text{ кН} / \text{м}^2.$$

## Приложение К

### Пример расчета бетонной трубы с внутренней полимерной облицовкой

*Исходные данные.* Бетонная труба диаметром условного прохода  $d_i = 800 \text{ мм} = 0,8 \text{ м}$  с плоской подошвой, укладываемая в траншею с высотой засыпки  $H = 4 \text{ м}$  грунтом из суглинка (группа Г-III). Труба укладывается на утрамбованный грунт для безнапорного трубопровода ливневой канализации, расположенного выше уровня грунтовых вод.

В качестве полимерной облицовки используются полипропиленовые листы толщиной  $t_{\text{л}} = 4 \text{ мм}$  с анкерами типа V-ЛОСК высотой  $t_a = 13 \text{ мм}$ .

*Требуется:* подобрать толщину стенки трубы  $t$ , определить минимальный класс прочности бетона на растяжение и контрольную испытательную нагрузку.

#### К.1 Уточнение геометрических параметров трубы и ее положения в траншее

##### К.1.1 Геометрические параметры трубы

Согласно рекомендациям пункта 6.1.3 определяем исходную для расчета толщину стенки трубы  $t = 0,12d_i = 0,12 \cdot 800 = 96 \text{ мм}$ . Принимаем ближайшую нормированную толщину стенки трубы  $t = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$ .

К.1.2 Используя схему укладки трубы, приведенную на рисунке В.4, вычисляем:

- наружный диаметр трубы

$$d_e = d_i + 2t = 800 + 2 \cdot 100 = 1000 \text{ мм} = 1,0 \text{ м};$$

- средний диаметр трубы

$$d_{\text{cp}} = 0,5(d_i + d_e) = 0,5(800 + 1000) = 900 \text{ мм} = 0,9 \text{ м};$$

- средний радиус трубы

$$r_{\text{cp}} = 0,5d_{\text{cp}} = 0,5 \cdot 900 = 450 \text{ мм} = 0,45 \text{ м}.$$

Толщину подошвы определяем по формуле (Г.1)

$$t_{\text{п}} = t + 0,05 = 0,1 + 0,05 = 0,15 \text{ м}.$$

Расчетную высоту трубы (над подошвой) определяем по формуле (Г.5):

$$H_{\text{т}} = d_e + 0,05 = 1,0 + 0,05 = 1,05 \text{ м}.$$

Согласно рекомендациям пункта Г.3 принимаем значение угла  $\beta_1 = 30^\circ$  ( $\sin \beta_1 = 0,5$ ;  $\text{tg } \beta_1 = 0,577$ ).

По формуле (Г.3) определяем ширину подошвы трубы

$$B_{\text{п}} = 2(0,5d_i + t_{\text{п}}) \text{tg } \beta_1 = 2(0,5 \cdot 0,8 + 0,15) \cdot 0,577 = 0,635 \text{ м}.$$

По формуле (Г.4) рассчитываем величину угла  $\beta_2$

$$\beta_2 = \arccos \left( \frac{d_e}{B_{\text{п}}} \sin \beta_1 \right) = \arccos \left( \frac{1,0}{0,635} \cdot 0,5 \right) \approx 38^\circ,$$

$$\text{tg } \beta_2 = \text{tg } 38^\circ = 0,781.$$

По формуле (Г.8) определяем угол  $\alpha^\circ$

$$\alpha^\circ = 2(\beta_1 + \beta_2) = 2(30^\circ + 38^\circ) = 136^\circ.$$

Для определения расчетной площади поперечного сечения трубы по формуле (Г.6) вычисляем:

- площадь цилиндрической части трубы  $S_{ц}$  по формуле (Г.7)

$$S_{ц} = \frac{\pi}{4} (d_e^2 - d_i^2) \frac{360^\circ - \alpha^\circ}{360^\circ} = \frac{3,14}{4} (1,0^2 - 0,8^2) \frac{360^\circ - 136^\circ}{360^\circ} = 0,176 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_1$  по формуле (Г.9)

$$S_1 = 0,5(0,5d_i + t_{п})^2 \text{tg } \beta_1 = 0,5(0,5 \cdot 0,8 + 0,15)^2 0,577 = 0,087 \text{ м}^2;$$

- площадь  $S_2$  по формуле (Г.10)

$$S_2 = 0,125d_e^2 \text{tg } \beta_2 = 0,125 \cdot 1,0^2 \cdot 0,824 = 0,103 \text{ м}^2;$$

- площадь сектора  $S_{сек}$  по формуле (Г.11)

$$S_{сек} = \frac{\pi d_i^2}{4} \left( \frac{\alpha^\circ}{360^\circ} \right) = \frac{\pi \cdot 0,8^2}{4} \left( \frac{136}{360} \right) = 0,190 \text{ м}^2.$$

По формуле (Г.2) определяем расчетную площадь поперечного сечения трубы

$$S_{т} = S_{ц} + 2(S_1 + S_2) - S_{сек} = 0,176 + 2(0,087 + 0,103) - 0,190 = 0,336 \text{ м}^2.$$

### К.1.3 Расчет параметров положения трубы в траншее

Для расчета используются условия укладки трубы по рисунку В.4.

Высота засыпки грунта до верха трубы  $H = 4$  м.

Расчетная ширина основания траншеи (см. пункт 7.4.4)

$$B_1 = d_e + 0,6 = 1,0 + 0,6 = 1,6 \text{ м.}$$

Ширина траншеи на уровне верха трубы при  $m_{от} = 1:0,75$  (для суглинка по таблице 6)

$$B = B_1 + 2H_T m_{от} = 1,6 + 2 \cdot 1,05 \cdot 0,75 = 3,175 \text{ м.}$$

Ширина верха траншеи составит

$$B_B = B_1 + 2(H + H_T) m_{от} = 1,6 + 2(4,0 + 1,05) 0,75 = 9,175 \text{ м.}$$

Средняя ширина траншеи над верхом трубы составит

$$B_{ср} = 0,5(B + B_B) = 0,5(3,175 + 9,175) = 6,175 \text{ м.}$$

## К.2 Расчет нагрузок на трубу

К.2.1 Расчет нагрузок на трубу проводим при наиболее неблагоприятном их сочетании и наибольших значениях вертикальных нагрузок, в частности, с учетом транспортной нагрузки класса Н11 и без учета горизонтальных нагрузок, разгружающих трубу.

### К.2.2 Определение вертикальной нагрузки от грунта

К.2.2.1 Вычисляем соотношение  $H/B_{ср} = 4,0/6,175 = 0,648$ .

К.2.2.2 По данным таблицы 6 для  $H/B_{ср} = 0,648$  находим значение  $k_{тр} = 0,903$ .

К.2.2.3 Для определения коэффициента  $\psi$  находим из формулы (9) жесткость грунта засыпки, приняв  $E_{гр} = 2,2$  МПа по таблице 4

$$P_{гр} = 1,25 \cdot 2,2 = 2,75 \text{ МПа.}$$

По формуле (10) с учетом значения модуля деформации бетона  $E_b = 32500$  МПа и  $\nu_b = 0,2$  (согласно СП 63.13330) находим приведенную жесткость трубы

$$P_{\text{л}} = \frac{E_b}{4(1-\nu_b^2)} \left( \frac{t}{r_{\text{cp}}} \right)^3 = \frac{32500}{4(1-0,2^2)} \left( \frac{0,1}{0,45} \right)^3 = 92,88 \text{ МПа.}$$

К.2.2.4 По формуле (8) находим коэффициент нагрузки трубы грунтом

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{2P_{\text{гр}}(B-d_e)}{P_{\text{л}}H_{\text{т}}}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 2,75(3,175-1,0)}{92,88 \cdot 1,05}} = 0,891.$$

Так как  $\psi = 0,891 > d_e/B = \frac{1,0}{3,175} = 0,315$ , то для определения расчетной вертикальной нагрузки используем  $\psi = 0,891$ .

К.2.2.5 Учитывая, что  $H/d_e = 4/1,0 = 4 > 2,5$ , то по таблице 7 принимаем  $k_{\text{н}} = 1,4$ .

К.2.2.6 Так как условие по 7.4.9

$$Bk_{\text{тр}}\psi = 3,175 \cdot 0,903 \cdot 0,891 = 2,55 \geq d_e k_{\text{н}} = 1,0 \cdot 1,4 = 1,4$$

выполняется, то расчетное вертикальное давление грунта вычисляем по формуле (6)

$$Q_{\text{г}} = \gamma_{\text{г}} \rho_{\text{гр}} H d_e k_{\text{н}} = 1,15 \cdot 17,7 \cdot 4,0 \cdot 1,0 \cdot 1,4 = 113,99 \text{ кН/м.}$$

### К.2.3 Определение вертикальной нагрузки собственного веса трубы

Расчетную нагрузку собственного веса трубы вычисляем с запасом (без учета веса чехла) по формуле (3)

$$Q_{\text{св1}} = \gamma_{\text{св}} S_{\text{т}} \rho_b = 1,1 \cdot 0,336 \cdot 23,54 = 8,7 \text{ кН/м.}$$

### К.2.4 Определение вертикальной нагрузки веса транспортируемой жидкости

По формуле (19) определяем расчетную вертикальную нагрузку веса транспортируемой жидкости

$$Q_{\text{ж}} = 8,98 d_i^2 = 8,98 \cdot 0,8^2 = 5,75 \text{ кН/м.}$$

### К.2.5 Определение вертикальной нагрузки от автотранспортных средств

К.2.5.1 По формуле (22) определяем удельную нормативную нагрузку от колесных транспортных средств класса Н11

$$p_{\text{т(в)}} = \frac{186}{3+H} = \frac{186}{3+4,0} = 26,57 \text{ кН/м}^2.$$

К.2.5.2 По формуле (23) определяем (при  $\mu = 1$ ) расчетную вертикальную транспортную нагрузку

$$Q_{\text{т}}^{\text{п}} = \gamma_{\text{т}} \mu p_{\text{т(в)}} d_e k_{\text{н}} = 1,3 \cdot 1 \cdot 26,57 \cdot 1,0 \cdot 1,4 = 48,36 \text{ кН/м.}$$

### К.3 Определение расчетной вертикальной эквивалентной нагрузки

К.3.1 Согласно таблице 9 при нормальном уплотнении грунта коэффициент  $\eta = 0,95$ . По таблице 11 для плоского уплотненного грунтового основания принимаем  $\beta = 0,4$  и  $\beta_1 = 0,25$ .

К.3.2 Определяем расчетную вертикальную эквивалентную нагрузку в лотке и шельге трубы по формуле (25)

$$P_{\text{экв}} = \eta \left[ (Q_{\Gamma} + Q_{\Gamma})\beta + (Q_{\text{св}} + Q_{\text{ж}})\beta_1 \right] = \\ = 0,95 \left[ (113,99 + 48,36)0,4 + (8,7 + 5,75)0,25 \right] = 65,12 \text{ кН/м.}$$

### К.4. Определение расчетного изгибающего момента от вертикальных нагрузок

К.4.1 Согласно рекомендациям пункта 14.5 определяем расчетный средний радиус трубы (с учетом использования полипропиленового чехла с анкерами V-LOCK)

$$r_{\text{ср(л)}} = r_{\text{ср}} + 0,5(2t_{\text{л}} + t_a) = 450 + 0,5(2 \cdot 4 + 13) = 460,5 \text{ мм} = 0,4605 \text{ м.}$$

К.4.2 По формуле (89) определяем расчетный изгибающий момент в точках *Б* стенки трубы

$$M_{\text{Б}} = 0,182 P_{\text{экв}} r_{\text{ср}} = 0,182 \cdot 65,12 \cdot 0,4605 = 5,46 \text{ кНм.}$$

К.4.3 Определяем момент сопротивления для крайнего растянутого волокна в шельге для элемента стенки трубы с размерами  $b = 1,0$  м и  $t_1 = t - t_a = 0,096$  м (без учета влияния полимерного чехла)

$$W_{\text{pl}} = \frac{bt_1^2}{3,5} = \frac{1 \cdot 0,096^2}{3,5} = 0,00263 \text{ м}^3.$$

К.4.4 По преобразованной формуле (29) при  $M_{\text{ср}} = M_{\text{Б}}$  определяем минимальную величину сопротивления бетона растяжению, необходимую для восприятия расчетного изгибающего момента, при которой исключается образование трещин

$$R_{\text{bt(min)}} = \frac{M_{\text{ср}}}{0,9W_{\text{pl}}} = \frac{5,46}{0,9 \cdot 0,00263} = 2306 \text{ кН/м}^2 \approx 2,31 \text{ МПа.}$$

К.4.5 Согласно таблице 6.9 СП 63.13330.2018 расчетное сопротивление растяжению бетона класса  $B_t 3,2$   $R_{\text{bt}} = 2,45 > R_{\text{bt(min)}} = 2,31$  МПа.

Расчетный момент при применении бетона класса  $B_t 3,2$  составит

$$M_{\text{Б1}} = M_{\text{Б}} \frac{R_{\text{bt}}}{R_{\text{bt(min)}}} = 5,46 \frac{2,45}{2,31} = 5,79 \text{ кНм.}$$

К.4.6 Приняв  $x = 0,5t = 0,5 \cdot 100 = 50$  мм и  $h_0 \approx t = 100$  мм, проверяем условие (90) при  $R_{\text{п}} = 20$  МПа (по таблице 2) и  $A_{\text{п}} = bt_{\text{п}} = 1000 \cdot 4 = 4000 \text{ мм}^2$

$$M_{\text{ult}} = R_{\text{b,n}} bx(h_0 - 0,5x) - 0,9R_{\text{п}} A_{\text{п}} t = \\ = 27,5 \cdot 1000 \cdot 50(100 - 0,5 \cdot 50) - 0,9 \cdot 20 \cdot 4000 \cdot 100 = \\ = 9,59 \cdot 10^7 \text{ МПа} \cdot \text{мм}^3 = 95,9 \text{ кНм} > M_{\text{Б1}} = 5,79 \text{ кНм} > M_{\text{ср}} = M_{\text{Б}} = 5,46 \text{ кНм.}$$

Условие (90) удовлетворяется.

### **К.5 Определение контрольной нагрузки при испытании трубы на прочность**

По формуле (86) определяем контрольную нагрузку при испытании трубы на прочность без учета ее веса при  $C_b = 1,6$ :

$$\begin{aligned} P_{\text{и}}^{\text{пр}} &= C_b \eta \left[ (Q_{\text{г}} + Q_{\text{т}}) \beta + Q_{\text{ж}} \beta_1 \right] = \\ &= 1,6 \cdot 0,95 \left[ (113,99 + 48,36) 0,4 + 5,75 \cdot 0,25 \right] = 100,9 \text{ кН / м.} \end{aligned}$$

## Библиография

- [1] ТУ 2246-003-56910145-2014 Листы анкерные V-ЛОСК, Т-ЛОСК
- [2] ТУ 224600-9-001-11146988-2015 Футеровочный лист с анкерными ребрами
- [3] СТО НОСТРОЙ 2.17.66-2012 Освоение подземного пространства. Коллекторы и тоннели канализационные. Требования к проектированию, строительству, контролю качества и приемке работ

Ключевые слова: бетонные трубы, железобетонные трубы, безнапорные трубы, расчет по прочности, расчет по образованию трещин, конструирование

---