

**ООО «Сармат»
Управление ПИ-труб**

Рекомендации

**по проектированию трубопроводов из предварительно
изолированных пенополиуретаном труб
производства ООО «Сармат»**

Минск, 2004 г.



Управление ПИ труб ООО "Сармат" , 220033, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Нахимова, 17
т/ф (+37517) 230-66-28,230-65-48; (8 029)673-84-29,673-84-23; www.sarmat.com; truba@sarmat.com

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Гарантийные обязательства.....	4
3. Требования к проектной документации.....	5
4. Основные данные системы предварительно изолированных трубопроводов.....	7
5. Расположение труб в траншее.....	13
6. Потеритепла.....	15
7. Основные допущения при проектировании.....	17
8. Напряжение в проводящей стальной трубе.....	19
9. Сила трения между грунтом и трубопроводом.....	22
10. Расчеты трубопроводов.....	24
11. Компенсация температурных расширений.....	33
12. Неподвижные опоры.....	47
13. Установка арматуры.....	51
14. Рекомендуемые методы прокладки.....	52
Приложение.....	58
Литература.....	62

ВВЕДЕНИЕ

Беларусь является страной с высоким уровнем централизованного теплоснабжения. Преобладающим способом прокладки тепловых сетей является прокладка в непроходных каналах с минераловатной теплоизоляцией. Из-за увлажнения применяемых материалов в процессе эксплуатации теплозащитные свойства теплоизоляционных конструкций резко снижаются, что приводит к потерям тепла, в 2-3 раза превышающим нормативные.

Наиболее эффективным решением поставленных выше проблем является широкое внедрение в практику строительства тепловых сетей трубопроводов с пенопо-лиуретановой (ППУ) теплоизоляцией типа «труба в трубе». По мнению ведущих специалистов в области теплоснабжения, применение новой технологии - это мощный рывок вперед в развитии систем теплоснабжения. Потери тепла в трубах новой конструкции минимальны. Сама конструкция «труба в трубе» позволяет полностью исключить наружную коррозию трубопровода. Это - надежность, долговечность, снижение к минимуму затрат ручного труда при строительстве и монтаже тепловых сетей с ППУ изоляцией, а также значительное снижение эксплуатационных расходов после запуска теплосети в действие.

Кроме вышеупомянутых достоинств, новые конструкции имеют еще одно важное преимущество - систему оперативного дистанционного контроля (ОДК) за увлажнением изоляции, что позволяет своевременно реагировать на нарушение целостности стальной трубы или полиэтиленового гидроизоляционного покрытия и заранее предотвращать утечки и аварии. Именно поэтому Совет Министров Республики Беларусь принял Постановление №1820 от 27.12.2000 г. о строительстве, реконструкции и капитальном ремонте тепловых сетей и систем теплоснабжения с применением только предварительно изолированных труб.

Данные рекомендации содержат основные принципы проектирования бесканальной прокладки трубопроводов тепловых сетей с использованием предварительно изолированных жестким пенополиуретаном труб в защитной оболочке из полиэтилена.

Специалисты предприятия ООО «Сармат» предоставят всю необходимую информацию и консультацию по проектированию и устройству предварительно изолированных трубопроводов, выполнят проверочный расчет на прочность по программе «Старт». По желанию заказчика могут быть выполнены проекты тепловых сетей.



ГАРАНТИЙНЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА

ООО «Сармат» поставляет всю номенклатуру изолированных пенополиуретаном фасонных изделий в полиэтиленовой оболочке для подземной бесканальной прокладки и в оцинкованной оболочке для наземной прокладки и полностью комплектует теплотрассу согласно спецификации заказчика. Мы поставляем изолированные пенополиуретаном отводы, тройники, переходы, неподвижные щитовые опоры, сильфонные компенсаторы, запорную арматуру, концевые элементы с кабелем вывода системы оперативного дистанционного контроля изоляции (ОДК) диаметрами 32/90 - 426/560.

Для трубопроводов тепловых сетей ООО «Сармат» использует разрешенные к применению «Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды (МНПА ГПАН-5.18)» следующие стальные трубы:

бесшовные:

- ГОСТ 8731 (группа В),
- ГОСТ 8733 (группа В) сталь 10Г2-ГОСТ 4543 электросварные прямошовные:
- ГОСТ 10705 (группа В) сталь 10, 20-ГОСТ 1050,
- ГОСТ 20295 сталь 20-ГОСТ 1050,
- ГОСТ 20295 сталь 17ГС, 17ПС-ГОСТ 19281.

Качество труб подтверждено сертификатом завода-изготовителя.

Теплоизоляционный материал - пенополиуретан.

Основные свойства пенополиуретана отвечают требованиям Европейского стандарта EN253 и соответствуют СТБ 1295-2001.

В качестве защитной трубы-оболочки ПИ труб, предназначенных для подземной прокладки тепловых сетей, применяется полиэтиленовая труба, изготовленная методом экструзии из полиэтилена низкого давления по ГОСТ 16338. При наземной прокладке применяется спиральнонавивная оболочка из тонколистовой оцинкованной стали (ГОСТ 14918).

Предварительноизолированные трубы, выпускаемые ООО «Сармат», отвечают требованиям СТБ 1295-2001. ООО «Сармат» предоставляет гарантию на теплоизоляцию поставляемых труб и фасонных изделий согласно СТБ 1295-2001 при условии строгого соблюдения правил монтажа и эксплуатации.

3. Требования к проектной документации

Проекты тепловых сетей должны отвечать требованиям литературы (1). Дополнительно необходимо предусмотреть следующее:

- на монтажной схеме трубопроводов необходимо показать все элементы предварительно изолированных трубопроводов согласно табл. 3.1;
- в проект трасс с аварийной сигнализацией, отдельным документом должна входить схема системы аварийной сигнализации с обозначением всех элементов системы;
- в спецификации к проекту необходимо указать все предварительно изолированные элементы трассы и элементы системы аварийной сигнализации с обозначением согласно каталога.

Условное обозначение ПИ труб в технической документации и при заказе должно соответствовать требованиям СТБ 1295-2001. Включать сокращенное наименование, наружный диаметр и толщину стенки основной трубы в миллиметрах, а также обозначение нормативно технического документа на основную трубу, через дефис сокращенное наименование материала трубы-оболочки, наружный диаметр трубы-оболочки в миллиметрах и обозначение настоящего стандарта.

Примеры условного обозначения:

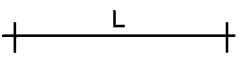
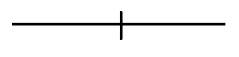

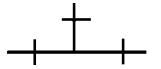
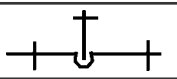
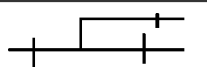
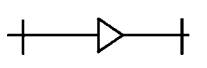
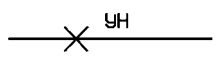
1. Стальная труба наружным диаметром 108 мм, толщина стенки 4,0 мм по ГОСТ 10704-91, предварительно термоизолированная жестким пенополиуретаном, в трубе-оболочке из ПЭНД наружным диаметром 200 мм (для бесканальной подземной прокладки): ПИ труба 108x4,0 ГОСТ 10704-91-ПЭНД 200 СТБ 1295-2001.
2. То же, в трубе-оболочке из оцинкованной стали (для наружной прокладки): ПИ труба 108x4,0 ГОСТ 10704-91-ОС 200 СТБ 1295-2001.

Вся документация должна быть выполнена четко и качественно, обеспечивая однозначность трактовки проектных решений.

Таблица 3.1

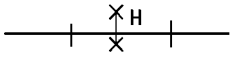
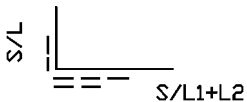
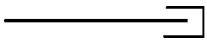
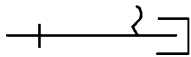

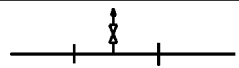
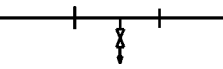
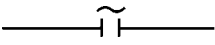
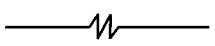
Условные обозначения элементов ПИ трубопроводов тепловых сетей бесканальной прокладки

Таблица 3.1
Условные обозначения элементов ПИ трубопроводов тепловых сетей бесканальной прокладки

Обозначение	Название
	Сварной стык с теплогидроизоляцией
	Сварной стык с теплогидроизоляцией
	Отвод
	Тройник прямой
	Тройник угловой
	Тройник параллельный
	Переход
	Условная неподвижная опора

3 РАЗДЕЛ

Продолжение табл. 3.1

	Реальная (физическая) неподвижная опора
	Компенсационная зона
	Заглушка (на перспективу)
	Концевой элемент с кабельным выводом
	Арматура запорная предварительно изолированная
	Тройник с шаровым краном воздушника
	Дренаж (спуск воды из системы)
	Стартовый компенсатор
	Сильфонный компенсатор

4. Основные данные системы предварительно изолированных трубопроводов

Предварительно изолированные пенополиуретаном трубы и фасонные детали представляют собой трехслойную систему, в которой внутренняя стальная труба, расположенная центрированно в оболочке, воспринимает давление и температуру транспортируемого теплоносителя. Полиэтиленовая или стальная оцинкованная оболочка соединена пенополиуретановой изоляцией с проводящей трубой. Такая предварительно изолированная труба является единой монолитной системой.

Согласно СТБ 1295-2001, для удобства сварки стальных труб и последующей герметизации гидрозакрипной оболочки все элементы теплосети имеют неизолированные концы длиной 150 мм (до диаметра 219 мм) или 250 мм (для остальных диаметров).

Кроме того, согласно требованиям (1), трубопроводы и фасонные детали оснащены проводами системы оперативного дистанционного контроля, которые прокладываются внутри слоя пенополиуретановой теплоизоляции.

Технологический процесс производства предварительно изолированных труб обеспечивает хорошее сцепление между металлической трубой, пенополиуретановой изоляцией и внешней оболочкой. С этой целью наружная поверхность стальных труб предварительно обрабатывается в дробеструйной установке, а на внутренней поверхности полиэтиленовой оболочки создается шероховатость за счет обработки коронным разрядом. Благодаря связям вся конструкция представляет собой единое целое.

Предварительно изолированные трубы системы ООО «Сармат» применяют для транспортировки теплоносителя со следующими рабочими параметрами:

- максимальная рабочая температура (длительная) - $t_{pmax} = 130^{\circ}\text{C}$
- максимальная допустимая рабочая температура (кратковременная) - на протяжении 10 суток суммарно за год - $t_{pmax} = 150^{\circ}\text{C}$
- давление - $P = 1,6 \text{ МПа}$.

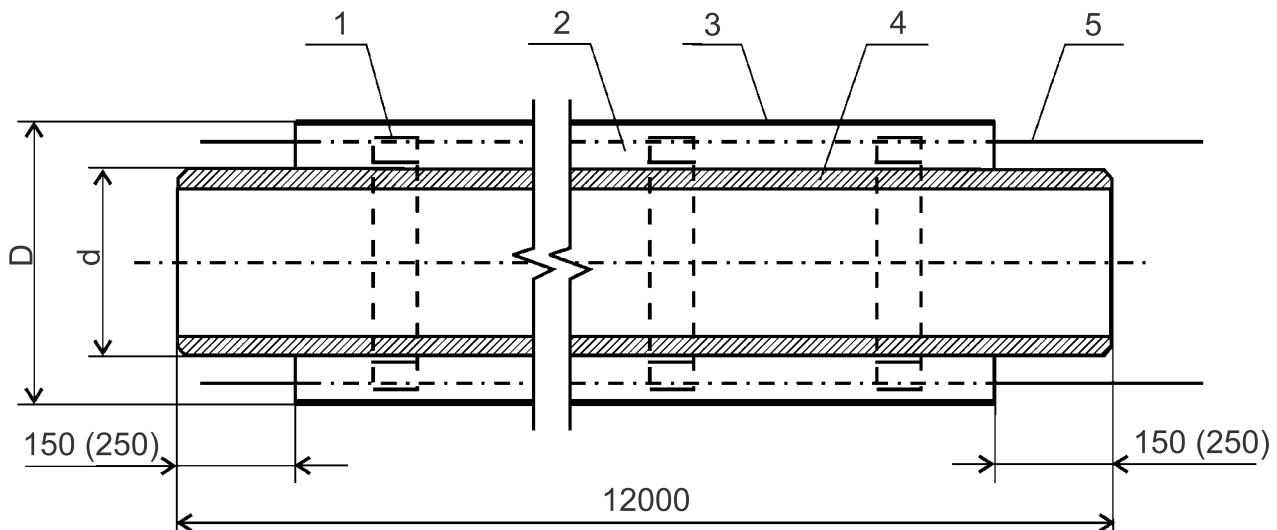
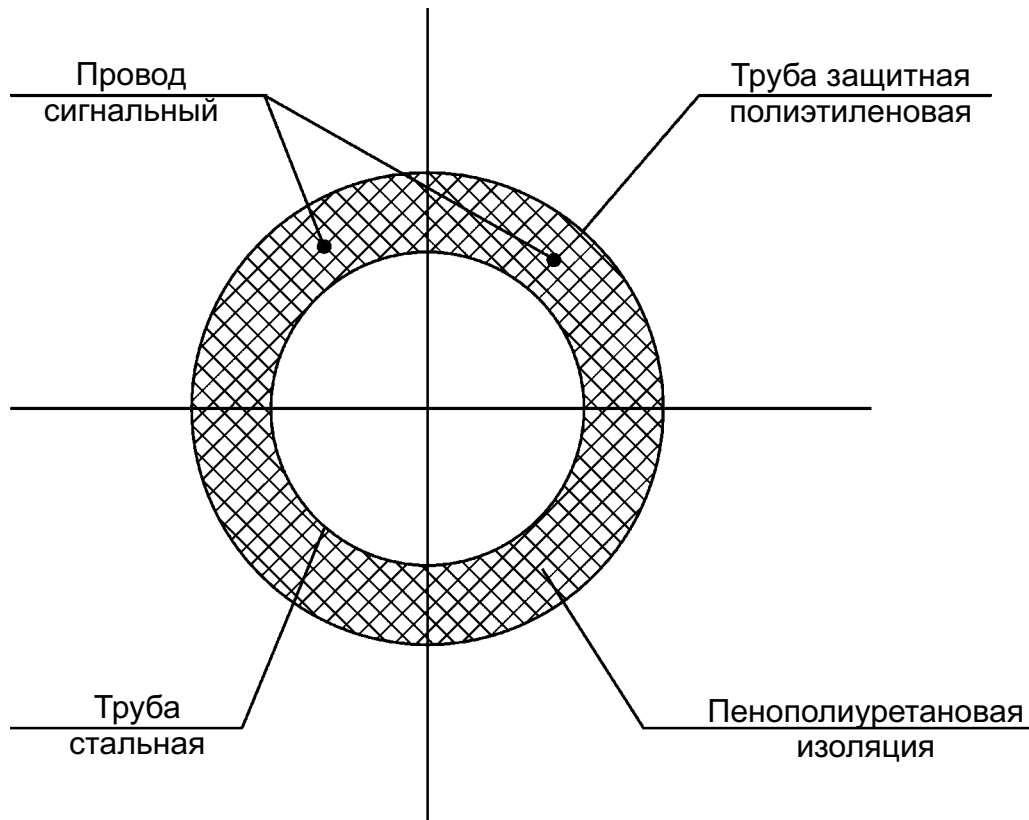


Рис. 4.1. Конструкция теплоизолированной трубы

1 - центрирующая опора, 2 - изоляция из пенополиуретана, 3 - труба-оболочка из полиэтилена, 4 - стальная труба, 5 - проводники-индикаторы системы оперативного дистанционного контроля за увлажнением теплоизоляции.

Рис. 4.2. Конструкция предварительно изолированного трубопровода



4.1. Проводящая труба

В качестве проводящей трубы могут применяться стальные, медные, полимерные и др. трубы. Поскольку в основном при прокладке тепловых сетей применяют стальные трубы, в данной работе рассматриваются принципы проектирования только для стальной проводящей трубы.

ООО «Сармат» использует разрешенные к применению «Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды (МНПА ГПАН-5.18)» для трубопроводов тепловых сетей следующие стальные трубы:

бесшовные:

- ГОСТ 8731 (группа В),
- ГОСТ 8733 (группа В) сталь 10Г2-ГОСТ 4543 электросварные прямошовные:
- ГОСТ 10705 (группа В) сталь 10, 20-ГОСТ 1050,
- ГОСТ 20295 сталь 20-ГОСТ 1050,
- ГОСТ 20295 сталь 17ГС, 17ПС-ГОСТ 19281.

Качество труб подтверждено сертификатом завода-изготовителя.

Типоразмеры труб, соответствующие требованиям ГОСТ 8732, 10704, 20295, приведены в таблице 4.1.1.

В таблице 4.1.1 указаны толщины стенок труб, которые гарантируют выносливость этих труб при рабочих параметрах, а также учитывают сортамент труб, которые выпускаются заводами стран СНГ. Окончательный выбор марки стали и толщины стенки определяется расчетом при проектировании.

Кроме того, для внешних трубопроводов сетей горячего водоснабжения используются водогазопроводные оцинкованные трубы по ГОСТ 3262-75, а так же электросварные по ГОСТ 10705, оцинкованные по ТУ 14-162-55-99, характеристики которых приведены в таблице 4.1.2.

Таблица 4.1.1

Перечень стальных труб для устройства сетей теплоснабжения

D _y , мм	D _n , мм	Масса, кг/м	Минимальная толщина стенки трубы, мм	Площадь сечения стенки, м ²
32	38	2,19	3,0	0,000349
40	45	2,62	3,0	0,000456
50	57	4,62	3,5	0,000587
65	76	6,26	3,5	0,000904
80	89	7,38	4,0	0,001068
100	108	10,26	4,0	0,001306
100	114	10,85	4,0	0,001547
125	133	12,73	4,0	0,001815
150	159	17,15	4,5	0,002183
200	219	31,52	6,0	0,004013
250	273	45,92	7,0	0,005847
300	325	62,54	8,0	0,007963
350	377	81,68	9,0	0,0103997
400	426	72,33	7,0	0,0092096

Таблица 4.1.2

Перечень оцинкованных труб для устройства сетей горячего водоснабжения

D _y , мм	D _n , мм	Масса, кг/м	Минимальная толщина стенки трубы, мм	Площадь сечения стенки, м ²
25	33,3	2,5	3,2	0,00030
32	42,3	3,2	3,2	0,00039
40	48,0	4,0	3,5	0,00049
50	60,0	5,0	3,5	0,00062
65	75,5	7,3	4,0	0,00090
80	88,5	8,6	4,0	0,00106
100	114,0	12,5	4,0	0,00138
125	140,0	15,5	4,5	0,00191
150	165,0	18,3	4,5	0,00227

Показатель	Значение показателя
Механические свойства:	
1. Плотность, кг/м ³	7800
2. Предел текучести, Н/мм ²	>230
3. Модуль упругости, Н/мм ²	2,08×10 ³
4. Прочность на растяжение, Н/мм ²	>350
5. Максимальное напряжение в трубопроводах при оптимальном проекте теплотрассы, Н/мм ²	150
Тепловые свойства:	
6. Коэффициент линейного теплового расширения, 1/°С	1,2×10 ⁵
7. Удельная теплоемкость, кДж/(кг°С)	0,48
8. Коэффициент теплопроводности, Вт/(м°С)	76

Чтобы избежать коррозии труб, необходимо использовать обработанную воду. Обработка воды зависит от местных условий, но рекомендуется соблюдать следующие требования:

- 1) рН = 9,5-10;
- 2) отсутствие свободного кислорода;
- 3) общее содержание солей не более 3000 мг/л.

Номинальные допускаемые напряжения 5, МПа, для электросварных труб и деталей, наиболее часто применяемых в тепловых сетях, приведены в таблице 4.1.4.

Таблица 4.1.4 Номинальные допускаемые напряжения

Расчетная температура, °С	8, МПа, для марок стали				
	ВстЗсп5	10	20	17ГС, 17Г1С	09Г2С
100	142	150	150	208	208
150	134	144	146	201	195

4.2. Тепловая изоляция

Для обеспечения минимальных потерь тепла при эксплуатации теплотрасс в качестве теплоизолирующего материала для температуры теплоносителя до 130°С (кратковременные воздействия до 150°С) используется жесткий пенополиуретан. Основные свойства пенополиуретана отвечают требованиям Европейского стандарта EN253 и соответствуют СТБ 1295-2001

Пенополиуретановый теплоизоляционный слой изготавливается на основе двух химических озононеразрушающих компонентов - полиола и изоцианата, смешанных в пропорции согласно технологическим инструкциям заводов-изготовителей компонентов. В результате реакции образуется однородный материал с закрытыми порами. При теплоизоляции сварных стыков труб используются те же компоненты, что и в заводских условиях. Основные характеристики физико-механических свойств теплоизоляционного материала приведены ниже.

Свойства жесткого пенополиуретана:

- средняя плотность сердцевины, кг/м³, не менее 60
- водопоглощение при кипячении, %, не более 10
- объемная доля закрытых пор, %, не менее 88
- прочность при сжатии при 10% деформации, МПа, не менее 0,3
- коэффициент теплопроводности, (X) Вт/м °С, не более 0,033

4.3. Полиэтиленовая труба

В качестве защитной трубы-оболочки ПИ труб, предназначенных для подземной прокладки тепловых сетей, применяется полиэтиленовая труба, изготовленная методом экструзии из полиэтилена низкого давления по ГОСТ 16338. Сортамент труб

приведен в таблице 4.3.1.

Табл.4.3.1 Размеры полиэтиленовых труб

D _{об} , мм	Толщина стенки, мм	D _{вн} , мм
90	2,2	85,6
110	2,5	105,0
125	2,5	120,0
140	3,0	134,0
160	3,0	154,0
180	3,0	174,0
200	3,2	193,6
225	3,5	218,0
250	3,9	242,2
280	4,4	271,2
315	4,9	305,2
355	5,6	343,8
400	6,3	387,4
450	7,0	436,0
500	7,8	484,4

Свойства материала:

- плотность - не менее 944 кг/м³
- коэффициент теплопроводности X = 0,43 Вт/м°С.

4.4. Предварительно изолированная труба с изоляцией из жесткого пенополиуретана и оболочкой из полиэтилена.

Предварительно изолированные трубы, выпускаемые ООО «Сармат», отвечают требованиям СТБ 1295-2001.

В таблице 4.4.1 приведены номенклатура и характеристики стальных предварительно изолированных труб.

Характеристики стальных предварительно изолированных труб

D _y , мм	D _n , мм	D _{об} , мм	Вес трубы*	
			Без воды	С водой
25	32	90	2,73	2,73
32	38	110	3,59	3,59
40	45	110	3,99	3,99
50	57	125	6,23	6,23
65	76	140	8,24	8,24
80	89	160	9,77	9,77
100	108	200	13,75	13,75
100	114	200	14,26	14,26
125	133	225	16,90	16,90
150	159	250	22,10	22,10
200	219	315	39,22	39,22
250	273	400	58,04	58,04
300	325	450	77,04	77,04
350	377	500	93,80	93,80
400	426	560	99,88	99,88

* Плотность ППУ - 80 кг/м³

5. Расположение труб в траншее

При прокладке предварительно изолированных труб в траншее необходимо выдерживать минимальные расстояния. Наименьшую ширину траншеи по дну при двухтрубной бесканальной прокладке тепловых сетей следует принимать для ПИ труб: Ду до 250 мм = $2D_{об}+A+0,6\text{м}$, Ду до 500 мм = $2D_{об}+A+0,8\text{м}$,

где Ду- наружный диаметр оболочки теплоизоляции, А - расстояние в свету между оболочками теплоизоляции труб, мм.

А = 150 мм - для диаметров до 219 мм включительно.

А = 250 мм - для остальных диаметров.

Минимальную ширину дна траншеи при канальной прокладке теплопроводов следует принимать согласно СНиП 3.05.03-85.

Размеры приямков под сварку и изоляцию стыков труб следует принимать:

ширина = $2D_{об}+A+1,2\text{ м}$;

длина - 1,2 м;

глубина - 0,7 м.

На дне траншеи следует устраивать песчаную подушку толщиной не менее 10 см.

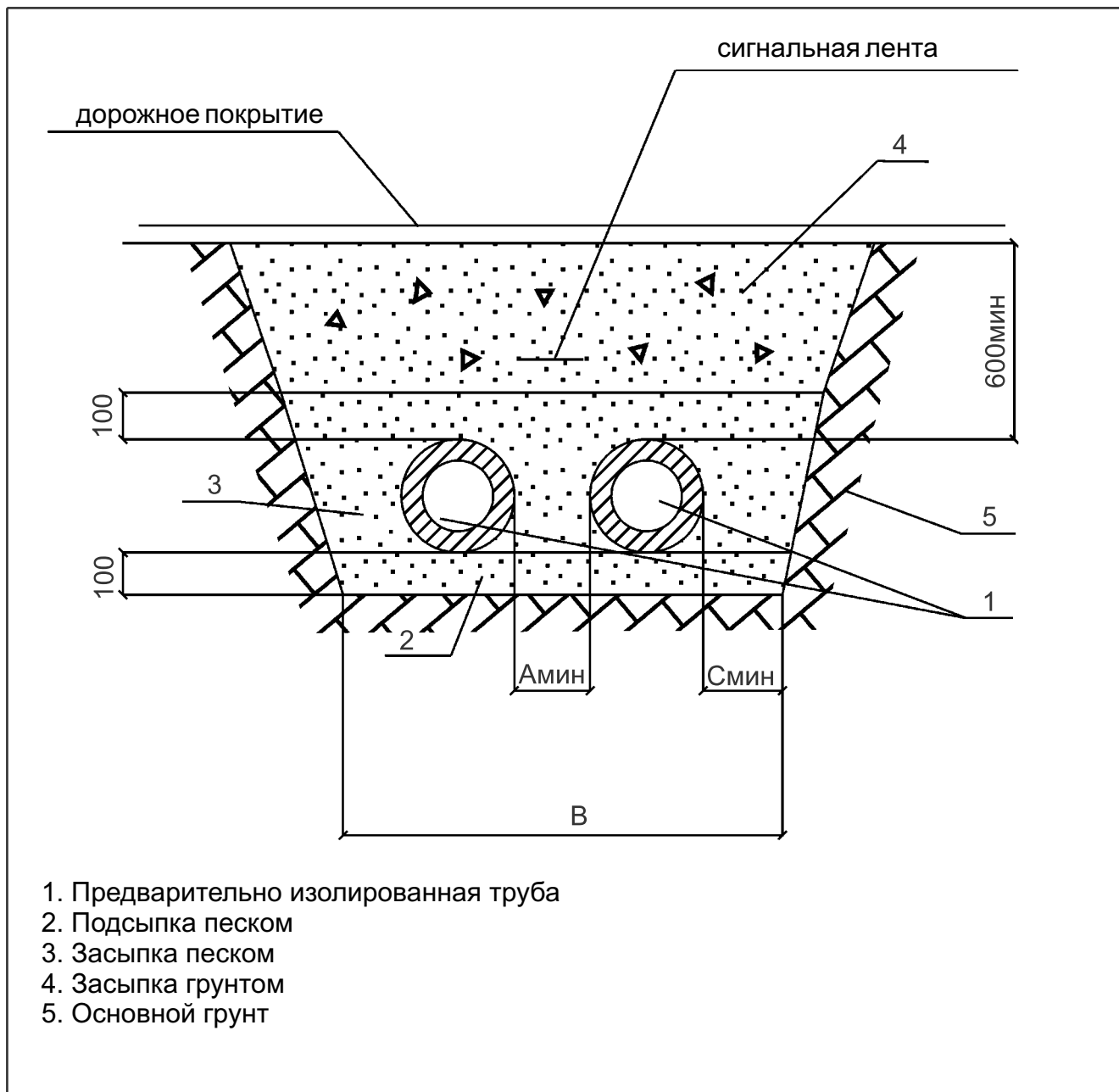
При обратной засыпке теплопровода обязательно устройство над верхом теплоизоляции защитного слоя из песчаного грунта толщиной не менее 10 см, не содержащего твердых включений (щебня, камней, кирпичей и пр.), с подбивкой пазух между теплопроводами и основанием и послойным уплотнением как между трубами, так и между трубами и стенками траншеи.

Таблица 5.1
Минимальные расстояния между трубами и размеры траншеи

D_y	$D_{об}$	A_{min}	B_{min}	C_{min}
мм	мм	мм	мм	мм
150	90	150	930	300
150	110	150	970	300
150	110	150	970	300
150	125	150	1000	300
150	140	150	1030	300
150	160	150	1070	300
150	200	150	1150	300
250	225	250	1300	300
250	250	250	1350	300
250	315	250	1680	400
250	400	250	1850	400
250	450	250	1950	400
250	500	250	2050	400
250	560	250	2170	400

Минимальное заглубление бесканального предизолированного трубопровода принимается согласно (3).

Рис. 5.1. Расположение труб в траншее



6. Потери тепла

Методика определения потерь тепла трубопроводами бесканальной прокладки изложена в справочной и нормативной литературе. Ниже приведены некоторые общие правила, которые помогут проектировщику в определении теплопотерь в каждом конкретном случае.

Сопrotивление теплопередаче одного метра единичного предварительно изолированного трубопровода, который проложен бесканально, можно определить по формуле:

$$r = rk + r_{\text{гр}}, \quad \text{м}^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$$

где r_k и $r_{\text{гр}}$ - сопротивление теплопередаче конструкции трубопровода и грунта.

Поскольку сопротивление стенки стальной проводящей трубы настолько мало, что не влияет на расчеты, то сопротивление теплопередаче конструкции можно свести только к сопротивлению слоя изоляции и сопротивлению стенки полиэтиленовой защитной трубы.

$$Г_k = Г_{\text{из}} + Г_{\text{об}}, \quad \text{М}^{\circ}\text{C}/\text{ВТ}$$

$$r_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{2i}}{d_{1i}}, \quad \text{м}^{\circ}\text{C}/\text{ВТ}$$

Где λ_i - теплопроводность материала слоя, Вт/(м[°]C),
 d_{1i} , d_{2i} - внутренний и внешний диаметры слоя, м.

Сопrotивление теплопередаче грунта:

$$r_{\text{гр}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{гр}}} \ln \left(\frac{2h_0}{D_{\text{об}}} + \sqrt{\frac{4h_0^2}{D_{\text{об}}^2} - 1} \right), \quad \text{м}^{\circ}\text{C}/\text{ВТ}$$

где $\lambda_{\text{гр}}$ - теплопроводность грунта, Вт/(м[°]C),

h_0 - расстояние от оси трубопровода до верха земли,

$D_{\text{об}}$ - наружный диаметр оболочки, мм.

Условное дополнительное сопротивление теплопередаче, которое учитывает взаимное влияние соседних труб при двухтрубной прокладке:

$$r_0 = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{гр}}} \ln \sqrt{1 + \frac{2h_0^2}{A}}, \quad \text{м}^{\circ}\text{C}/\text{ВТ}$$

где A - расстояние между осями труб, м.

Искомые затраты подающего и обратного трубопроводов при двухтрубной прокладке:

$$q_1 = \frac{(t_1 - t_{\text{гр}}) r_2 - (t_2 - t_{\text{гр}}) r_0}{r_1 \cdot r_2 - r_0^2}, \quad \text{Вт}/\text{м}$$

$$q_2 = \frac{(t_2 - t_{\text{гр}}) r_1 - (t_1 - t_{\text{гр}}) r_0}{r_1 \cdot r_2 - r_0^2}, \quad \text{Вт}/\text{м}$$

где t_1 и t_2 — температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, °C, $t_{\text{гр}}$ - температура грунта на глубине залегания оси трубопровода, °C, r_1 и r_2 - сопротивление теплопередаче (изоляция и грунт) подающего и обратного трубопровода, м[°]C/Вт.

Сопrotивление теплопередаче конструкции предварительно изолированных труб

D_y	D_H	$D_{об}$	$S_{об}$	$D_{вн.об}$	$\Gamma_{об}$	$\Gamma_{из}$	Γ_K
мм	мм	мм	мм	мм	м°С/Вт	м°С/Вт	м°С/Вт
25	32	90	2,2	85,6	0,01855	4,476970	4,496
32	38	110	2,5	105,0	0,01721	4,624503	4,642
40	45	110	2,5	105,0	0,01721	3,855205	3,872
50	57	125	2,5	120,0	0,01510	3,387204	3,402
65	76	140	3,0	134,0	0,01621	2,580334	2,597
80	89	160	3,0	154,0	0,01414	2,494839	2,509
100	108	200	3,2	193,6	0,01203	2,655666	2,668
100	114	200	3,2	193,6	0,01203	2,409661	2,422
125	133	225	3,5	218,0	0,01169	2,248364	2,260
150	159	250	3,9	242,2	0,01173	1,914911	1,927
200	219	315	4,9	305,2	0,01169	1,610125	1,522
250	273	400	6,3	387,4	0,01184	1,592436	1,604
300	325	450	7,0	436,0	0,01169	1,336868	1,349
350	377	500	7,8	484,4	0,01173	1,140530	1,152
400	426	560	8,8	542,4	0,01182	1,099118	1,111

В таблице 6.1 приведены термические сопротивления конструкций предварительно изолированных труб при показателях:

$$\lambda_{из} = 0,033 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}, \quad \lambda_{об} = 0,43 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}.$$

Для справки в табл. 6.2 приведены результаты расчетов потерь тепла для предварительно изолированных труб при следующих условиях:

теплопроводность изоляции из жесткого пенополиуретана $A_{из} = 0,033 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$,
теплопроводность полиэтилена высокой плотности ЯОб = $0,43 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, теплопроводность
грунта (сухого) $A_{гр} = 1,5 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$,

среднегодовая температура грунта на глубине заложения трубопровода $t_{гр} = +5^\circ\text{С}$,
расчетные температуры в тепловой сети

$$T_1 = 130^\circ\text{С},$$

$$T_2 = 70^\circ\text{С}.$$

Глубина заложения от поверхности земли до оси трубопровода -1м.

Таблица 6.2

Потери тепла предварительно изолированными трубами

D_y	D_y	$D_{об}$	r	r_0	q_1	q_2
мм	мм	мм	м°С/Вт	м°С/Вт	Вт/м	Вт/м
25	25	90	4,9	0,06	25,36	12,96
32	32	110	5,02	0,06	24,75	12,65
40	40	110	4,25	0,06	29,20	14,88
50	50	125	3,77	0,06	32,55	16,54
65	65	140	2,95	0,06	41,94	21,18

D_y	D_H	$D_{об}$	r	r_0	q_1	q_2
мм	мм	мм	м°С/Вт	м°С/Вт	Вт/м	Вт/м
80	89	160	2,85	0,06	43,40	21,89
100	108	200	2,99	0,07	41,32	20,77
100	114	200	2,74	0,07	45,06	22,58
125	133	225	2,56	0,07	48,17	24,07
150	159	250	2,22	0,07	55,478	27,55
200	219	315	1,79	0,07	68,52	33,64
250	273	400	1,85	0,07	66,29	32,60
300	325	450	1,58	0,07	77,43	37,70
350	377	500	1,37	0,07	89,14	42,94
400	426	560	1,32	0,07	92,32	44,33

7. Основные допущения при проектировании

В настоящих методических рекомендациях расчеты прочности бесканальных трубопроводов упрощены и основаны на ряде допущений.

Трубопроводы бесканальной прокладки работают в условиях знакопеременных нагрузений, обусловленных изменениями температуры теплоносителя. При этом уровень осевых напряжений в стальной трубе может превышать предел текучести, что требует проведения расчетов малоциклового прочностии как для применяемых марок сталей, так и для соответствующих сварных соединений. Срок службы такого трубопровода определяется числом циклов знакопеременного нагружения, величиной размаха напряжений в этих циклах и сопротивлением сталей малоциклового разрушению. Однако учитывая определенную сложность выполнения расчетов малоциклового прочностии и тот факт, что любая теплотрасса может быть спроектирована так, что напряжения в стальной трубе не превысят предела текучести данной марки стали, расчеты прочностии, приведенные в этом разделе, ограничиваются расчетами на статическую прочностии. В случае необходимости выполнения расчетов малоциклового прочностии следует обратиться к специальной нормативной документации.

Расчеты статической прочностии трубопроводов основаны на критериальной зависимости

$$\delta_{\text{э}} < \delta_{\text{доп}},$$

где $\delta_{\text{э}}$ - эквивалентное напряжение, включающее в себя напряжение трубы в осевом направлении и окружное напряжение, т.е. более полно учитывающее характер нагружения материала стальной трубы, $\delta_{\text{ДОП}}$ - характеристика материала стальной трубы. Кроме того, для выбора тех или иных компенсирующих элементов, расчеты включают в себя определение изменений длины трубопроводов, вызванные соответствующими изменениями температуры теплоносителя, а также расчетное определение монтажных температур. Расчетная температура теплоносителя $T_{\text{расч}} = 130^{\circ}\text{C}$. Если трубопровод смонтирован и засыпан грунтом при температуре $T_{\text{монт}} = +10^{\circ}\text{C}$, то осевые напряжения в трубопроводе $\sigma_x = 0$. При последующем разогреве трубопровода до температуры $T_{\text{расч}} = 130^{\circ}\text{C}$ в материале стальной трубы развиваются температурные напряжения σ_x , величина которых может достигать $\sigma_x = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 2,08 \cdot 10^5 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 300 \text{ Н/мм}^2$

(здесь E - модуль упругости стали, α - коэффициент температурного расширения стали, ΔT - изменение температуры), что заметно превышает предел текучести применяемых сталей. Однако в правильно спроектированном и построенном трубопроводе можно добиться такого состояния, при котором типичные колебания температуры теплоносителя от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+130^{\circ}\text{C}$ будут вызывать изменения осевой составляющей напряжений в интервале от -150 (Н/мм²) до $+150$ (Н/мм²). Такие условия работы являются наилучшими для трубопроводов тепловых сетей, и предлагаемые рекомендации по проектированию нацелены на достижение именно этих условий работы трубопроводов. Разумеется, могут возникать такие ситуации, когда даже в правильно спроектированных трубопроводах напряжения будут превышать предел текучести материала (первый разогрев трубопровода, ремонт в холодное время и т.п). Тем не менее, число температурных циклов, нагружающих материал стальной трубы выше предела текучести, может быть существенно сокращено, что повышает надежность и долговечность теплосети.

Анализ и обобщение международного опыта проектирования трубопроводов в ППУ изоляции, прокладываемых бесканальным методом, позволяет сформулировать упрощающие допущения:

1. Три элемента трубопровода в ППУ изоляции: стальная труба, пенополиурета-новая теплоизоляция и полиэтиленовая гидрозащитная оболочка представляют собой единое тело (так называемая скрепленная система).

2. Механические усилия и напряжения в пенополиуретановой теплоизоляции и в полиэтиленовой оболочке пренебрежимо малы по сравнению с усилиями и напряжениями в стальной трубе.

3. Деформации и перемещения всех трех компонентов трубопровода одинаковы и равны деформациям и перемещениям стальной трубы.

4. Трубопровод в ППУ изоляции рассматривается как идеально упругое тело.

5. Принимается, что сложный процесс взаимодействия трубопровода с грунтом с достаточной точностью моделируется одной единственной величиной - коэффициентом трения между полиэтиленовой оболочкой и грунтом, имеющим постоянное значение $\mu = 0,4$.

6. Осевые усилия в стальной трубе, которые возникают от изгиба компенсирующих плеч Г-образных, Z-образных и П-образных компенсаторов, сжатия-растяжения сильфонных и стартовых компенсаторов, а также от действия давления теплоносителя, пренебрежимо малы по сравнению с осевыми усилиями в стальной трубе, возникающими от действия сил трения между оболочкой и грунтом, и не оказывают влияния на температурные изменения длины трубопровода

8. Напряжение в проводящей стальной трубе

Главной причиной появления напряжений и перемещений трубопроводов, проложенных в грунте, являются температурные воздействия. С увеличением температуры элементы трубопровода расширяются, и в них возникают механические напряжения. Цель данного раздела - определение допустимого напряжения в бесканальном трубопроводе при нагревании последнего от температуры монтажа до максимальной рабочей температуры. Максимальные напряжения в материале стальной трубы возникают в точках установки неподвижных опор либо в точках возникновения мнимых опор. Расчет прочности производится именно для этих точек. Поэтому для расчета прочности необходимо знать места установки неподвижных опор и вычислить положение мнимых опор.

Напряженное состояние трубопроводов теплосети определяется двумя величинами: напряжением в осевом направлении трубы σ_x и окружным напряжением σ_t . В случае температурных нагрузок стальных трубопроводов в ППУ изоляции бесканальной прокладки большее значение всегда имеет компонента σ_x . Однако для более полного учета напряженного состояния трубопровода необходимо принимать во внимание обе компоненты напряжений. При этом используют обычное критериальное уравнение строительной механики:

$$\sigma_{\text{э}} < \sigma_{\text{доп}} \quad (8.1)$$

В этом уравнении $\sigma_{\text{э}}$ - эквивалентное напряжение, которое включает в себя обе компоненты напряжений σ_t и σ_x , т.е. более полно учитывает характер нагружения материала стальной трубы. Для условий работы прямолинейных участков трубопроводов теплосетей величина $\sigma_{\text{э}}$ определяется по формуле:

$$\sigma_{\text{э}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 - \sigma_x \cdot \sigma_t}, \quad (8.2)$$

в которой σ_x - напряжение, действующее вдоль оси трубопровода, равно:

$$\sigma_x = \frac{F}{S_{\text{см}}}, \quad (8.3)$$

а σ_t - окружное (тангенциальное) напряжение, которое вычисляется как:

$$\sigma_t = \frac{R}{\delta} \cdot P. \quad (8.4)$$

В формулах приняты следующие обозначения:

σ_t - окружное напряжение, Н/мм²;

σ_x - напряжение в осевом направлении, Н/мм²;

P - давление теплоносителя, Н/мм²;

F - сила, растягивающая (сжимающая) трубопровод, направленная вдоль оси трубы, Н;

$S_{\text{см}}$ - площадь поперечного сечения стенки стальной трубы, мм²;

R - внутренний радиус стальной трубы, м;

δ - толщина стенки стальной трубы, м.

Сила F в формуле представляет собой силу трения между полиэтиленовой оболочкой трубопровода и грунтом. Условия прочности для стальной трубы будут выполнены, если выполняется неравенство: (8.1)

На основании вышесказанного расчетная максимальная длина трения трубопровода L_{max} есть расстояние от свободного конца трубы до сечения, в котором осевые напряжения достигают допустимых. Используя эти длины можно предварительно определить конфигурацию трассы таким образом, чтобы избежать необходимости устройства промежуточных неподвижных опор. Величина L_{max} вычисляется исходя из условия, что осевое напряжение в точке трубы на неподвижной или мнимой опоре равно

150 Н/мм². Это условие гарантирует на участке трубопровода между неподвижной или мнимой опорой и компенсатором осевые напряжения $\sigma_x < 150$ Н/мм², что соответствует наилучшим условиям работы трубопровода. Для вычисления L_{\max} используется следующая формула:

$$L_{\max} = \frac{150 \cdot S_{\text{сст}}}{\sigma_x} \quad (8.5)$$

После вычисления величины L_{\max} она сравнивается с фактической длиной трубопровода между опорой и компенсатором, и если фактическая длина оказывается меньше величины L_{\max} , то для этого участка гарантированы наилучшие условия работы.

В данном случае при вычислении длины L_{\max} принимается в расчет только одна компонента напряженного состояния, а именно компонента σ_x , обусловленная температурным нагружением трубопровода, что не приводит к заметной перегрузке материала стальной трубы. Применительно к трубопроводам теплосетей это означает, что в расчет принимается только температурное нагружение и не учитывается нагружение трубопровода внутренним давлением теплоносителя. Однако при анализе статической прочности необходимо вычислять обе компоненты напряженного состояния трубопровода. Сравнение полученных значений показывает, что пренебрежение величиной σ_r приводит к погрешности вычисления σ_x примерно на 11%.

Значение L_{\max} для справки приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Максимальные длины трения трубопроводов L_{\max} на глубине заложения $h = 0,7-1,4$ м

Dy	Dн	Dоб	h	L _{max}			h	L _{max}		
				Ст3	Ст10	Ст20		Ст3	Ст10	Ст20
Мм	мм	мм	м	м	м	м	м	м	м	м
25	32	90	0,7	25	25	29	1,0	18	18	21
32	38	110		24	25	28		17	17	20
40	45	110		29	29	34		21	21	24
50	57	125		45	45	52		32	32	37
65	76	140		54	54	62		38	39	44
80	89	160		55	56	64		39	40	45
100	108	200		61	61	70		43	44	50
100	114	200		64	65	74		46	46	53
125	133	225		66	67	77		47	48	56
150	159	250		79	80	92		57	58	66
200	219	315		112	114	130		81	82	94
250	273	400		125	127	146		91	93	106
300	325	450		148	151	173		109	110	127
350	377	500		171	173	198		126	128	146
400	426	560		134	135	155		99	100	115
450	478	630		131	133	152		97	99	113
500	530	710		127	129	147		95	96	110
600	630	800		147	150	171		111	113	129
700	720	900	146	148	169	111	112	129		
800	820	1000	162	165	189	124	126	144		

Продолжение табл. 8.1

Dy	Dh	Doб	h	L _{max}			h	L _{max}		
				Ст3	Ст10	Ст20		Ст3	Ст10	Ст20
мм	мм	мм	м	м	м	м	м	м	м	м
25	32	90	1,20	15	15	17	1,40	13	13	15
32	38	110		14	15	17		12	13	14
40	45	110		17	17	20		15	15	17
50	57	125		26	27	31		23	23	26
65	76	140		32	32	37		27	28	32
80	89	160		33	33	38		28	29	33
100	108	200		36	37	42		31	32	36
100	114	200		38	39	45		33	33	38
125	133	225		40	40	46		34	35	40
150	159	250		48	49	56		41	42	48
200	219	315		69	70	80		59	60	69
250	273	400		77	79	90		67	68	78
300	325	450		92	94	107		80	81	93
350	377	500		107	109	125		93	95	108
400	426	560		84	85	98		73	74	85
450	478	630		83	84	97		72	74	84
500	530	710		81	82	94		71	72	82
600	630	800		95	97	111		84	85	97
700	720	900		95	97	111		84	85	97
800	820	1000	107	109	125	95	96			

Напряжение от реакции компенсаторов

Компенсация температурных расширений трубопроводов осуществляется за счет самокомпенсации («Г», «Z», «П»-образные участки) и осевых (сильфонных) компенсаторов. Силы упругой деформации вызывают в сечении стенки трубы дополнительные напряжения:

$$\sigma_k = \frac{F_k}{S_n}, \text{ МПа}, \tag{8.6}$$

где F_к- сила упругой деформации гибкого компенсатора, или реакция осевого компенсатора. Влияние осевого компенсатора на трубопровод определяется по формуле:

$$F_k = P_r \cdot A_k + \Delta L_j \cdot C_q,$$

где P_р - рабочее давление в трубе, МПа, (8.7)

A_к- эффективная площадь сильфона, мм²,

ΔL_ж - удлинение расчетного участка,

C_q - коэффициент осевой жесткости компенсатора, Н/мм.

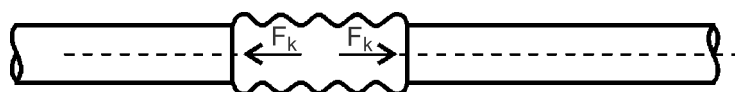


Рис. 8.1. Влияние сильфонного компенсатора на трубопровод

Напряжение от роста температуры

Если в трубопроводе, который уложен в грунт и нагрет, отсутствует компенсация температурных деформаций, то в стенке трубы возникают напряжения:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta t, \quad (8.8)$$

где α - коэффициент линейного расширения,

E - модуль продольной упругости (при максимальной температуре теплоносителя), $\Delta t = t_{\text{Max}} - t_{\text{МОНТ}}$ - разница температур между максимальной температурой теплоносителя и температурой трубопровода при монтажных работах.

Модули упругости и коэффициент линейного расширения для трубных сталей марок Ст.3, Ст.10, Ст.20 приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2

Модуль упругости и коэффициент линейного расширения для трубных сталей марок Ст.3, 10, 20

Температура стенки трубы T , °С	Модуль упругости E , Па	Коэффициент линейного расширения α , $1/^\circ\text{C}$	$E \cdot \alpha$, МПа·°С ⁻¹
20	$20,11 \cdot 10^{10}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$	2,37
75	$19,52 \cdot 10^{10}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	2,34
100	$19,38 \cdot 10^{10}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$	2,36
125	$19,13 \cdot 10^{10}$	$1,24 \cdot 10^{-5}$	2,37
150	$18,93 \cdot 10^{10}$	$1,2^5 \cdot 10^{-5}$	2,37

9. Сила трения между грунтом и трубопроводом

Перемещение предварительно изолированной трубы в грунте вследствие температурных расширений при изменении температуры теплоносителя приводит к возникновению силы трения между грунтом и внешней поверхностью трубопровода:

$$F_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{об}} \cdot \rho \cdot \mu \cdot g(1 + K_0)}{2} \cdot h \cdot L, \quad \text{кН}, \quad (9.1)$$

где L - длина участка, м,

μ - коэффициент трения между грунтом и оболочкой - 0,4,

$D_{\text{об}}$ - внешний диаметр полиэтиленовой трубы, м,

K_0 - 0,5-калибровочный коэффициент, $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$ - плотность грунта.

При дальнейших расчетах коэффициент трения между полиэтиленовой трубой-оболочкой и песчаной засыпкой $\mu = 0,4$. Для одного метра трубопровода

$$f_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{об}} \cdot \rho \cdot \mu \cdot g(1 + K_0)}{2} \cdot h, \quad \text{Н/м}, \quad (9.2)$$

В таблице приведены силы трения на 1 м.п. трубопроводов на глубинах заложения $h = 0,7 \text{ м}; 1 \text{ м}; 1,2 \text{ м}; 1,4 \text{ м}$ от поверхности земли до верха защитной оболочки трубы.

Таблица 9.1
Сила трения между грунтом и трубопроводом

Dy, мм	Dн, мм	Dоб, мм	F _{тр} , кН/м			
			h = 0,7 м	h = 1,0 м	h = 1,2 м	h = 1,4 м
25	32	90	1,25	1,77	2,11	2,46
32	38	110	1,55	2,19	2,62	3,05
40	45	110	1,55	2,20	2,63	3,06
50	57	125	1,78	2,51	3,00	3,48
65	76	140	2,01	2,83	3,37	3,92
80	89	160	2,31	3,24	3,87	4,49
100	108	200	2,91	4,09	4,87	5,65
100	114	200	2,92	4,09	4,88	5,65
125	133	225	3,31	4,63	5,51	6,38
150	159	250	3,72	5,19	6,16	7,14
200	219	315	4,83	6,68	7,91	9,13
250	273	400	6,29	8,63	10,19	11,75
300	325	450	7,24	9,88	11,63	13,39
350	377	500	8,23	11,16	13,11	15,06
400	426	560	9,31	12,59	14,78	16,96
450	478	630	10,67	14,36	16,82	19,27
500	530	710	12,25	16,40	19,18	21,95

Часто глубина траншеи (h) оказывается переменной по длине прямолинейного участка трубопровода. Тогда и сила трения f, действующая на один метр трубы, очевидно, является величиной переменной.

Для переменной глубины траншеи в простейшем случае можно принять, что глубина траншеи h изменяется линейно по длине прямолинейного участка трубопровода. Тогда величина $f = f_{ср}$ представляет собой среднее значение силы трения, соответствующее среднему значению глубины траншеи $h_{ср} = 0,5 (h_0 + h_1)$, где h_0 и h_1 - значения глубины траншеи на концах рассматриваемого прямолинейного участка. В этом случае $F_{тр} = f_{ср} \cdot L$.

10. Расчеты трубопроводов

Приступая к расчету, проектировщик должен руководствоваться одним принципом - суммарное напряжение, которое возникает в стенке проводящей трубы, всегда должно быть меньшим, чем допустимое нормативное напряжение.

Рассмотрение расчета предварительно изолированных трубопроводов можно начать со следующего примера.

Пример 1. Температура теплоносителя в трубе длиной L увеличивается на величину ΔT , причем труба расширяется свободно.

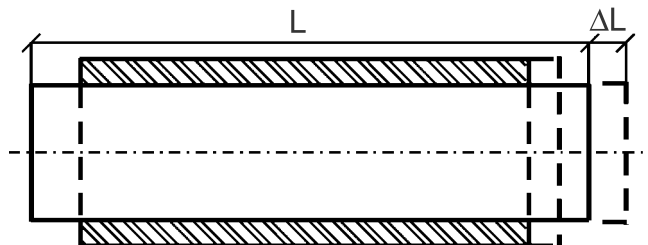


Рис. 10.1

Тогда удлинение трубы ΔL можно вычислить по формуле:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L, \quad (10.1)$$

в которой α - коэффициент температурного расширения.

Отсюда величина относительного удлинения трубы, или ее относительная деформация, равна:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T. \quad (10.2)$$

При этом никаких напряжений в трубе нет, т. е. $\sigma = 0$.

Пример 2. Участок трубопровода длиной L зажат между двумя неподвижными опорами.



Рис. 10.2

Наполнение трубопровода теплоносителем с температурой t_1 , что отличается от начальной температуры трубы t_0 , под давлением P вызывает постоянные по всей длине трубы температурные напряжения:

$$\sigma = -\alpha \cdot E \cdot \Delta T, \quad (10.3)$$

где $\Delta T = t_1 - t_0$,

E - модуль упругости материала стальной трубы.

Следовательно, удлинение и относительная деформация трубы равны нулю:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0}{L} = 0. \quad (10.4)$$

Вопрос о вычислении перемещений, деформаций и напряжений, вызванных температурными изменениями, требует некоторых пояснений. Труба рассматривается как иде-

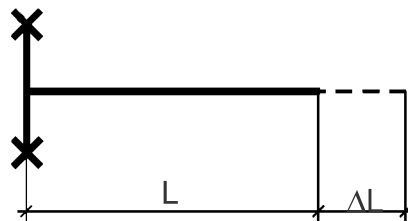
ально упругое тело. В этом случае осевые механические напряжения в стальной трубе подчиняются закону Гука, который используется в расчетах в обычном виде:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

Применяя это выражение к вычислению напряжений в примерах 1 и 2, получим, что напряжения в примере 1 отличны от нуля, а в примере 2 равны нулю, что полностью противоречит существу дела. Для преодоления этой особенности температурных нагрузений в теории упругости используется метод устранения деформаций. Для примера 2 этот метод состоит в следующем: сначала мы (мысленно) предоставили возможность нагретой трубе свободно расширяться, а затем сжали её до первоначального размера, например, с помощью некоторого механического устройства, и тем самым сообщили трубе деформацию, в точности равную температурной, но противоположную по знаку. Теперь ясно, что в трубе появятся напряжения, несмотря на то, что первоначальный размер трубы не изменился и деформации равны нулю.

В ситуации, когда один из концов освободить от неподвижной опоры, вместо напряжений в материале трубы возникает деформация, которая вызывает перемещение свободного конца на величину:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L. \tag{10.5}$$



Если дополнительно поместить трубопровод в грунт, который влияет на внешнюю оболочку (что передается на проводящую трубу) равномерно действующей силой F, это вызовет дополнительные напряжения от трения:

$$\sigma_{тр} = \frac{F_{тр} \cdot L_j}{S_{ст}}. \tag{10.6}$$

Температурное расширение ^б трубопровода происходит по всем направлениям равномерно. Поэтому на прямолинейном участке трубопровода, засыпанного грунтом, концы которого являются свободными или заканчиваются компенсаторами, естественным образом возникает неподвижная точка, от которой стальная труба расширяется в обоих направлениях. В этом случае говорят, что в данной точке возникает мнимая неподвижная опора. В частности, если длина такого участка равна L, толщина слоя засыпки (глубина траншеи) постоянна и диаметр трубопровода на этом участке не изменяется, то мнимая неподвижная опора возникает в средней точке этого участка, т. е.:

$$L_0 = \frac{L}{2}. \tag{10.7}$$

При проектировании теплотрассы удобно пользоваться понятием максимально допустимой длины L_{max} прямолинейного участка трубопровода, заключенного между неподвижной опорой и компенсатором. Величина L_{max} вычисляется исходя из условия, что осевое напряжение в точке трубы на неподвижной или мнимой опоре не превышает допустимое значение, что соответствует наилучшим условиям работы трубопровода:

$$L_{\max} = \frac{S_{\text{тр}} \cdot \delta_{\text{доп}}}{f}, \quad (10.8)$$

где $S_{\text{тр}}$ - площадь поперечного сечения стенки стальной трубы, мм², f - сила трения, действующая на один метр трубы, кН/м.

Температурное удлинение ΔL участка трубопровода длиной L , засыпанного грунтом, определяется по формуле:

$$\Delta L = \alpha(T - T_0) \cdot L - \frac{f \cdot L^2}{2E_t \cdot S_{\text{тр}}}, \quad (10.9)$$

где T - расчетная температура теплоносителя, °С,

T_0 - температура наружного воздуха при монтаже трубопровода, °С, α - коэффициент линейного расширения стальной трубы, 1/°С, E_t - модуль продольной упругости стальной трубы с учетом влияния температуры, Н/мм².

В формуле для вычисления перемещений уменьшаемое отражает изменение длины свободно расширяющегося трубопровода, а вычитаемое отражает тормозящее влияние грунта.

Перемещения

Величина перемещения точки врезки компенсатора определяется температурным расширением прямолинейного участка трубопровода, расположенного между неподвижной или мнимой опорой и этим компенсатором (точка 3 рис. 10.4).

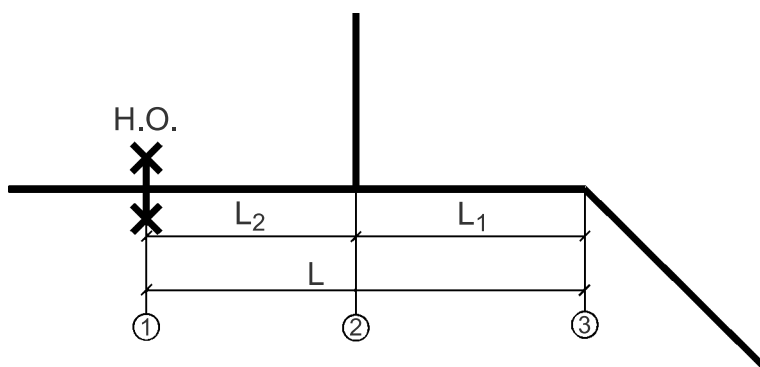


Рис. 10.4

Перемещения неподвижной опоры (точка 1) принимаются равными 0. При изменении температуры теплоносителя в трубопроводе на величину ΔT смещение точки 3 составит:

$$\Delta L_3 = \alpha(T - T_0) \cdot L - \frac{f \cdot L^2}{2E_t \cdot S_{\text{тр}}}. \quad (10.10)$$

Здесь f - известная нам сила трения на единицу длины трубопровода между полиэтиленовой оболочкой и грунтом, вычисляемая по формуле (9.2),

H/m , L - расстояние между опорой и компенсатором, м,

E_t - модуль упругости стали, Н/мм²,

$S_{\text{тр}}$ - площадь поперечного сечения стенки стальной трубы, мм². Если между опорой и компенсатором находится тройниковое ответвление, как показано на рис. (10.4), то его перемещение (т. е. перемещение точки 2) можно вычислить с помощью аналогичной формулы:

$$\Delta L_2 = \alpha(T - T_0) \cdot L_2 - \frac{f \cdot (2 \cdot L_1 + L_2) \cdot L}{2E_1 \cdot S_{\text{тп}}}, \quad (10.11)$$

в которой L_1 - расстояние от свободного конца трубы до тройника, а L_2 - расстояние от опоры до тройника.

Часто прямолинейный участок трубопровода, содержащий тройниковое ответвление, составляется из отрезков *труб разного диаметра*. Примером может служить отрезок трубопровода между точками 1 и 3, диаметр которого изменяется в точке 2 (рис.10.5).

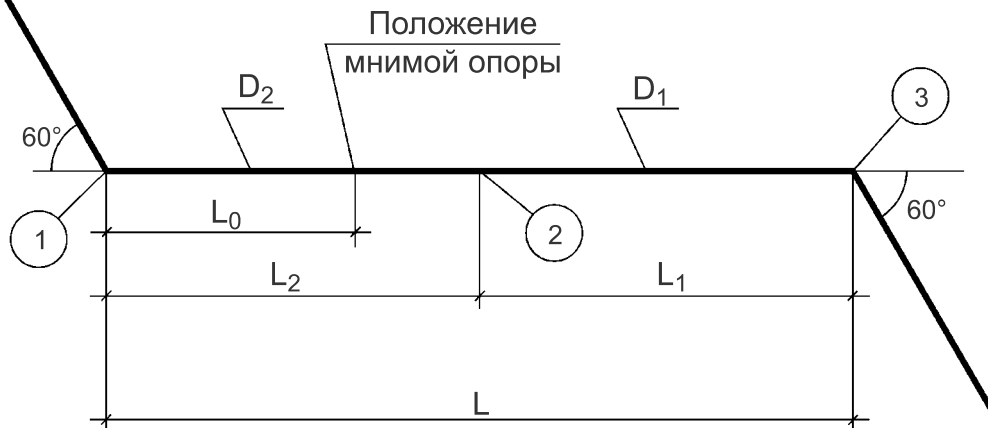


Рис. 10.5.

В этом случае сила трения между трубопроводом и грунтом, приходящаяся на единицу длины трубопровода, изменяется скачком вместе с изменением диаметра полиэтиленовой оболочки трубопровода. Для определения места расположения мнимой опоры прямолинейного отрезка трубопровода переменного диаметра необходимо использовать формулу:

$$L_0 = \frac{f_1 \cdot L_1 + f_2 \cdot L_2}{2f_2}. \quad (10.12)$$

Здесь f_1 и f_2 - сила трения на единицу длины трубопроводов диаметрами D_1 и D_2 между полиэтиленовой оболочкой и грунтом, вычисляемые по формуле (9.2), причем f_2 - сила трения на единицу длины участка, на котором суммарная сила трения F имеет большее значение. Если неподвижная или мнимая опора расположена на прямолинейном участке трубопровода с переменным диаметром труб, то отличие в вычислении температурных напряжений состоит лишь в том, что сила трения F представляет собой сумму сил трения на участках различного диаметра, т. е. $F = F_1 + F_2$.

Формулы для вычисления перемещений в точках 2 и 3 имеют вид:

$$\Delta L_3 = \alpha \cdot \Delta T \cdot (L_1 + L_2) - \left(\frac{f_1 \cdot L_1^2}{2 \cdot E \cdot S_{\text{см1}}} + \frac{(2 \cdot f_1 \cdot L_1 + f_2 \cdot L_2) \cdot L_2}{2 \cdot E \cdot S_{\text{см2}}} \right); \quad (10.13)$$

$$\Delta L_2 = \alpha \cdot \Delta T \cdot L_2 - \frac{(2 \cdot f_1 \cdot L_1 + f_2 \cdot L_2) \cdot L_2}{2 \cdot E \cdot S_{\text{см2}}}. \quad (10.14)$$

Определение перемещения имеет большое значение. Условия выполнения работ по размещению труб в траншее накладывают определенные ограничения на максимальную

величину перемещения трубы вследствие температурных деформаций и определяют необходимость встраивания компенсационных зон, которые делают возможным свободное перемещение колен. Учитывая взаимное размещение трубопроводов в сечении траншеи, отличие температур теплоносителей, которые транспортируются, возможность неравномерности нагрева подающего и обратного трубопроводов, рекомендуем ограничивать перемещения одного колена самокомпенсации в пределах компенсационной зоны до 100 мм. В случаях, когда это перемещение необходимо увеличить, допускается большая величина перемещения при условии встраивания компенсационной зоны из традиционной канальной прокладки с соответствующим учетом необходимого расстояния между трубопроводами на прямых участках и соблюдения минимальных расстояний между трубами и стенками лоточных элементов, как для бесканальной прокладки.

Основной задачей при проектировании теплосетей из предварительно изолированных труб является правильный выбор геометрии трассы и расположение компенсирующих элементов таким образом, чтобы не существовало на трассе точек, где напряжение, возникающее в стенке трубы, превышало бы допустимое.

Можно отметить три способа достижения этого условия.

Первый способ состоит в том, что геометрия теплотрассы должна быть запроектирована таким образом, чтобы расстояние от свободного конца до условной или реальной неподвижной опоры не превышало величины L_{max} , которая делает невозможным возникновение напряжений, больше допустимых. Причем реальные неподвижные опоры применяем только тогда, когда на рассчитываемом участке меняется диаметр трубопровода для защиты трубы меньшего диаметра.

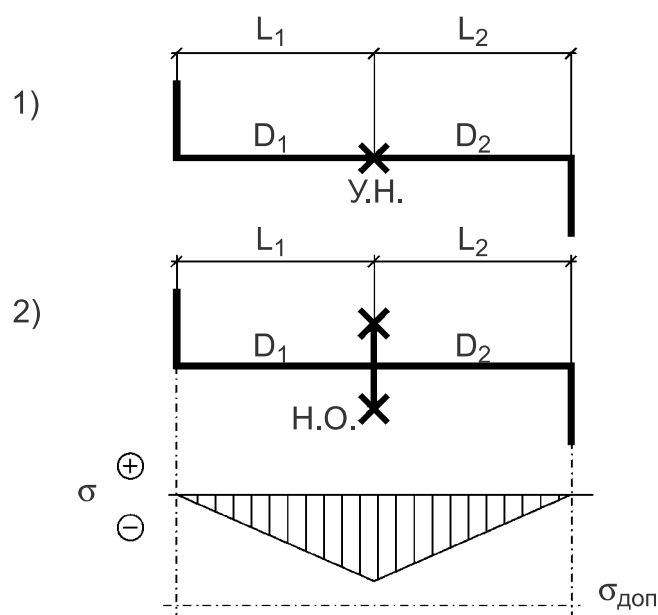


Рис. 10.6. Осевые напряжения между естественными компенсаторами, которые не превышают допустимые напряжения

- 1) $D_1 = D_2$;
- 2) $D_1 \neq D_2$;

С каждой стороны неподвижной опоры расстояния L_1 и L_2 обеспечивают выполнение условия:

$$L_1 \leq L_{max1}, \quad L_2 \leq L_{max2}.$$

если вместо гибкой компенсации на свободных концах смонтировать осевые (сильфонные, постоянно работающие) компенсаторы:

$$L_1 \leq L_{\max 1} \leq L_{\text{мп}1}^{\max 1} - \frac{F_{k1}}{F_{\text{мп}1}}; \quad (10.15)$$

$$L_2 \leq L_{\max 2} \leq L_{\text{мп}2}^{\max 2} - \frac{F_{k2}}{F_{\text{мп}2}}; \quad (10.16)$$

L_{\max} - максимальное расстояние от свободного конца до неподвижной опоры с учетом сил трения и реакции компенсирующего элемента.

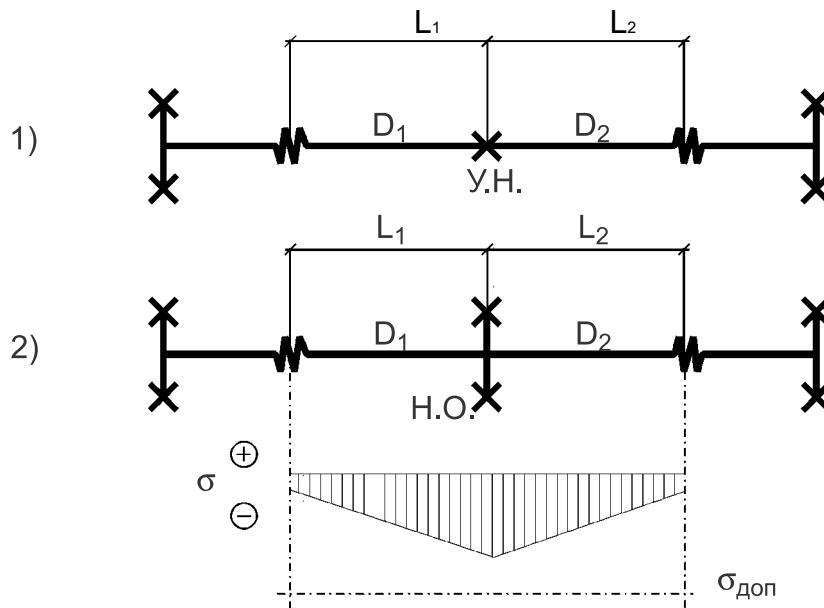


Рис. 10.7. Осевые напряжения между сильфонными компенсаторами, которые не превышают допустимые напряжения

1) $D_1=D_2$;

2) $D_1 \neq D_2$;

Второй способ - проектирование сети так, чтобы осевые напряжения от прироста температуры в условных неподвижных опорах и на участках между ними независимо от расстояния до свободного конца не превышали допустимые:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \leq \sigma_{\text{доп}}. \quad (10.17)$$

Этого можно достичь следующими средствами:

Первый - это выбрать такой материал трубы, чтобы напряжение при расчетной разнице температур не превышало допустимых значений.

Второй - это выполнение предварительного подогрева трубы во время монтажных работ. На рис. 10.8 показано разложение напряжений в трубе между двумя естественными компенсаторами на участках между углами поворота и условными неподвижными опорами, где происходит удлинение и осевые напряжения увеличиваются, от $\sigma = 0$ до $\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$ в пунктах «УН». Между неподвижными опорами участок трубопровода «зажат» силами трения возникающими между грунтом и трубой, и напряжения подчинены условию:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \leq \sigma_{\text{доп}}. \quad (10.18)$$

Напряжения в трубе не превышают допустимые. Метод предварительного подогрева трубы основан на том, что при монтажных работах труба предварительно подогревается до температуры подогрева t_p . При этом при какой-то определенной разнице температур есть возможность удлинения свободных концов трубы ($\sigma = 0$). После этого выполняется один из возможных способов крепления трубы и засыпка трубы. Температура t_p должна быть подобрана таким образом, чтобы при нагревании трубопровода от t_p до максимальной рабочей температуры напряжения сжатия, а при охлаждении трубы от t_p до минимально возможной температуры (это будет температура грунта на оси залегания трубы в случае остановки теплосети) напряжения растяжения не превышали допустимых значений.

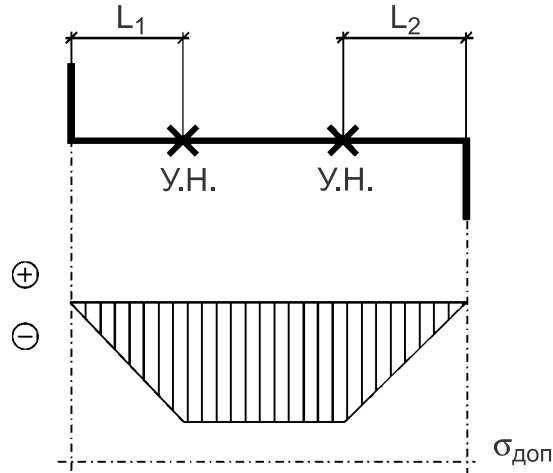


Рис. 10.8. Неподвижный участок произвольной длины между двумя естественными компенсаторами

Предварительный нагрев трубопроводов при монтаже

Теория метода предварительного нагрева состоит в том, что трубопровод перед засыпкой нагревается до средней температуры между температурой монтажа и максимальной рабочей температурой теплоносителя. Температура предварительного нагрева определяется по формуле:

$$t_p = \frac{t_{\max} - t_{\text{монтаж}}}{2}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (10.19)$$

где t_{\max} - максимальная расчетная температура теплоносителя, $^\circ\text{C}$, $t_{\text{монтаж}}$ - температура монтажа трубопровода, $^\circ\text{C}$.

Например:

$$t_p = \frac{130 + 10}{2} = 70, \quad ^\circ\text{C}, \quad (10.20)$$

$$\Delta t_1 = 130 - 70 = 60, \quad ^\circ\text{C}, \quad \Delta t_2 = 70 - 10 = 60, \quad ^\circ\text{C},$$

где Δt_1 - разница температур между максимальной температурой теплоносителя и температурой подогрева,

Δt_2 - разница температур между температурой подогрева и температурой монтажа трубопровода.

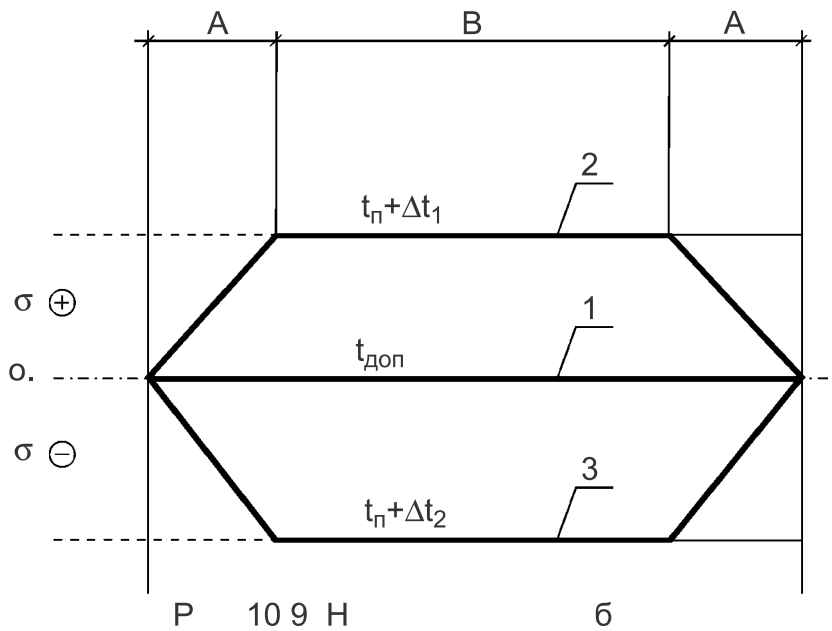


Рис. 10.9. Напряжения в трубопроводе с предварительным подогревом

На рисунке 10.9 показано распределение напряжений в прямом трубопроводе при использовании предварительного подогрева. В состоянии 1 незасыпанный трубопровод подогрет до температуры t_n , поэтому напряжения в этом трубопроводе отсутствуют. После засыпки трубопровода при нагреве его на Δt_1 в нем возникают напряжения сжатия, а при охлаждении на Δt_2 - напряжения растяжения. В зонах «А» от концов трубы присутствуют тепловые удлинения, в зоне «В» тепловые удлинения делает невозможным сила трения между трубопроводом и грунтом, так как труба «защемлена», и максимальные напряжения возникают на участке трубы в этой зоне.

Предварительное термическое растяжение теоретически имеет определенные позитивные преимущества, но очень трудоемкое, требует высокой точности проведения замеров температур и практически в наших условиях его применение связано с большими проблемами.

Кроме того, теоретические расчеты не учитывают реальных условий прокладки (температура монтажа может колебаться на протяжении периода монтажа, температура грунта во время аварийной остановки сети может быть меньше, чем температура монтажа и т.д.). В некоторой технической литературе величину Δt рекомендуется принимать равной 50°C и даже 45°C . Для температурных графиков выше, чем $130/70^\circ\text{C}$, температурное натяжение вообще не применяется.

Предварительный нагрев можно осуществить с помощью:

- водяного пара;
- электроэнергии;
- воды.

Для первых двух методов необходимо специальное передвижное оборудование (парогенератор или электрогенератор). Предварительный нагрев водой рекомендуется (и чаще всего это делается), когда трубопровод подсоединяется к действующей сети, и предварительный нагрев осуществляется сетевой водой.

Учитывая все, что изложено в этом разделе, проектант должен сам решить, использовать ли метод предварительного подогрева для каждого конкретного случая.

Третий способ применяется на прямых участках трассы большой длины и состоит в применении разных видов осевых (в нашем случае сильфонных) компенсаторов.

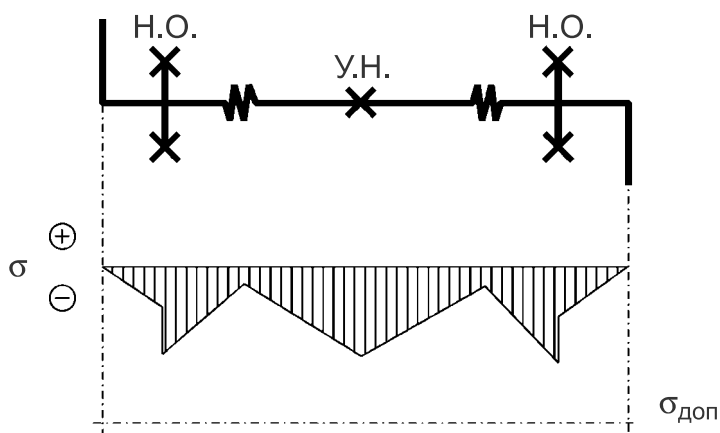


Рис. 10.10. Использование цепи из сильфонных компенсаторов на прямом участке произвольной длины

Максимальная длина участка между двумя соседними компенсаторами:

$$L_{\max}^k \leq 2 \left(\frac{S_1 \sigma}{f_{\text{мп1}}} - \frac{F_{k1}}{f_{\text{мп1}}} \right), \text{ м}, \quad (10.11)$$

где F_k - сила упругой деформации сильфонного компенсатора,
 $f_{\text{мп}}$ - сила трения между окружающим грунтом и внешней поверхностью трубопровода. Следует добавить, что реально величина L_{\max}^k ограничена компенсационной способностью подобранного компенсатора.

11. Компенсация температурных расширений

К типовым видам радиальной компенсации относятся «Г», «Z», «П»-образные компенсаторы.

Г-образная компенсация

Г-образная компенсация рекомендуется в пределах углов от 45° до 90°. Определение необходимых размеров плеч и компенсационных зон может выполняться по номограмме (рис. 11.2).

Можно воспользоваться следующей методикой:

- для компенсационных углов $\beta = 90^\circ$:

$$L_{к1} = 1,2 \sqrt{\frac{1,5E_m}{\sigma_{доп}}} \sqrt{D_n \cdot \Delta L_2}, \quad (11.1)$$

$$L_{к2} = 1,2 \sqrt{\frac{1,5E_m}{\sigma_{доп}}} \sqrt{D_n \cdot \Delta L_1}, \quad (11.2)$$

где E_m - модуль продольной упругости стальной трубы с учетом влияния температуры, Н/мм²;

D_n - наружный диаметр стальной трубы, м;

ΔL_2 - температурное удлинение трубопровода, засыпанного грунтом, длиной L_2 , м;

ΔL_1 - температурное удлинение трубопровода, засыпанного грунтом, длиной L_1 , м.

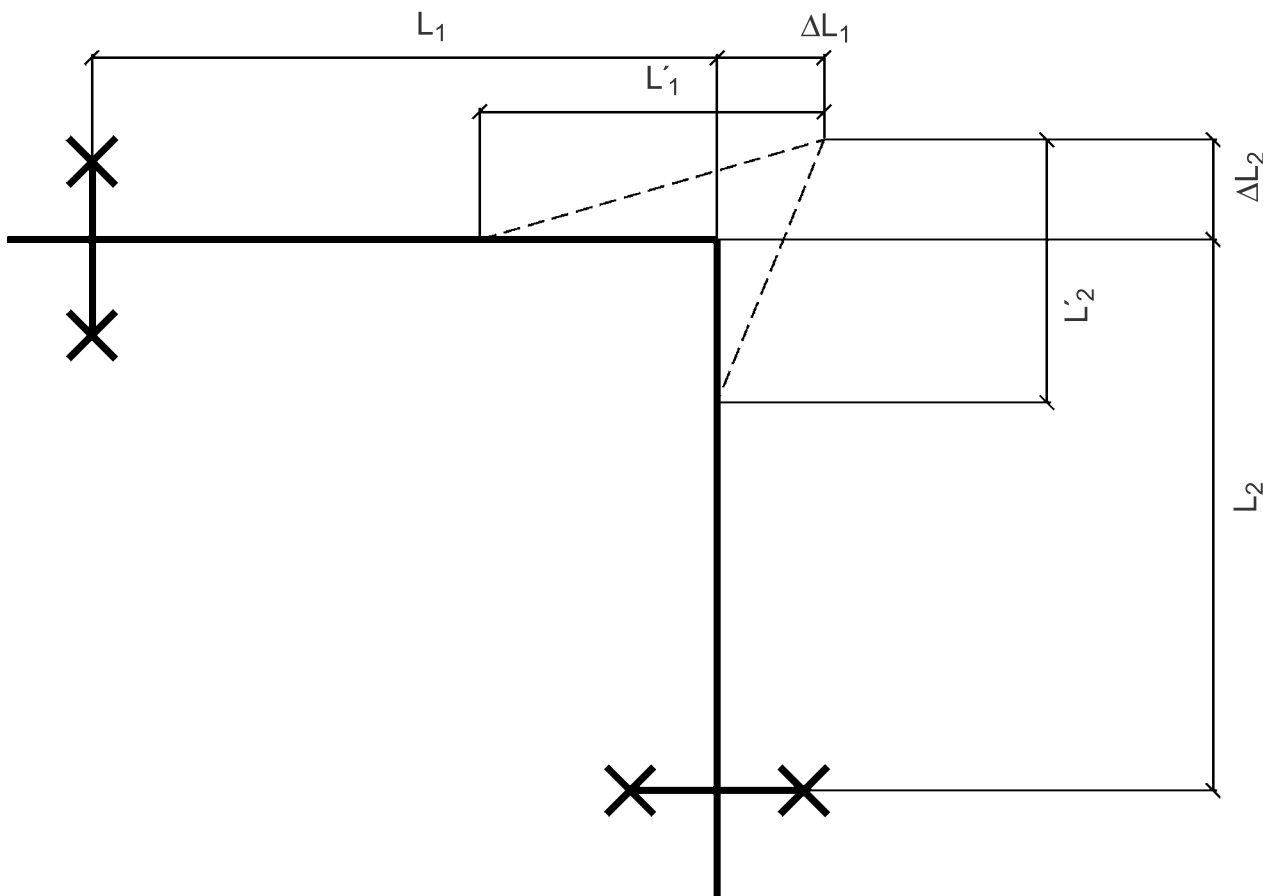


Рис. 11.1. Определение размеров компенсационных зон для компенсационных углов $\beta = 90^\circ$

L' - длина плеча компенсации,
 ΔL - удлинение.

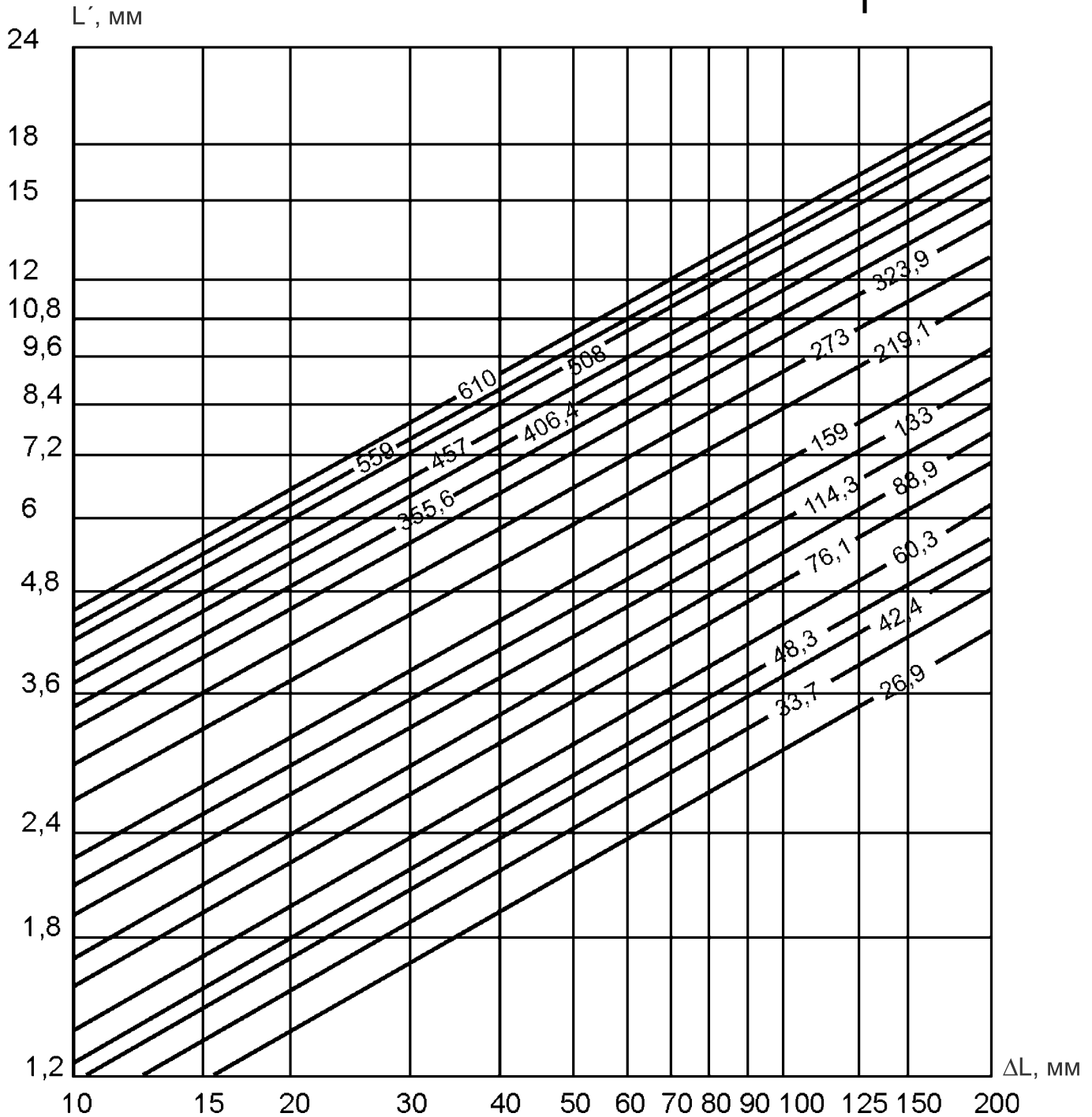
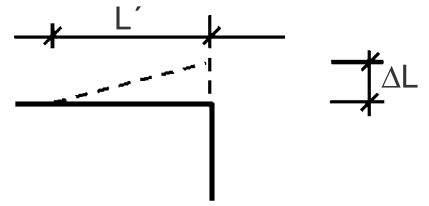


Рис. 11.2. Система Г - образная

Для компенсационных углов $45^\circ \leq \beta < 90^\circ$:

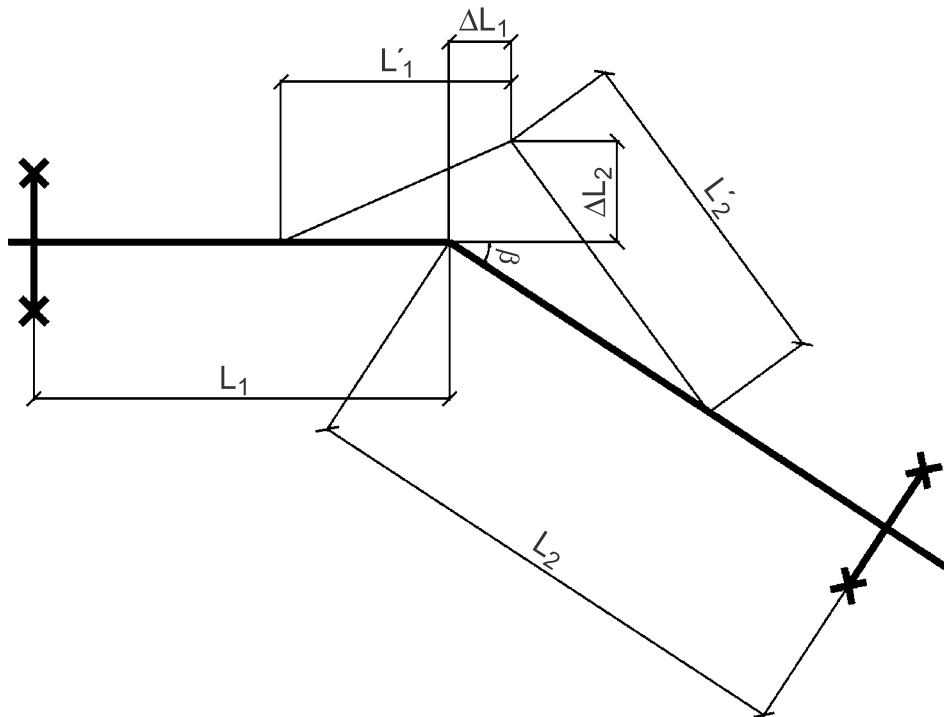


Рис. 11.3. Определение размеров компенсационных зон для углов $45^\circ \leq \beta < 90^\circ$

В этом случае длина плеча компенсации $L_{к1}$ и $L_{к2}$ (м) вычисляется с учетом приведенной длины перемещений, определяемых по формулам:

$$\omega_1 = \frac{\Delta L_1}{\text{tg}\beta} + \frac{\Delta L_2}{\sin\beta} \quad (11.3)$$

$$\omega_2 = \frac{\Delta L_1}{\sin\beta} + \frac{\Delta L_2}{\text{tg}\beta} \quad (11.4)$$

$$L_{к1} = 1,2 \sqrt{\frac{1,5E_m}{\sigma_{доп}}} \sqrt{D_n \cdot \omega_2} \quad (11.5)$$

$$L_{к2} = 1,2 \sqrt{\frac{1,5E_m}{\sigma_{доп}}} \sqrt{D_n \cdot \omega_1} \quad (11.6)$$

Для углов $8^\circ \leq \beta < 45^\circ$ применение Г - образной системы компенсации не желательно. Обращаем внимание, что эти углы являются некомпенсационными. Наилучшим решением является замена этих углов нетиповой компенсацией или обеспечение защиты этих углов от перегрузок установкой неподвижных опор.

Z-образная компенсация Длина плеча компенсации L_z вычисляется по формуле:

$$L_z = \sqrt{\frac{1,5E_m}{\sigma_{доп}} \sqrt{D_n \cdot \Delta L}}, \quad (11.7)$$

где ΔL - суммарное удлинение участков трубопроводов L_1 и L_2 Z-образной системы компенсации, м.

Длина плеча компенсации L_1 (м), участков трубопроводов длиной L_1 и L_2 вычисляется по формуле:

$$L_1 = 0,1 \sqrt{D_n \cdot L_z}. \quad (11.8)$$

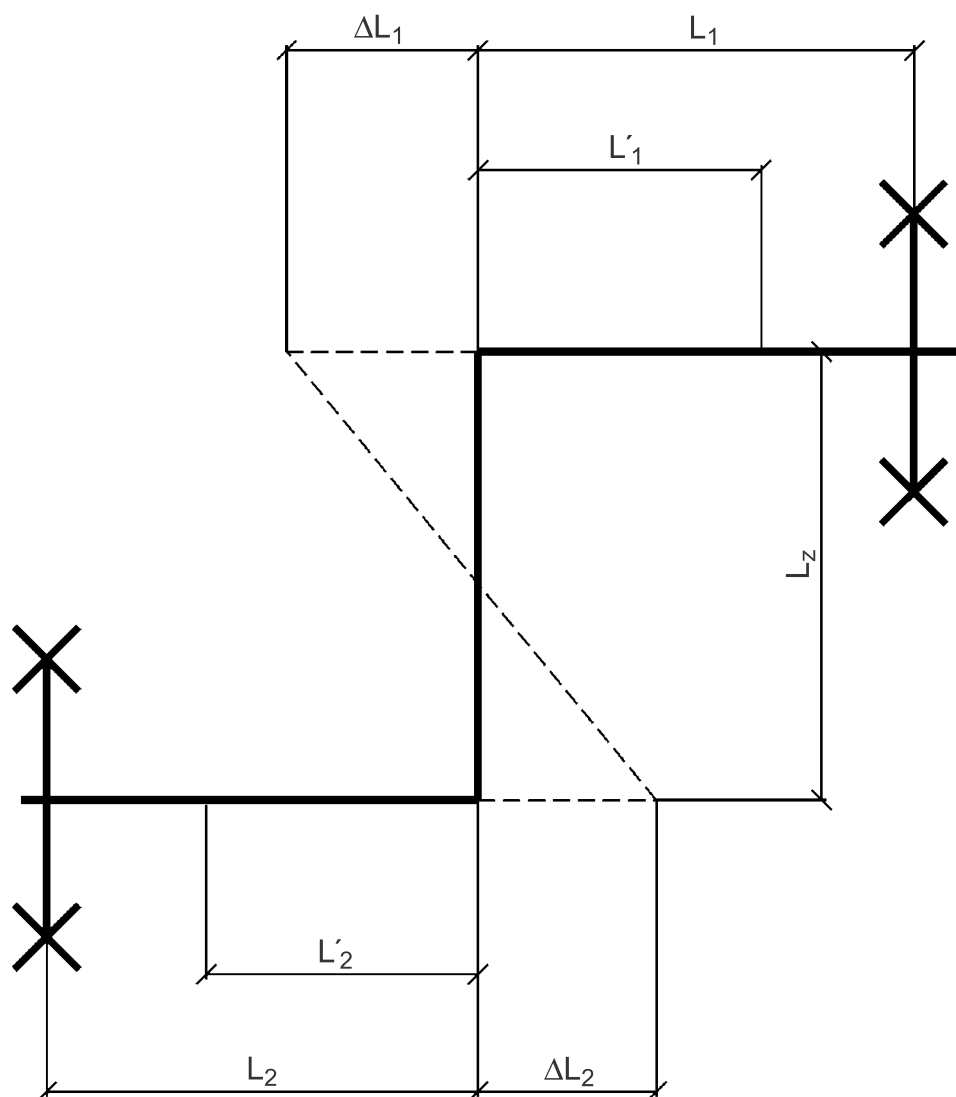


Рис. 11.5. Определение размеров компенсационных зон для Z-образных компенсаторов

L_z - длина плеча компенсации,
 ΔL - удлинение.

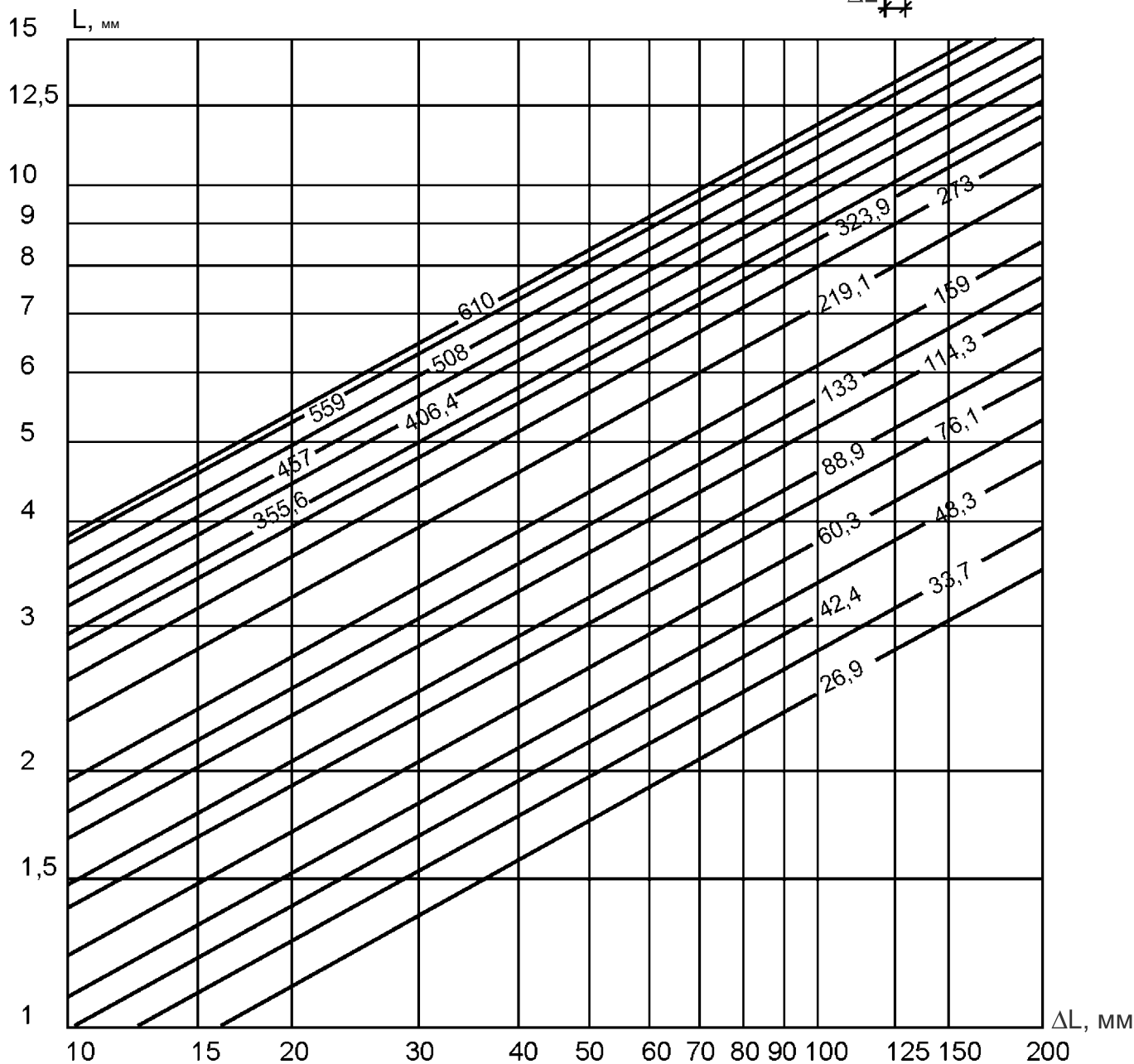
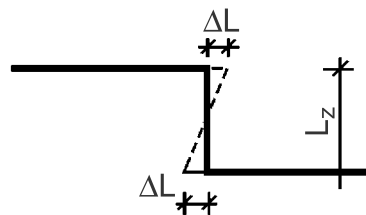


Рис. 11.4. Система Z - образная

П - образная компенсация

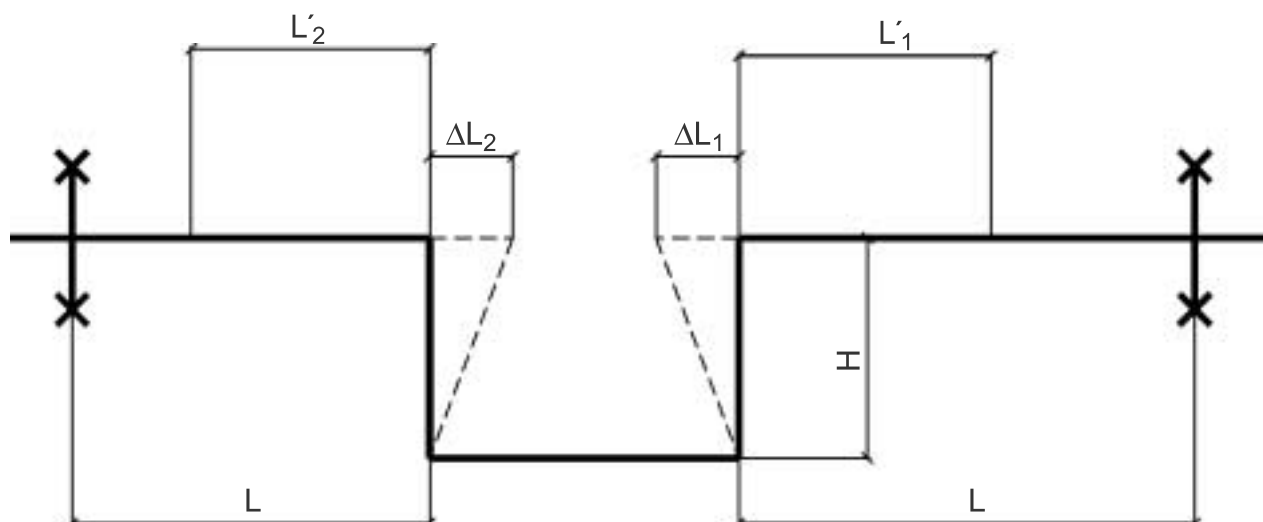


Рис. 11.7. Определение размеров компенсационных зон для П - образных компенсаторов

Длина плеча компенсации H определяется по формуле:

$$H = 0,7 \sqrt{\frac{1,5E_m}{\sigma_{доп}}} \sqrt{D_n \cdot \Delta L}, \quad (11.9)$$

где ΔL - суммарное удлинение участков трубопроводов L_1 и L_2 П-образной системы компенсации, м. Длина плеча компенсации L_1 (м), вычисляется по формуле:

$$L'_1 = 0,1 \sqrt{D_n \cdot H}. \quad (11.10)$$

Длину плеча компенсации Ц (м), можно определить по номограмме (рис.11.6).

Нетиповая компенсация

В случаях, когда необходимо выполнить изменение направления трассы в пределах углов от 8° до 45° , применяется так называемая нетиповая компенсация, которая состоит в замене некомпенсационных углов на искусственные компенсаторы. Примеры таких решений показаны ниже:

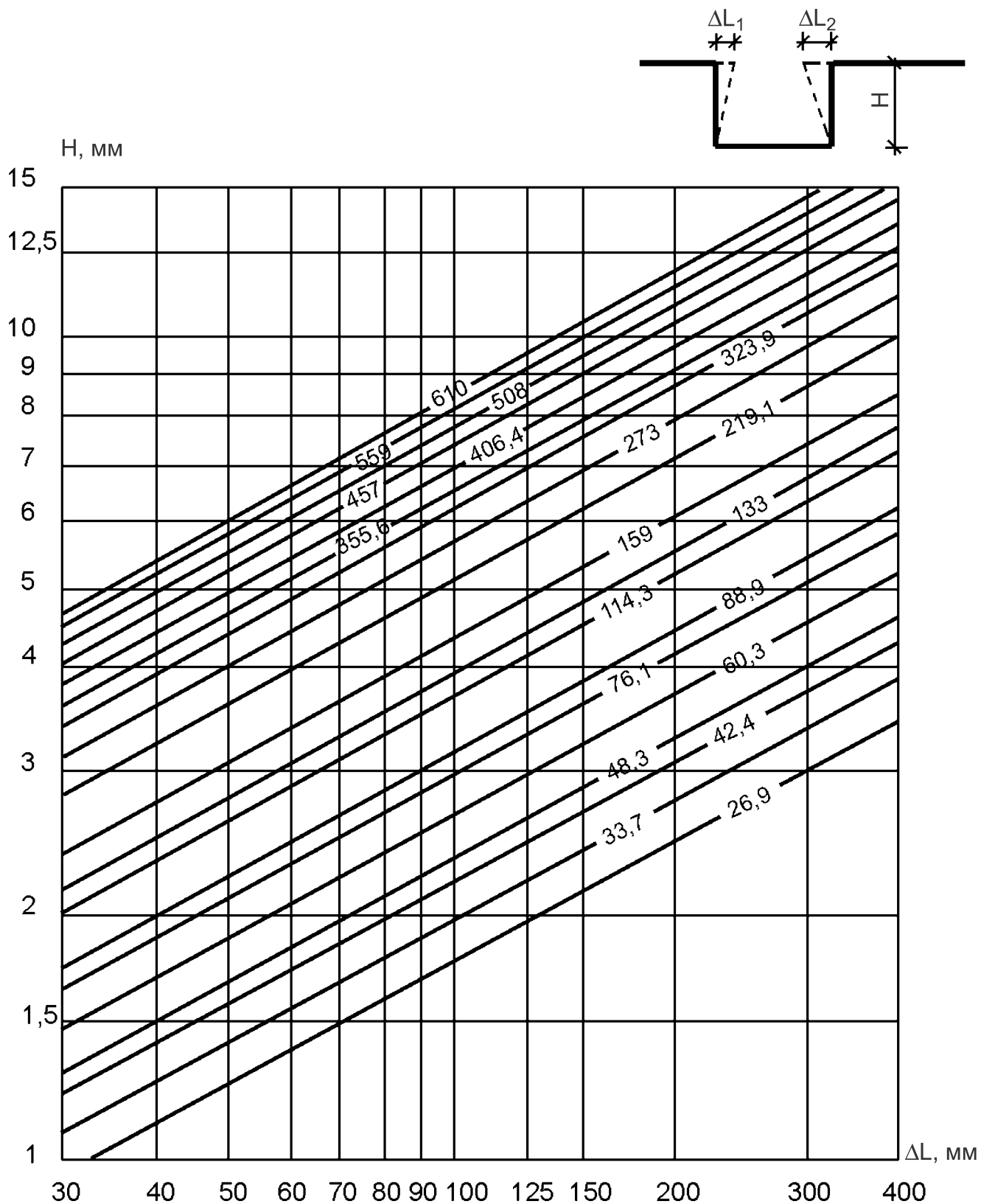


Рис. 11.6. Система П - образная

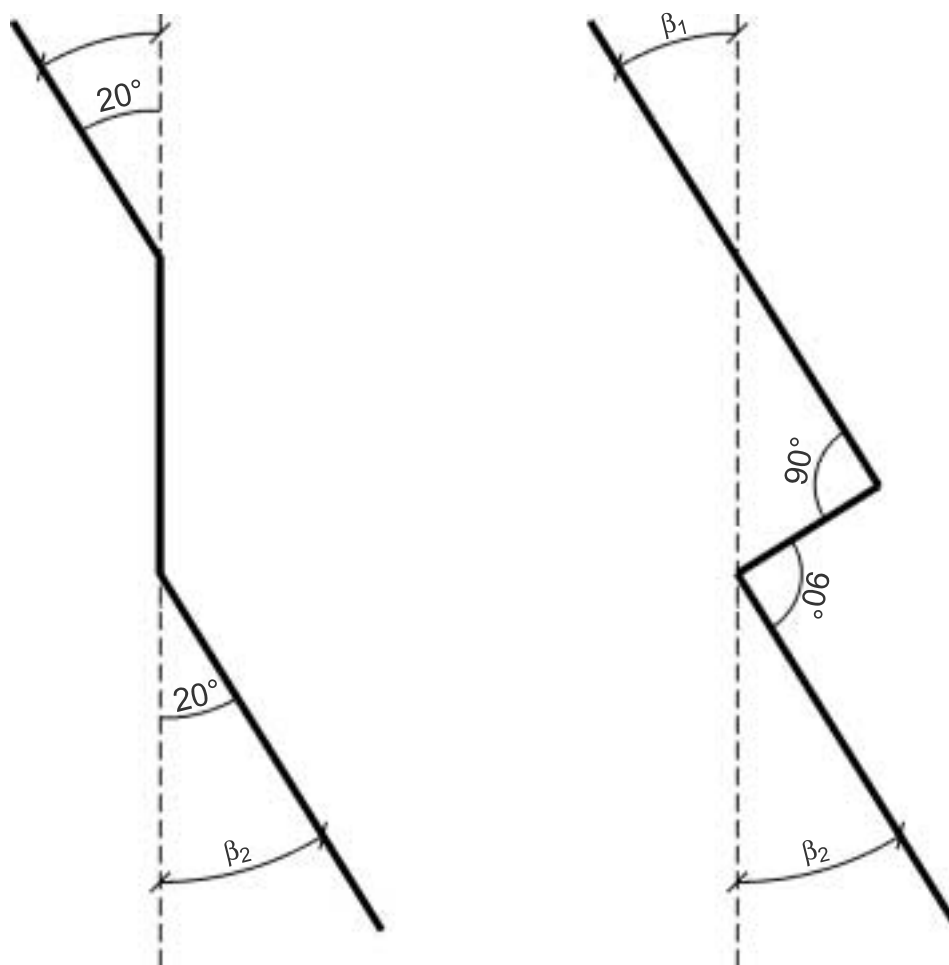


Рис. 11.8. Пример замены угла поворота от 10° до 45° на типовую компенсацию
 В данном случае замена должна трактоваться как два Г - образных участка компенсации.

В случае, как на рис. 11.9, необходимо, чтобы размер плеча L_2 был несколько больше, чем требует размер, необходимый для компенсации перемещений участка L_1 . Плечо L_3 должно иметь длину от 6 до 12 м и компенсировать перемещение свободного конца участка L_2 . Кроме того, длина участка должна быть не больше, чем половина суммарной длины участков $L_4 + L_5$:

$$L_1 \leq \frac{L_4 + L_5}{2}. \quad (11.11)$$

Устройство физической неподвижной опоры в этом случае является обязательным. Наилучшим вариантом решений является устройство замен как на рис. 11.10.

Но во всех случаях такие замены нужно трактовать только как комбинацию Г - образных участков компенсации и каждое более короткое плечо должно воспринимать удлинение более длинного плеча. Необходимость устройства физических или наличие условных неподвижных опор зависит от конкретной конфигурации трассы.

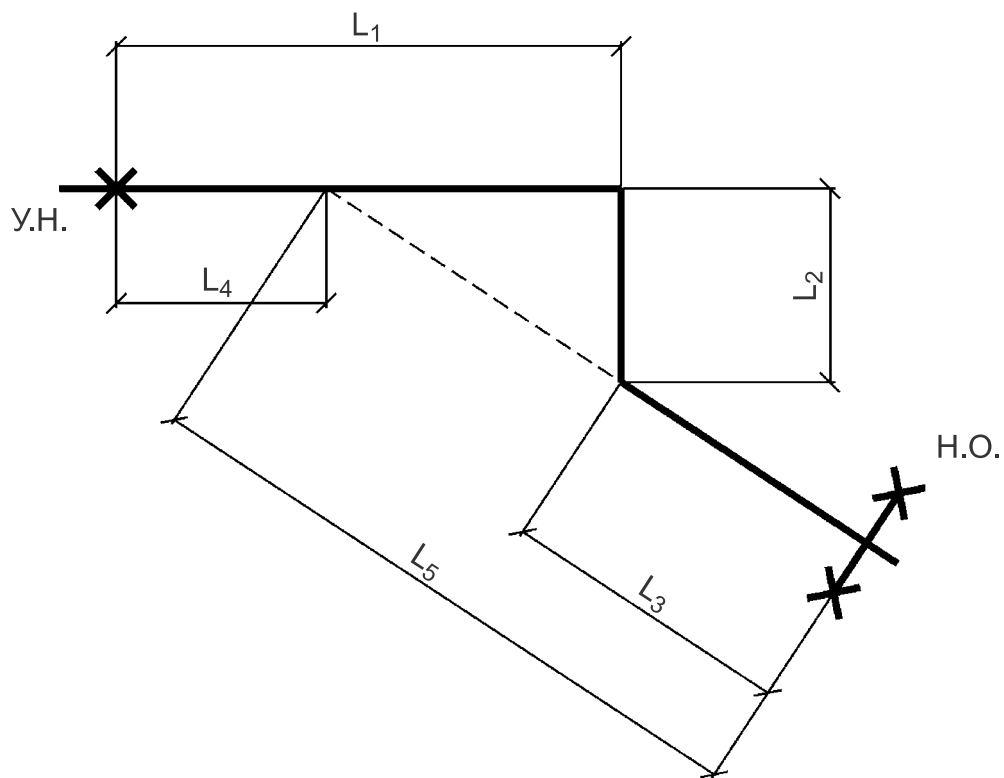


Рис. 11.9. Пример замены угла поворота от 10° до 45° на два Г - образных участка

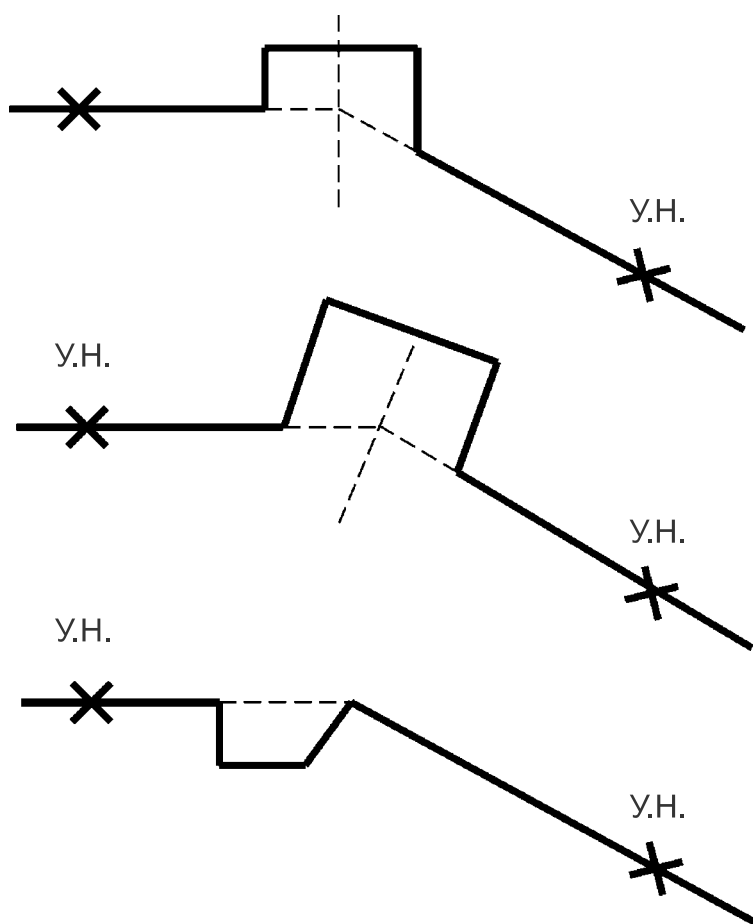


Рис. 11.10. Пример замены угла поворота от 10° до 45°

Осевая компенсация

Кроме гибкой компенсации при бесканальной прокладке применяется осевая компенсация. К осевым компенсаторам относятся сильфонные компенсаторы. Они поставляются в полностью изолированном виде и не требуют дополнительных изоляционных работ на монтажной площадке.

Обычно компенсатор монтируется в середине участка трубопровода, который компенсируется. Прямые участки, которые прилегают к компенсатору, должны быть не меньше 12 м, но не больше L_{max} , которая определяется по формуле:

$$L_{max} = L_{mp}^{max} - \frac{F_k}{f_{mp}} \quad (11.7)$$

где F_k - реакция сильфонного компенсатора,
 f_{mp} - удельная сила трения.

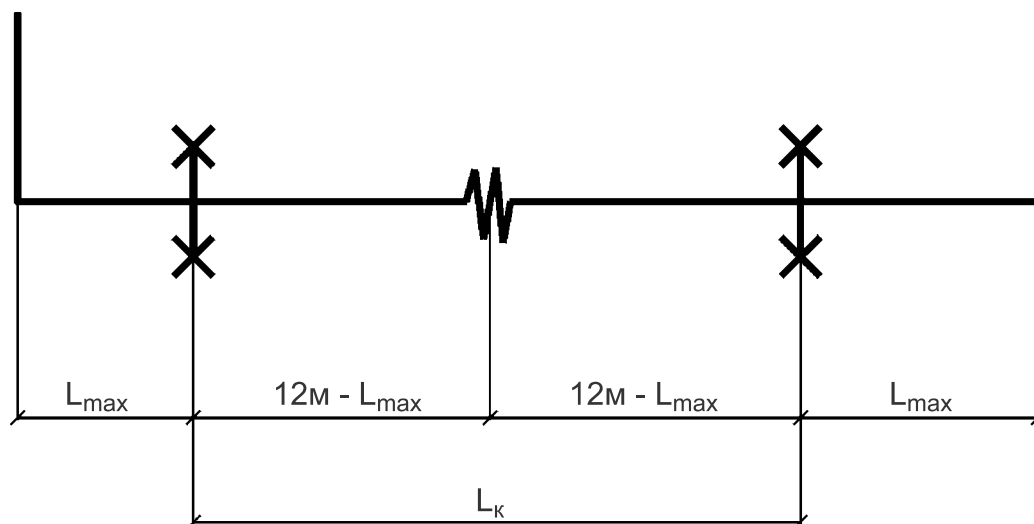


Рис. 11.11. Устройство сильфонного компенсатора

Установка физических неподвижных опор между сильфонными компенсаторами не требуется. При переходе с осевой компенсации на радиальную, когда сильфонный компенсатор граничит с участком самокомпенсации, необходимо установление физической неподвижной опоры.

Дополнительные компенсаторы

Если естественные компенсаторы теплотрассы и известные методы строительства теплотрасс не обеспечивают уровень напряжений в пределах допустимых, то необходимо устанавливать дополнительные компенсаторы.

Оптимальный вариант - это применение стартовых компенсаторов.

Стартовый компенсатор отличается от других компенсаторов тем, что выполняет свою функцию только один раз, при первом разогреве трубопровода, после чего производится его фиксация сварным швом, и компенсатор превращается в отрезок обычной трубы. Основным условием для определения места установки стартового компенсатора остается, как и прежде, условие $5 < \pm 150 \text{ Н/мм}$. В данном случае, однако, выполнить это условие удастся не всегда. Рассмотрим этот вопрос на отдельных примерах.

Пример 1. Предположим, что мы имеем прямолинейный участок трубопровода, на концах которого установлены неподвижные опоры (рис. 11.12).

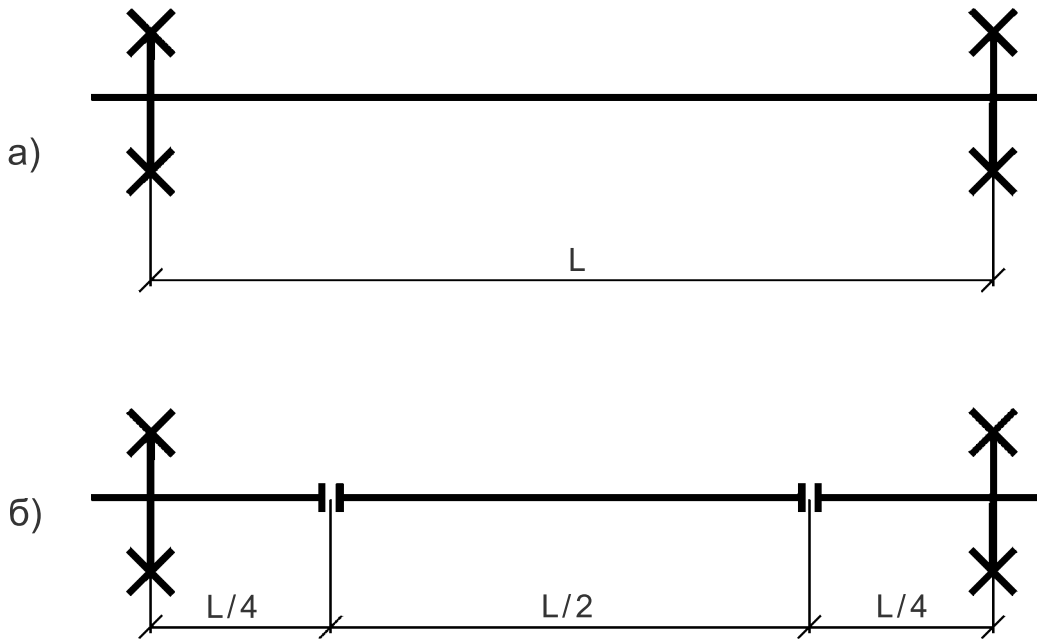


Рис. 11.12

Расчетная температура теплоносителя $T = +130^{\circ}\text{C}$.

Температура монтажа $T = +10^{\circ}\text{C}$.

При засыпке траншеи при температуре T осевые напряжения в трубопроводе $\sigma_x = 0$, а при последующем разогреве трубопровода до $T_{\text{расч}} = +130^{\circ}\text{C}$ в материале стальной трубы развиваются температурные напряжения σ_x , величина которых составляет $\sigma_x = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 2,08105 \cdot 12 \cdot 10^6 \cdot 120 = 300 \text{ Н/мм}$, что существенно превышает предел текучести материала стальных труб. Этот пример показывает, что при колебаниях температуры трубопровода в процессе его эксплуатации между $+10^{\circ}\text{C}$ и $+130^{\circ}\text{C}$, осевая компонента напряжения изменяется от нуля до 300 Н/мм . Поэтому наилучшие условия для работы трубопровода будут обеспечены, если осевые напряжения в трубопроводе будут равны нулю ($\sigma_x = 0$) при температуре трубопровода, составляющей половину заданного интервала, т. е. при $T = (10 + 130)/2 = 70,^{\circ}\text{C}$. В этом случае при разогреве трубопровода от $+70^{\circ}\text{C}$ до рабочей температуры $+130^{\circ}\text{C}$ осевые напряжения в трубе будут сжимающими и равными $\sigma_x = -150 \text{ Н/мм}$, а при охлаждении трубопровода от $+70^{\circ}\text{C}$ до $+10^{\circ}\text{C}$ осевые напряжения будут растягивающими и равными $\sigma_x = 150 \text{ Н/мм}$. Стартовые компенсаторы используются в схемах, подобных приведенным на рис. 11.12, для обеспечения именно таких условий работы трубопровода. Это достигается в том случае, когда стартовый компенсатор поглощает половину удлинения трубопровода, которое имело бы место при разогреве незакрепленного неподвижными опорами и грунтом трубопровода от температуры $+10^{\circ}\text{C}$ до $+130^{\circ}\text{C}$. Указанная величина удлинения трубопровода вычисляется по формуле (10.1), в которую надо поставить длину L трубопровода между неподвижными опорами и величину $\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$, т. е. $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot (T_{\text{расч}} - T_{\text{монт}})/2$. Далее необходимо решить вопрос о том, какое количество стартовых компенсаторов требуется для поглощения вычисленной величины ΔL , и как расположить эти компенсаторы на трубопроводе. Заметим, что при установке стартовых компенсаторов допускают нарушение условия $\delta_{\text{э}} < \delta_t$ при первом разогреве трубопровода и нескольких последующих циклах разогрев - охлаждение, где δ_t - предел текучести стали. В процессе этих циклов осевая компонента напряжения выравнивается по длине трубопровода и в пределе стремится

к значению $8 < \pm 150 \text{ Н/мм}^2$. При определении числа компенсаторов необходимо принять некоторое предельное значение для $\delta_{x(\text{МОНТ})}$, выше которого трубопровод нагружаться не будет, а также учитывать компенсирующую способность компенсатора и максимальное значение температуры $T_{\text{МОНТ}}$, до которой реально может быть разогрет трубопровод на стройплощадке. Подбор числа стартовых компенсаторов производится в следующей последовательности:

1. Сначала по формуле $\Delta L = \alpha \cdot L \cdot (T_{\text{расч}} - T_{\text{МОНТ}})/2$ вычисляем величину удлинения трубопровода, которую должны поглотить стартовые компенсаторы, и проверяем условие: $\Delta L_{\text{сильф}} > \Delta L$.

2. Если компенсирующая способность одного стартового компенсатора недостаточна для поглощения удлинения трубопровода $\Delta L_{\text{сильф}} > \Delta L$, принимаем для расчета один стартовый компенсатор и располагаем его в средней точке трубопровода между опорами. Далее для каждого из двух участков трубопровода, разделенного стартовым компенсатором, вычисляем силу трения $f_{\text{тр}}$, действующую на один метр длины трубопровода по формуле (9.2), и величину нагрева трубопровода, которая требуется для достижения перемещения точки трубопровода в месте установки компенсатора на величину $\Delta L/2$. Для вычисления ΔT необходимо использовать формулу (10.10) в которую вместо ΔL_3 следует подставить половину вычисленного в п. 1 значения ΔL , т. е. $\Delta L/2$.

3. Сравниваем полученное значение ΔT с реальными возможностями по разогреву трубопровода при монтаже, т. е. проверяем условие $\Delta T \leq \Delta T_{\text{МОНТ}}$. Если это условие не выполнено, т. е. реальная возможность разогреть трубопровод до такой температуры отсутствует, необходимо увеличить число стартовых компенсаторов. Если техническая оснащенность строительной организации позволяет выполнить такой разогрев, то далее следует проверить, превышает или нет расчетное напряжение σ_x величину $\alpha_{x(\text{МОНТ})}$, т. е. должно быть $\alpha_x < \alpha_{x(\text{МОНТ})}$. Для вычисления используется формула (8.3). Если это условие не выполнено, необходимо увеличить число стартовых компенсаторов.

4. Если хотя бы одно из условий $\Delta L_{\text{сильф}} > \Delta L$, $\Delta T \leq \Delta T_{\text{МОНТ}}$, $\sigma_x < \sigma_{x(\text{МОНТ})}$ не выполнено, принимаем два стартовых компенсатора. При этом компенсаторы располагаем так, как показано на рис. 11.12(б) и повторяем расчет по схеме п. 2.3. Если оба стартовых компенсатора имеют одинаковую компенсирующую способность, то, учитывая симметрию участка, все вычисления можно выполнить только для одного компенсатора.

Если необходимо установить более двух стартовых компенсаторов или компенсаторы имеют различный ход, то места их установки подбираются расчетом до тех пор, пока не будут выполнены все три условия, приведенные выше.

Пример 2. Рассмотрим теперь схему расчета стартовых компенсаторов для прямолинейного участка без установки неподвижных опор (рис. 11.13).

Здесь также необходимо стремиться к достижению условия $8 < \pm 150 \text{ Н/мм}^2$, а также учитывать условия $\Delta L_{\text{сильф}} > \Delta L$, $\Delta T \leq \Delta T_{\text{МОНТ}}$.

Отрезок трубопровода (рис. 11.13) между точками 1 и 2 содержит два участка длиной $L_{\text{мах}}$, прилегающие к точкам 1 и 2. При изменениях температуры теплоносителя величина осевых напряжений на этих участках не превышает $8 < \pm 150 \text{ Н/мм}^2$. Если длина участка между точками 1 и 2 превышает $2 L_{\text{мах}}$, т. е. $L > 2 L_{\text{мах}}$, то на участке между точками а и в осевые напряжения превысят величину σ_x , т. е. $\delta_x < \pm 150 \text{ Н/мм}^2$. Для того, чтобы после установки стартовых компенсаторов уровень осевых напряжений на этом участке после нескольких циклов разогрев - охлаждение стремился к величине $\delta_x < \pm 150 \text{ Н/мм}^2$, необходимо обеспечить такие условия монтажа стартовых компенсаторов, при которых стартовые компенсаторы поглотили бы половину удлинения участка ab при его разогреве от $+10^\circ\text{C}$ до $+130^\circ\text{C}$.

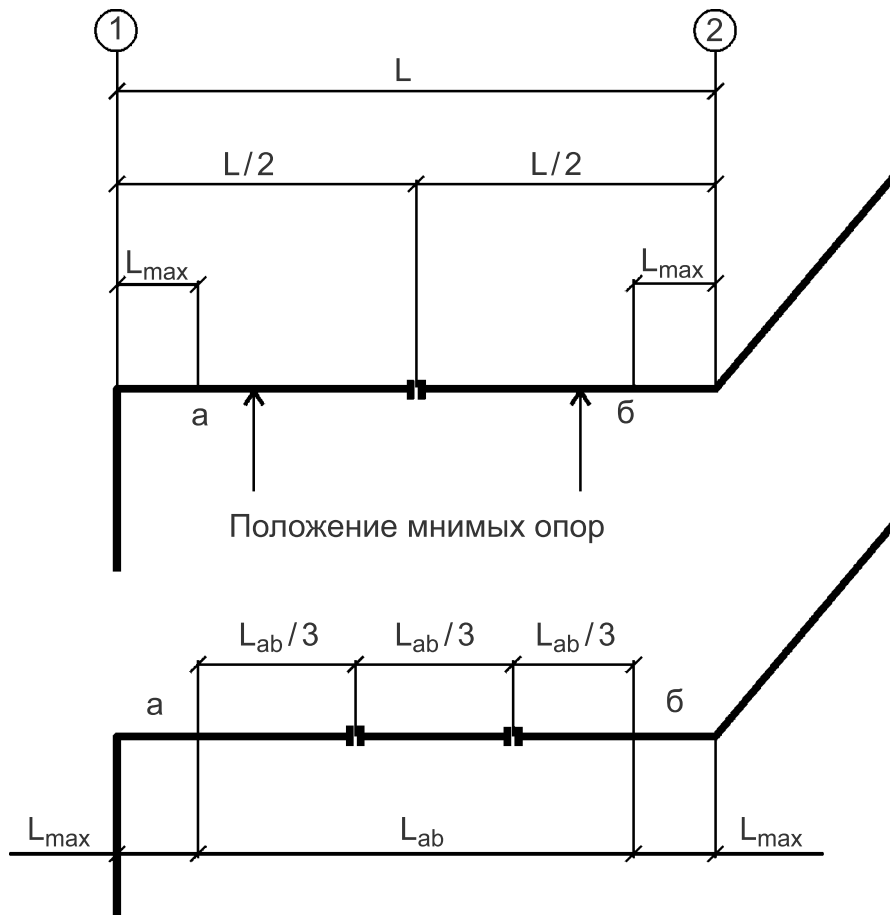


Рис. 11.13. Схема установки стартовых компенсаторов без неподвижных опор

Схема расчета стартовых компенсаторов такая же, как и при их установке между двумя неподвижными опорами.

Пример расчета стартового компенсатора

Данные для расчета: расстояние между опорами $L = 96$ м, диаметр стальной трубы $DN = 159$ мм, толщина стенки $\delta = 4,5$ мм, диаметр полиэтиленовой оболочки $D_{об} = 250$ мм, глубина заложения трубопровода $h = 1,2$ м, расчетная температура $T_{расч} = +130^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха при монтаже теплотрассы $T_{монт} = +10^\circ\text{C}$.

Требуется определить величину удлинения трубопровода, которую должен поглотить стартовый компенсатор, т. е. определить настройку компенсатора перед его монтажом на трубопроводе.

Во-первых, требуется определить величину L_{max} для того, чтобы убедиться в том, что одного стартового компенсатора в данном случае будет достаточно. Воспользуемся формулой для L_{max} :

$$L_{max} = \frac{150 \cdot S_{cm}}{f_{mp}}$$

В которой S_{cm} - площадь поперечного сечения стенки стальной трубы, f_{mp} - сила трения, возникающая между оболочкой и грунтом. Тогда получим:

$$S_{cm} = \pi \cdot \delta \cdot (DN + D_{об})/2 = \pi \cdot 4,5(159 + 250)/2 = 2184 \text{ мм}^2, f_{mp} = 0,75 \cdot \pi \cdot \mu D \cdot \rho \cdot g \cdot h = 0,75 \cdot \pi \cdot 0,40,250 \cdot 18009,81 \cdot 1,2 = 4993 \text{ Н/м},$$

$$L_{max} = 1502184 / 4993 = 65,6 \text{ м}$$

Отсюда видно, что расстояние от опоры до компенсатора может составлять не более 65,6 м. В нашем случае при установке стартового компенсатора в средней точке

участка между опорами это расстояние составляет 48 м, что заведомо меньше величины L_{\max} . При заданных температурных условиях величина удлинения трубопровода, которую должен поглотить стартовый компенсатор, определяется по формуле:

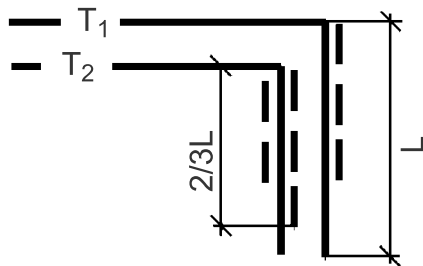
$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T$, где α - коэффициент температурного расширения стали,
 L - длина прямолинейного участка трубопровода между опорами, $\Delta T = 60^\circ\text{C}$.

Подставляя численные значения величин, входящих в эту формулу, получим:

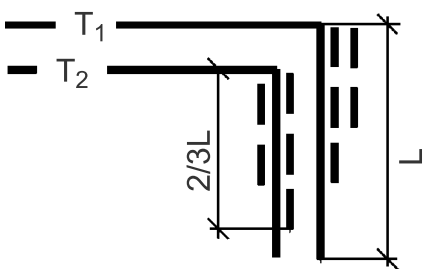
$$\Delta L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 96 \cdot 60 = 0,069 \text{ м или } \Delta L = 69 \text{ мм.}$$

Компенсационные зоны

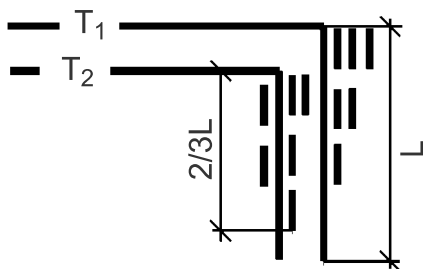
При изменениях температуры теплоносителя необходимо обеспечить расчетные перемещения плеч Г-образных, П-образных, Z-образных компенсаторов, засыпанных грунтом. Для этой цели ООО «Сармат» предлагает использовать подушки из вспененного полиэтилена. Низкое сопротивление сжатию этого материала гарантирует свободное перемещение компенсирующих плеч и нормальную работу трубопроводов. В то же время трубопроводы должны быть обсыпаны песком по всей ширине траншеи. Схема установки подушек показана на рис. 11.14. Количество подушек, устанавливаемых по диаметру трубопровода, определяется расчетной величиной перемещения компенсатора и допустимой величиной сжатия материала подушки. Сжатие подушек, применяемых ООО «Сармат», составляет - 50%. Количество подушек, устанавливаемых по длине компенсирующего плеча, должно обеспечивать покрытие 2/3 длины плеча. Перемещение компенсатора величиной 10 мм и менее не требует применения компенсирующих подушек.



10мм < ΔL < 20мм - один слой амортизирующих подушек



20 мм < ΔL < 40 мм два слоя амортизирующих подушек

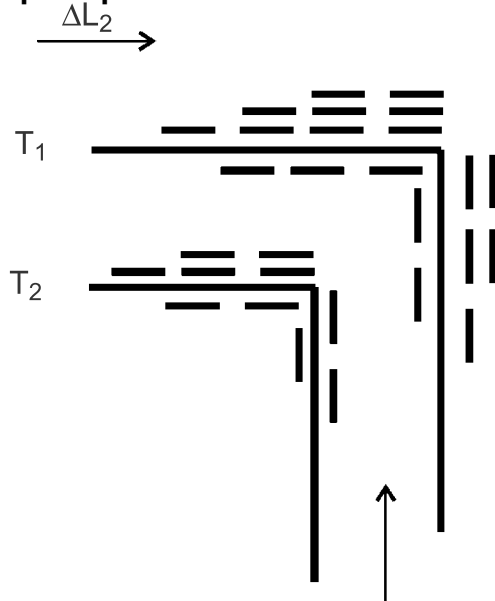


40 мм < ΔL < 60 мм три слоя амортизирующих подушек

Рис. 11.14 Схема установки подушек

Применение материалов, которые требуют встраивания более трех слоев компенсации, не рекомендуется.

Пример



$\Delta L1 = 45 \text{ мм}$
 $L_{\text{комп}} = 5,8 \text{ М}$
 $\Delta L2 = 30 \text{ мм}$ $L_{\text{комп}} = 4,5 \text{ М}$
 $1000 \times 250 \times 40 = 29 \text{ шт}$
 $5,8 : 3 \times 2 = 3,8 \text{ м} \approx 4 \text{ м}$
 (принимая 4 шт матов, для $L_{\text{комп}}$)
 $45 : 20 = 2,5 \approx 3 \text{ слоя}$

Рис. 11.15
12. Неподвижные опоры

12.1. Условная неподвижная опора

Определение условной неподвижной опоры заключается в правильном нахождении места между двумя свободными концами участка, в котором отсутствует перемещение трубы под влиянием изменения температуры. Условная неподвижная опора на прямом участке трубопровода образуется в таком месте, где наступает равновесие сил трения между грунтом, трубой и силами, возникающими от влияния температуры. Не сложно определить место образования условной неподвижной опоры, когда участок уложен параллельно к уровню земли. В этом случае условная неподвижная опора будет находиться посередине между свободными концами участка. Очевидно, что условием является однородность засыпки грунтом всего участка рельефа:

$$L_{\text{ун}} = \frac{L}{2}. \quad (12.1)$$

Очевидно, что найденное расстояние не может превышать L_{max} .

При нелинейном изменении рельефа место нахождения условной неподвижной опоры можно с достаточной точностью определить при помощи средней величины глубины заложения трубопровода.

В случае, когда расстояние между свободными концами превышает $2L_{\text{max}}$, применение условных опор недопустимо. В этом случае необходимо изменить геометрию сети или применить прокладку с физическими (реальными) опорами.

12.2. Физическая (реальная) неподвижная опора

Одним из преимуществ бесканальной прокладки является возможность изъятия физических неподвижных опор в отличие от трасс канальной прокладки с аналогичной

конфигурацией. Как известно, неподвижная опора ограничивает три степени свободы трубы. В трубопроводе, который заключен в грунт, две степени свободы ограничены. Грунт сам «следит» за распределением компенсационных участков путем образования условных неподвижных опор, которые фактически являются местом уравнивания сил, действующих на трубопровод.

Существуют такие случаи, когда невозможно обойтись без физической неподвижной опоры:

1. При выполнении угла поворота трассы на угол от 10° до 45° .
2. На вводах в здания в том случае, когда прямолинейный участок трубопровода, непосредственно входящий в здание, имеет длину более 10 м.
3. При переходе диаметров на прямых участках с целью защиты участка с меньшим диаметром трубы (рис. 12.1).

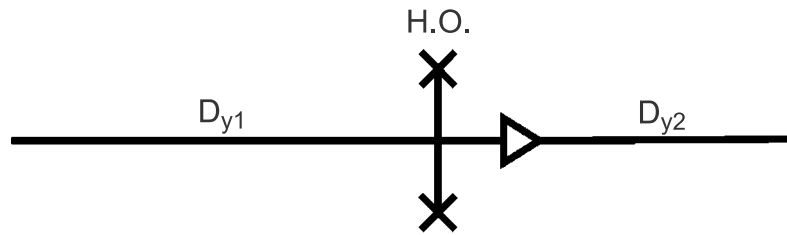


Рис. 12.1

В этом случае при разнице диаметров больше чем на один типоразмер необходимость установки неподвижной опоры проверяется расчетом. При разнице диаметров на один типоразмер неподвижная опора не применяется, но рекомендуем проверять такие ситуации расчетом при конкретных условиях.

4. Для защиты трубопроводов при комбинации осевой и радиальной компенсации (рис. 12.2, рис. 12.3).

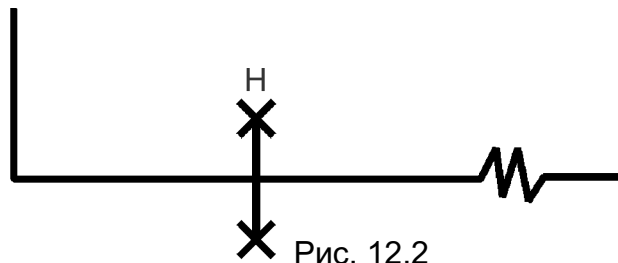


Рис. 12.2

N - количество компенсаторов

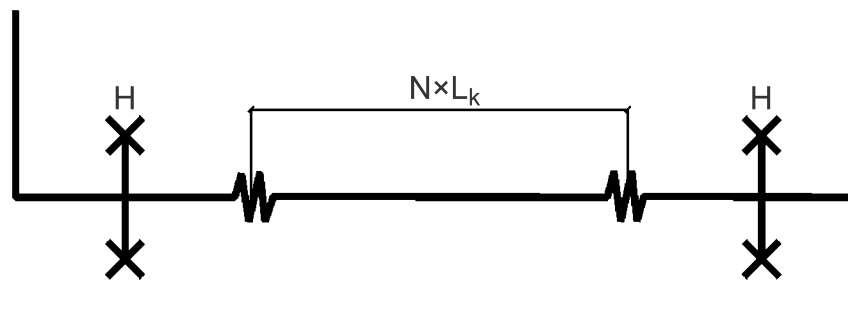
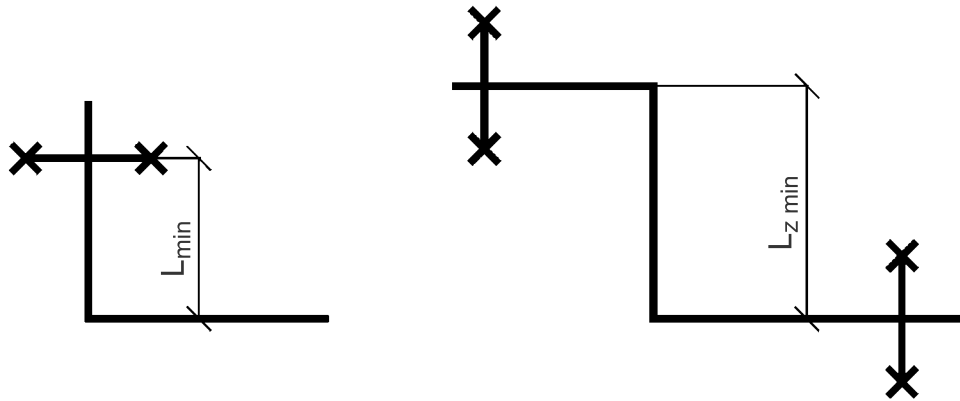


Рис. 12.3

5. Для защиты малых компенсационных плеч при радиальной компенсации (рис.



6. Защита трубопроводов традиционной канальной прокладкой при комбинации с бесканальной (рис. 12.5).

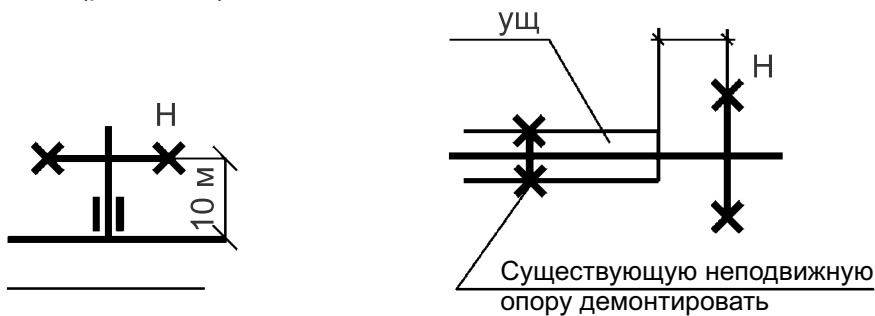


Рис. 12.5

7. На ответвлении от основного теплопровода, выполненного с помощью тройника прямого или углового (рис. 12.6).

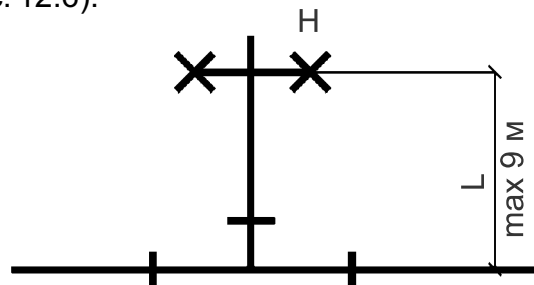


Рис. 12.6

Физическая неподвижная опора представляет собой специальный элемент заводского изготовления, который бетонируется при монтажных работах. Размеры бетонного блока и его армирование рассчитываются проектантом-строителем на основании силы, которая воздействует на неподвижную опору, грунтовых условий и других факторов, которые зависят от конкретных условий прокладки. Было бы ошибкой давать конкретные размеры таких блоков в данной работе. Правильное определение сил, воздействующих на неподвижные опоры, является основой при разработке бетонного блока для конкретных условий. Конечно, фирмы-производители предварительно изолированных трубопроводов дают размеры бетонных блоков, которые рассчитаны на восприятие максимальной силы, обусловленной допустимым напряжением в стальной трубе в месте устройства неподвижной опоры. Данная конструкция может воспринять усилие от участка длиной L_{max} при каком-то расчетном удельном весе грунта. При практическом проектировании такое соотношение является редким. Силы, которые воздействуют

а неподвижные опоры, обычно меньше максимальных, и применение блоков с максимальными расчетными параметрами приводит к перерасходу бетона и арматуры и часто не отвечает конкретным условиям.

В таблице 12.1 для примера приведены наиболее распространенные случаи установки физических неподвижных опор с формулами для определения действующих сил. При составлении таблицы учтены следующие ограничения:

- трубопровод по обе стороны от опоры находится в одинаковых грунтовых условиях;
- длины участков по обе стороны от опоры отвечают основам формирования геометрии трассы из предварительно изолированных трубопроводов и не превышают L_{max} .

Примеры 4 и 5 являются правильными для лучевых схем. Для кольцевых схем силы трения с обеих сторон суммируются.

В случае, когда сила F_x превышает силу, которую может выдержать опора заводского изготовления, следует изменить проектное решение по конфигурации трубопровода. Следует также отметить, что неподвижная опора заводского изготовления рассчитана на условия восприятия силы в границах опор от длины участка, не превышающей L_{max} .

Таблица 12.1. Примеры расчета сил, действующих на опоры.

	Геометрия трубопровода	Составляющие сил
1		$F_x = F_{tp1} \times L_1 - 0,7(F_{tp2} \times L_2)$ $F_x = 0,7(F_{tp1} \times L_1) - F_{tp2} \times L_2$ $F_y = 0$
2		$F_x = F_k + F_{tp1} \times L_1 - 0,7(F_{tp2} \times L_2)$ $F_x = 0,7(F_k + F_{tp1} \times L_1) - F_{tp2} \times L_2$ $F_y = 0$
3		$F_x = F_{tp} \times L$ $F_y = 0$
4		$F_x = F_{tp1} \times L_1$ $F_x = F_{tp2} \times L_2$ $F_y = F_{tp3} \times L_3$
5		$F_x = F_k + F_{tp1} \times L_1$ $F_x = F_{tp2} \times L_2$ $F_y = F_{tp3} \times L_3$

13. Установка арматуры

Для тепловых сетей применяется теплогидроизолированная арматура с патрубками под сварку.

Запорная арматура может устанавливаться в камерах (колодцах), размеры которых указываются в проектах, или непосредственно в грунт под ковер - при применении шаровых кранов, эксплуатируемых по гарантиям заводов-изготовителей не менее 5 лет без ревизии.

Конструкция узлов управления должна обеспечивать максимальные удобства и безопасность эксплуатационного обслуживания, при условии надежности и долговечности смонтированного оборудования, изделий и строительных конструкций, для чего при проектировании необходимо руководствоваться следующими требованиями:

- шаровые краны ответвлений, спускников и воздушников должны располагаться от основных трубопроводов на минимальном расстоянии, определяемом габаритными размерами поставляемых фасонных деталей с заводской изоляцией;

- строительные конструкции узлов не должны препятствовать максимальным расчетным температурным перемещениям трубопроводов;

- строительные конструкции узлов не должны нагружать элементы трубопроводов.

- конструкция узлов должна обеспечивать визуальное определение положения арматуры (открыто-закрыто) с поверхности;

- для шаровых кранов $D_v < 150$ мм следует применять управление Т-образным ключом, при этом расстояние от верха управляющей головки до верхнего обреза люка должно быть в пределах 200-500 мм;

- для шаровых кранов $D_v = 200-350$ мм должны применяться переносные планетарные редукторы, при этом расстояние от верха управляющей головки крана до верхнего обреза люка должно быть в пределах 200-250 мм;

- для шаровых кранов $D_v > 400$ мм должны применяться герметичные стационарные редукторы, при этом расстояние от верха управляющей головки крана до верхнего обреза люка должно быть в пределах 200-500 мм;

- для всех типоразмеров шаровых кранов расстояние по горизонтали от оси управляющей головки до внутренней поверхности люка должно быть не менее 150 мм с учетом максимальных расчетных температурных перемещений;

- расстояние по вертикали от оси штока шарового крана воздушника до верхнего обреза люка должно составлять не более 500 мм, от соединительной муфтовой головки - не менее 200 мм;

- максимальная величина патрубка воздушника от основного трубопровода до шарового крана не должна превышать 400 мм;

- уровень песчаной засыпки внутри узлов управления должен быть на 200 мм ниже верха головок управления шаровых кранов, верха изоляции патрубков воздушников. Строительные конструкции должны исключать «замыв» грунтом вышеуказанный уровень песчаной засыпки;

- в спецификациях должна предусматриваться комплектация узлов управления Т-образными ключами, планетарными редукторами с переходным оборудованием, выбросными шлангами воздушников с патрубками и муфтами, штоковыми ключами воздушников по одной единице на типоряд применяемого оборудования на объекте и на 20 единиц однотипного оборудования.

14. Рекомендуемые методы прокладки

Подводя итог изложенным в предыдущих разделах принципам проектирования предварительно изолированных бесканальных трубопроводов тепловых сетей, можно дать некоторые рекомендации по использованию средств уменьшения напряжений возникающих в ведущей трубе.

Правильное проектирование тепловой сети не ограничивается только выбором компенсационных элементов, выбором и расположением неподвижных опор, компенсационных зон и т.д. При выполнении проектных работ необходимо предусмотреть все факторы, которые влияют на безаварийную работу тепловой сети, и принять решение, которое поможет уменьшить влияние этих факторов. Кроме того, необходимо предусмотреть защиту других типов прокладки и внутренних систем от влияния нагрузок со стороны бесканальных трубопроводов.

Изменения направления трассы

Как уже указывалось в вышеизложенных разделах, существуют ограничения в применении углов изменения направления трассы. Но довольно часто возникают ситуации, когда необходимо выполнить такое изменение и не существует никакой возможности для выполнения нетиповой компенсации. Для углов поворота $< 10^\circ$ это решается путем применения подрезки краев труб на сварных стыках.

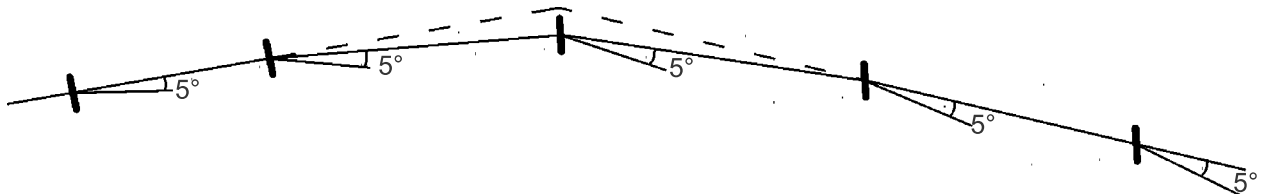


Рис. 14.1

Максимальные углы подрезки - 5° . В этом случае этот участок трактуется как прямая труба

Ответвление трубопроводов

Важную роль для безаварийной работы теплопроводов играет правильность проектирования ответвления. При этом необходимо учитывать как безопасность основного трубопровода, так и трубопровода ответвления.

В бесканальных тепловых сетях для выполнения ответвления применяются тройники заводского изготовления трех типов:

- Тройник прямой
- Тройник угловой
- Тройник параллельный.

При проектировании ответвления бесканальных трубопроводов необходимо руководствоваться следующими принципами:

1. Диаметр ответвления не может быть больше основного трубопровода.
2. Если необходимо выполнить ответвление $D_{y1} \geq D_{y2} \geq D_{y3}$, то это делается следующим образом:

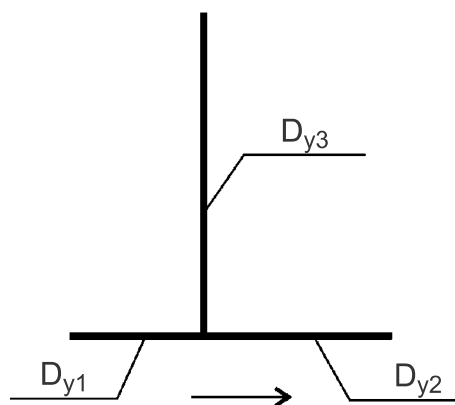


Рис. 14.2

3. Ответвление не может быть выполнено ближе чем 0,3 длины компенсационной зоны, считая от конца компенсационной зоны. Причем удлинение основного трубопровода в месте ответвления не должно превышать 50 мм.

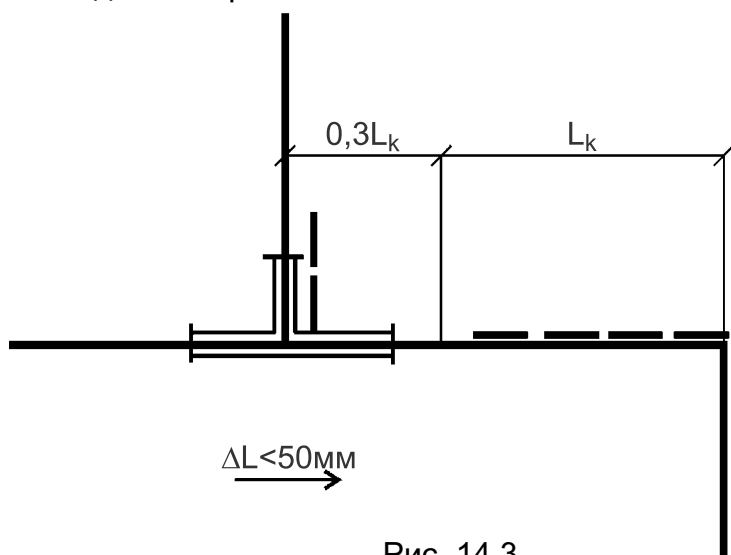


Рис. 14.3

4. Выполнение ответвления с применением прямого или углового тройника должно рассматриваться как Z - образный участок с выполнением всех требований для Z - образной компенсации.

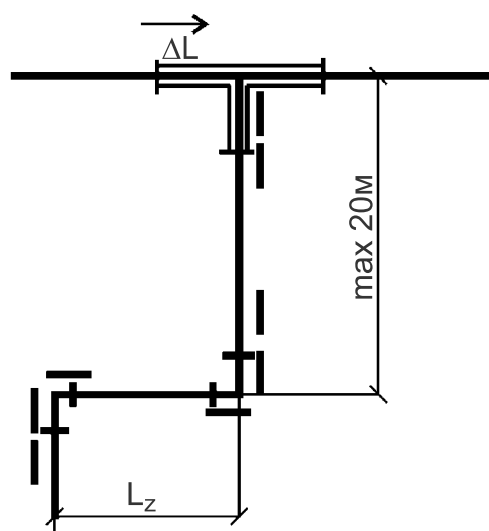


Рис. 14.4

Если выполнение этого условия невозможно, то необходимо устройство физической неподвижной опоры с обязательным устройством компенсационных зон. Причем длина компенсационной зоны определяется как для Г - образной компенсации с двойным удлинением.

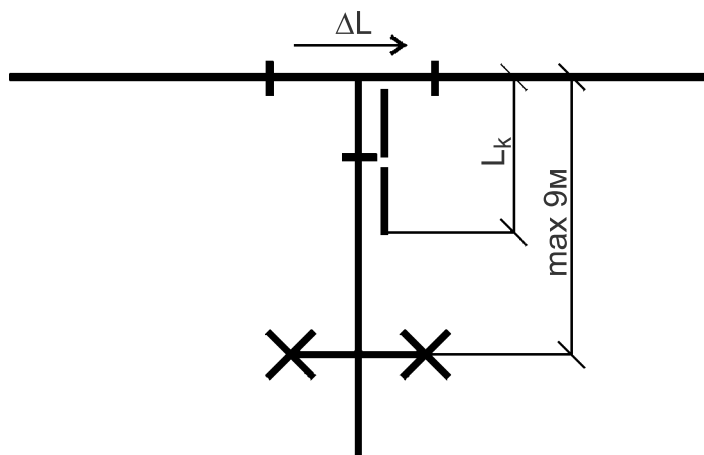


Рис. 14.5

5. Использование ответвления с применением параллельного тройника должно рассматриваться как Г - образный участок компенсации. Причем компенсационное плечо принимается с запасом 1,5-2 м.

Проектируя ответвления, их следует максимально приближать к условным или физическим неподвижным опорам.

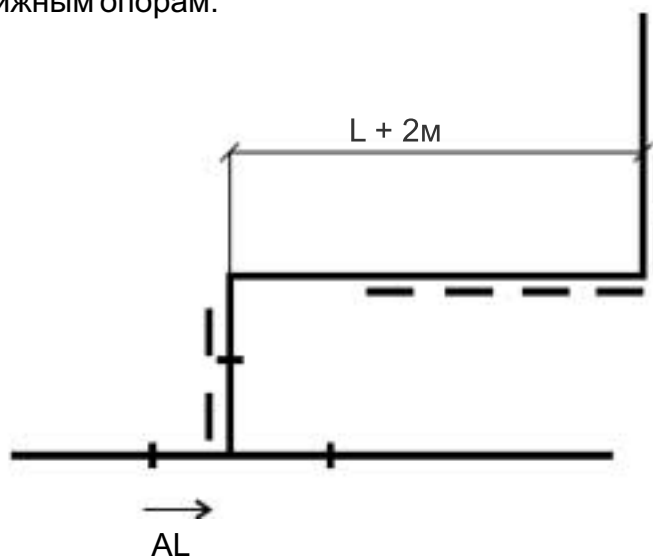


Рис. 14.6

Присоединение к внутренним системам домов

Присоединение предвременноизолированных трубопроводов к внутренним системам домов можно выполнять одним из способов, представленных на рис. 14.7 (а).

Если известна компенсирующая способность внутренней системы, то допускается выполнять подсоединение по рис. 14.7 (б), но в этом случае необходимо проверить возможность внутренней системы к восприятию тепловых удлинений и напряжений от внешней сети.

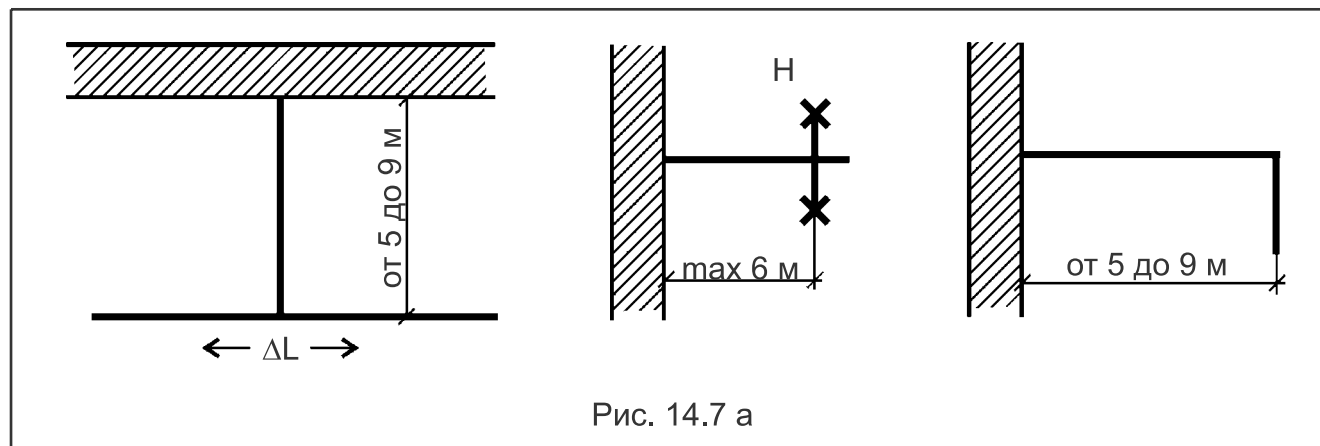


Рис. 14.7 а

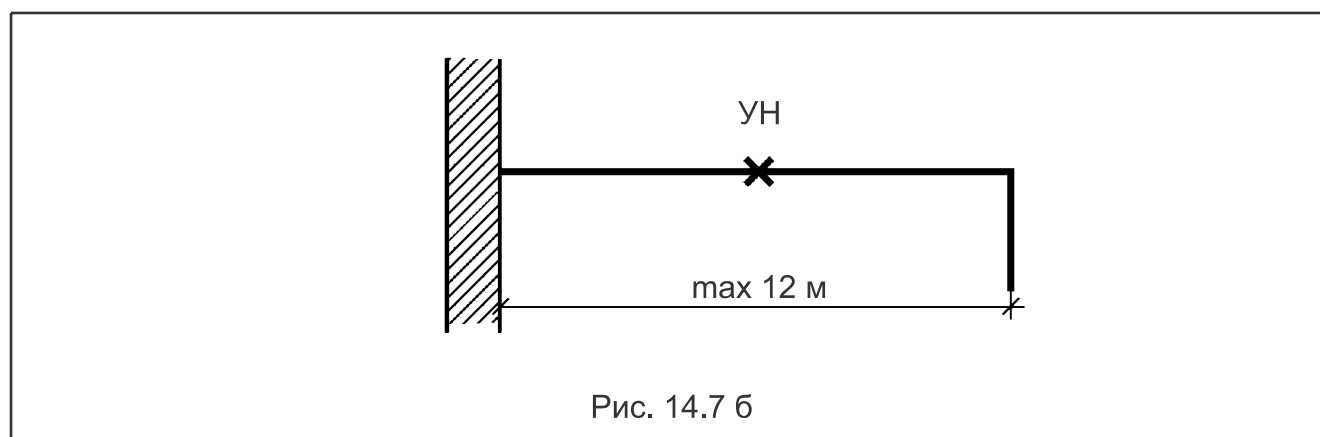


Рис. 14.7 б

Присоединение к канальным трубопроводам

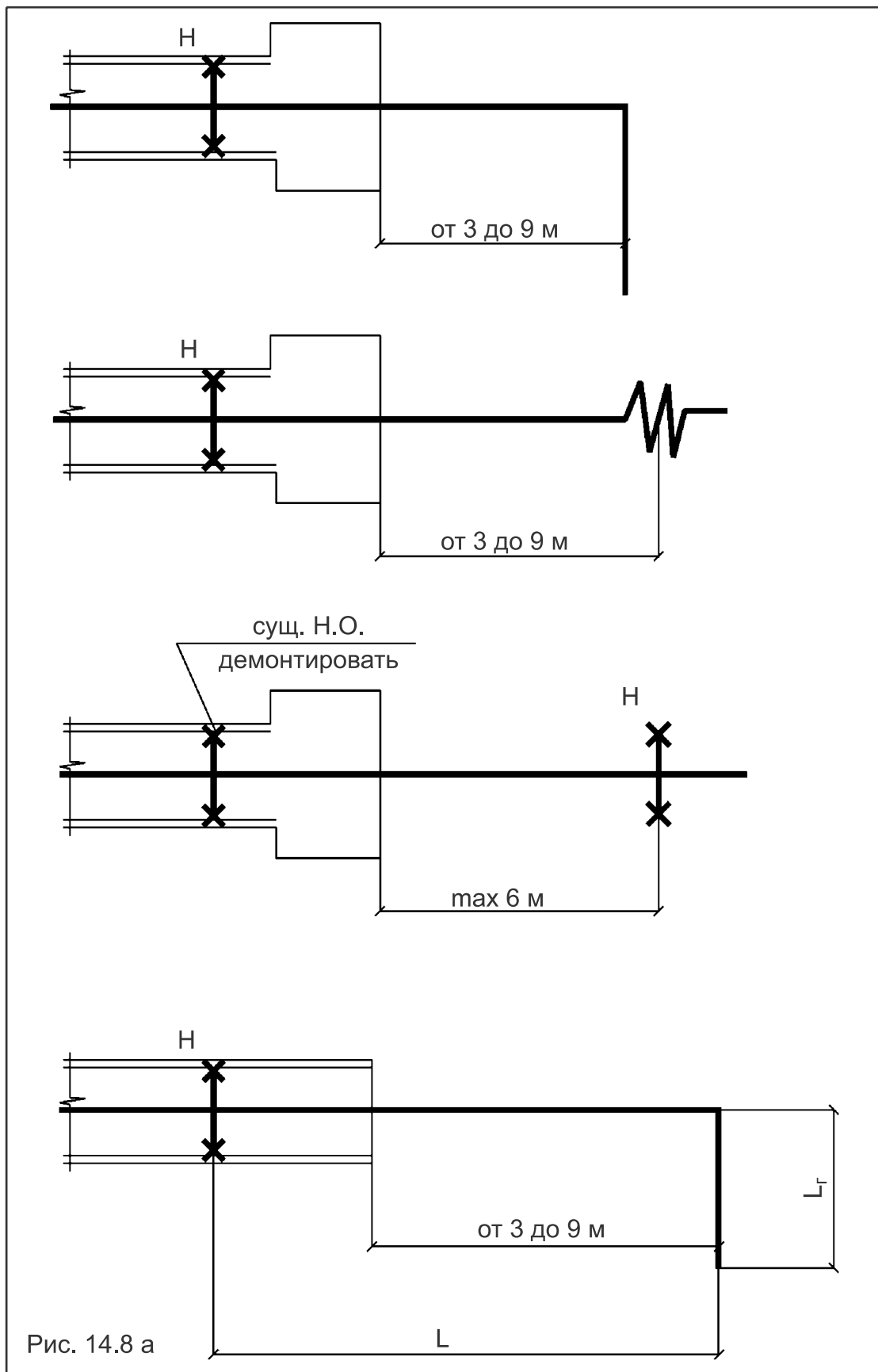
Присоединение бесканальных трубопроводов к существующим трубопроводам канальной прокладки чаще всего встречается в практике проектирования при реконструкции существующих тепловых сетей. Ниже приведены некоторые сочетания двух систем.

При подсоединении бесканальной прокладки к канальной на прямых участках важно не передавать нагрузки от бесканальных трубопроводов на канальные. Это достигается основными способами, представленными на рис. 14.8 (а).

При ответвлении бесканального трубопровода от канального может применяться компенсационная ниша из лоточных элементов. Ответвления от тепловых камер выполняются с соблюдением тех же принципов, что и для трубопроводов в лотках см. рис. 14.8 (б).

Разгрузку трубопроводов канальной прокладки от влияния бесканальных трубопроводов при ответвлении лучше выполнять при помощи самокомпенсирующихся участков. Применение осевых компенсаторов в этих случаях не рекомендуется. Применение физических неподвижных опор допускается при устраивании их только на бесканальном трубопроводе.

Длина участка должна компенсировать перемещение точки врезки бесканального трубопровода в канальный. Для восприятия перемещений может применяться компенсационная ниша из лоточных элементов. (Рис. 14.8 (б)).



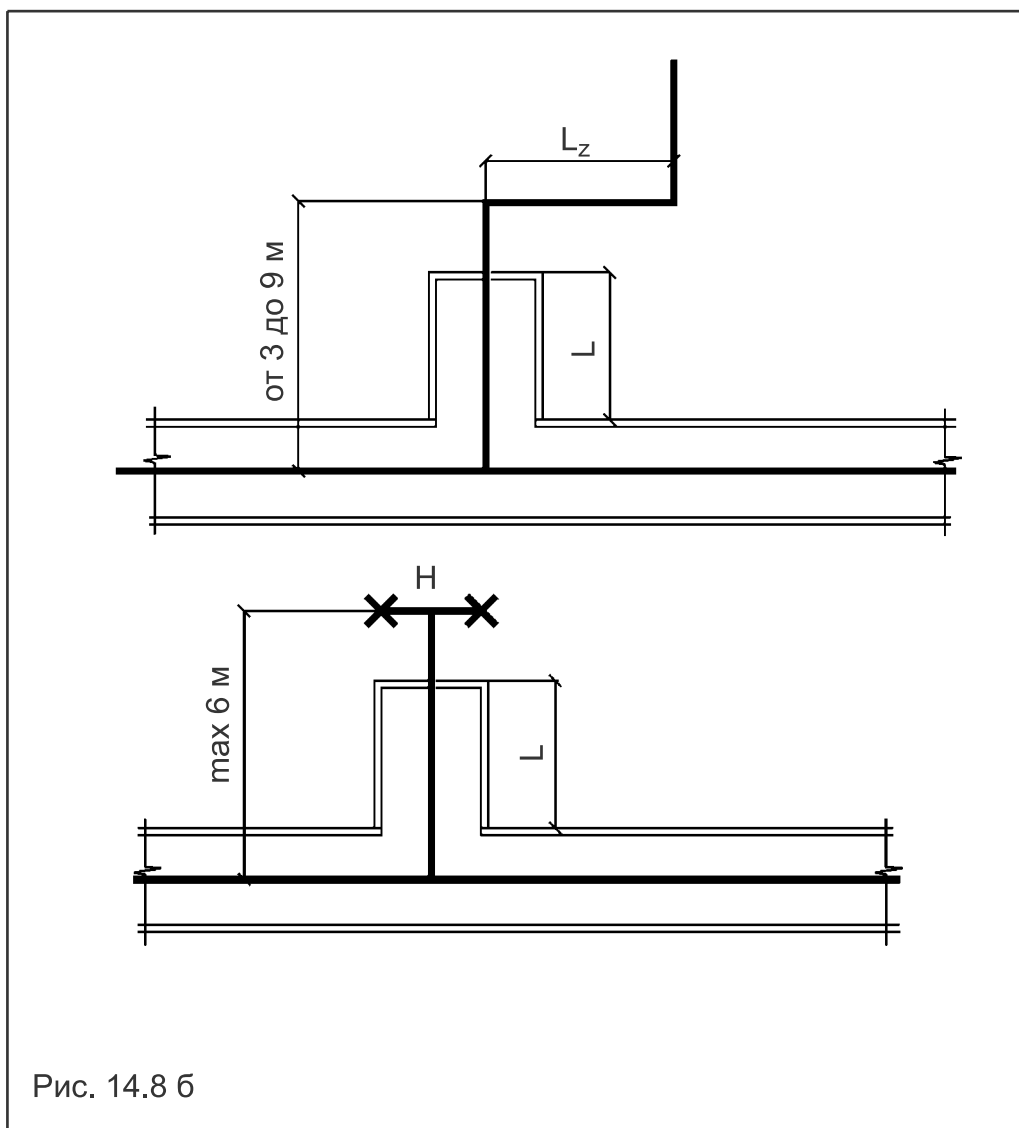
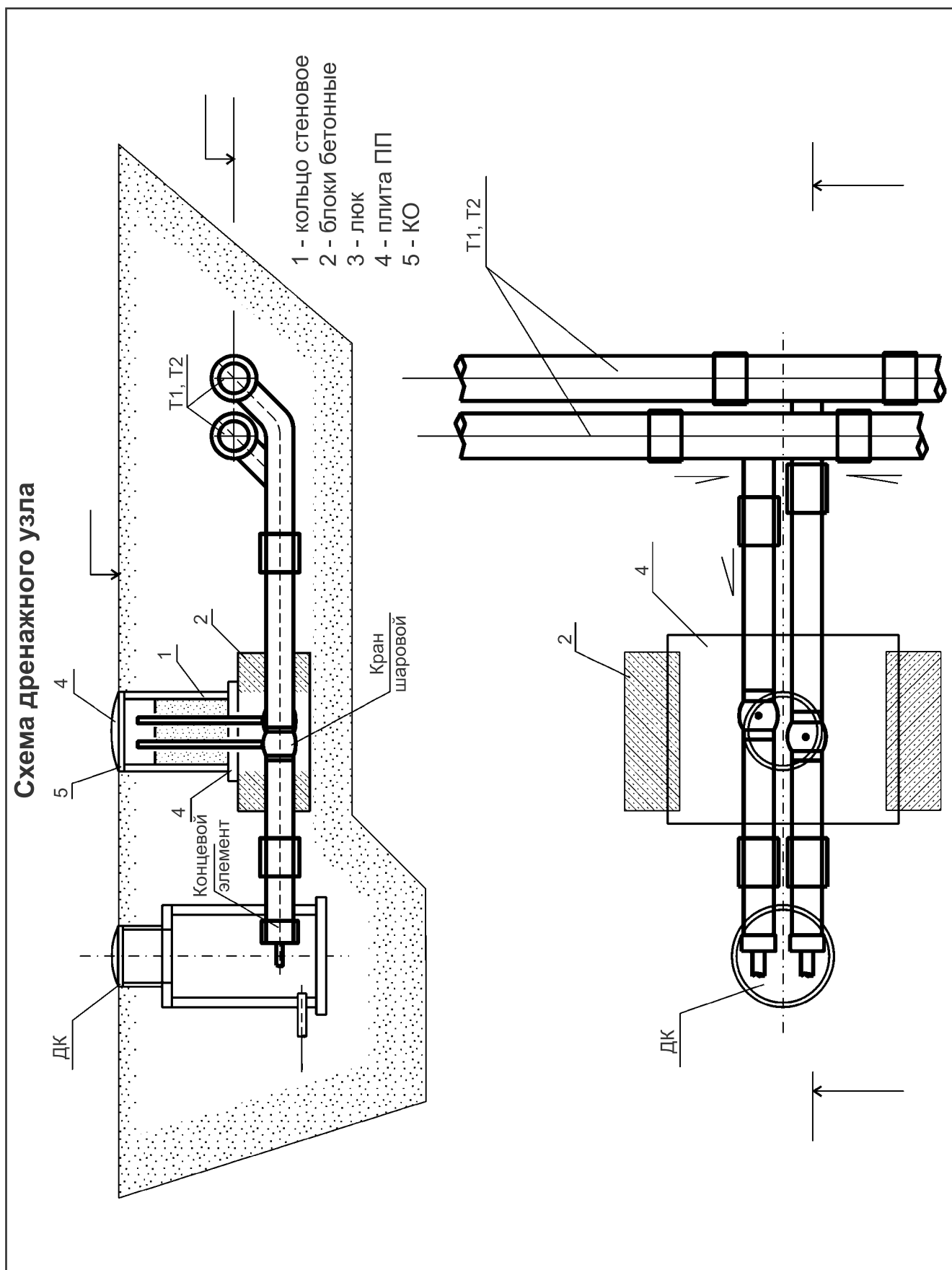
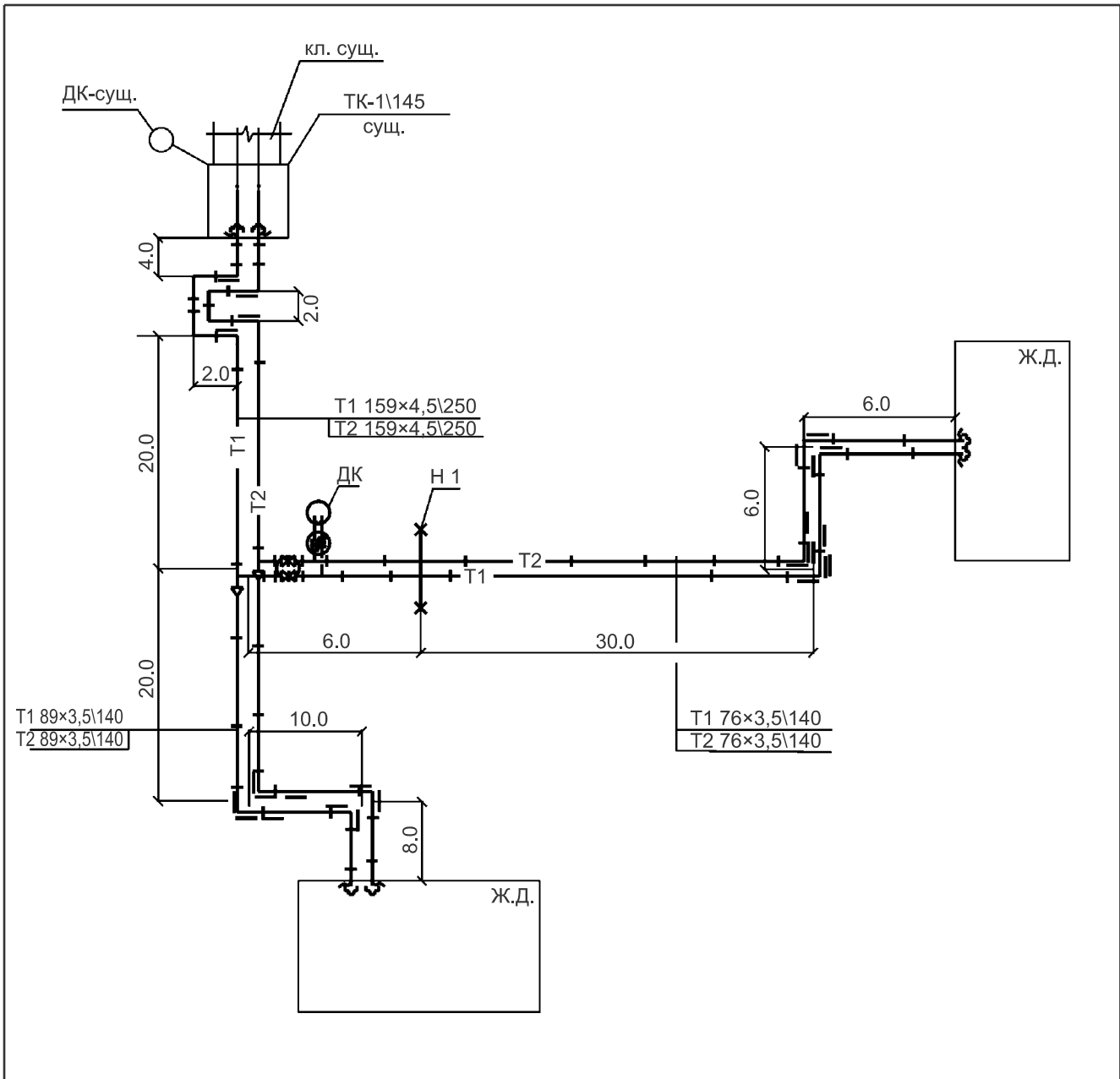


Рис. 14.8 б

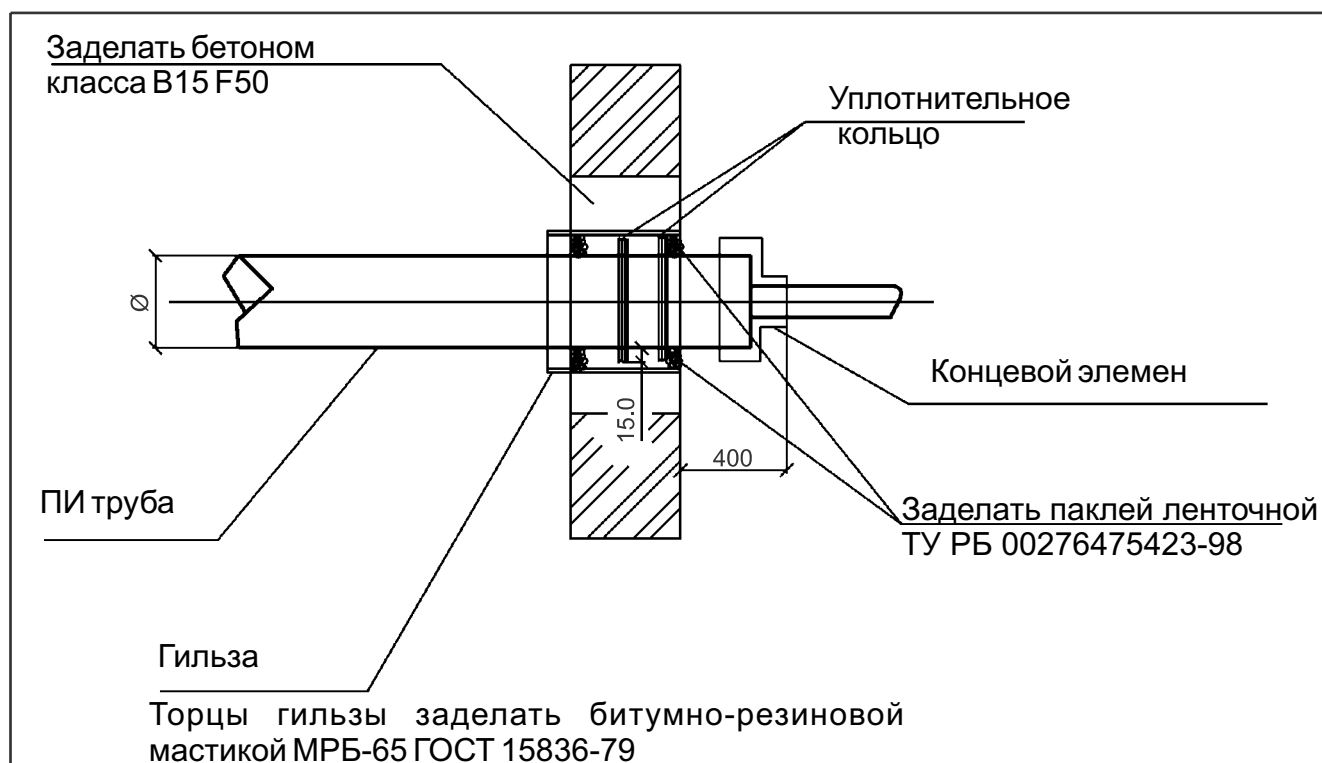
Схема дренажного узла



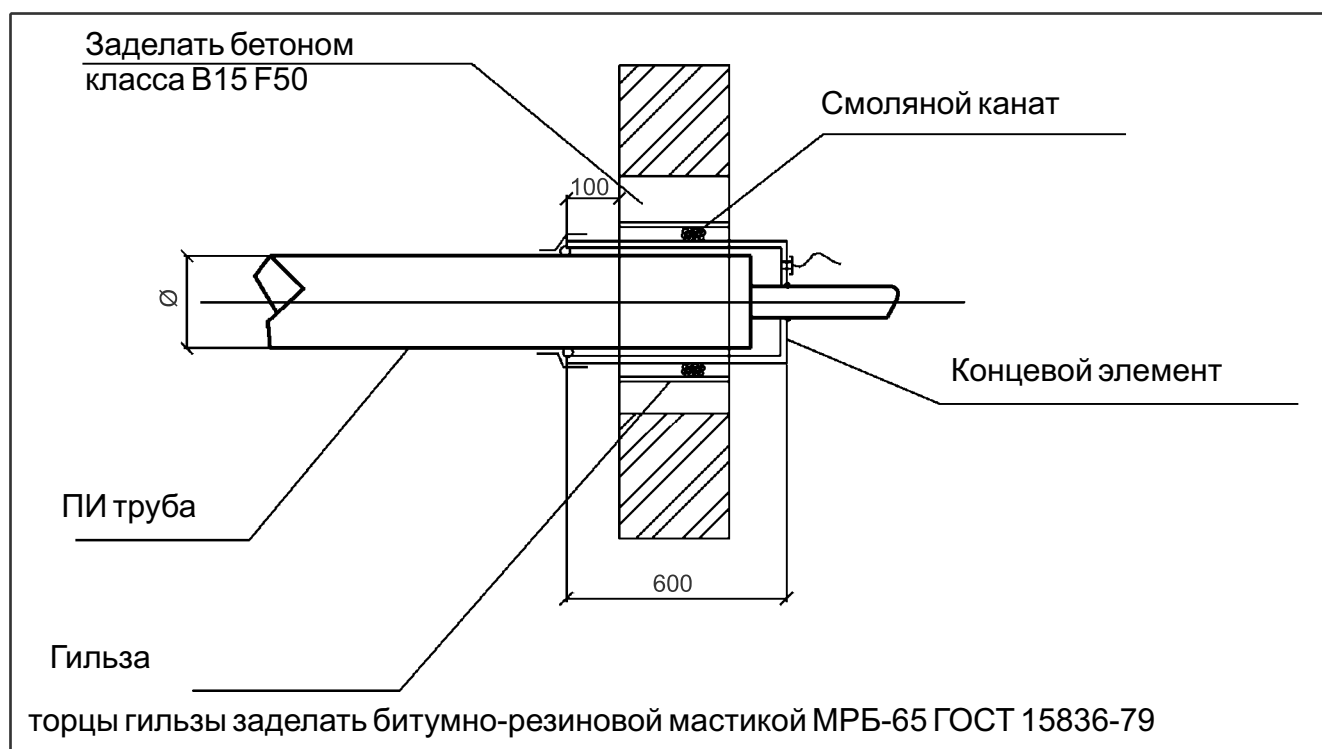
Монтажная схема сети



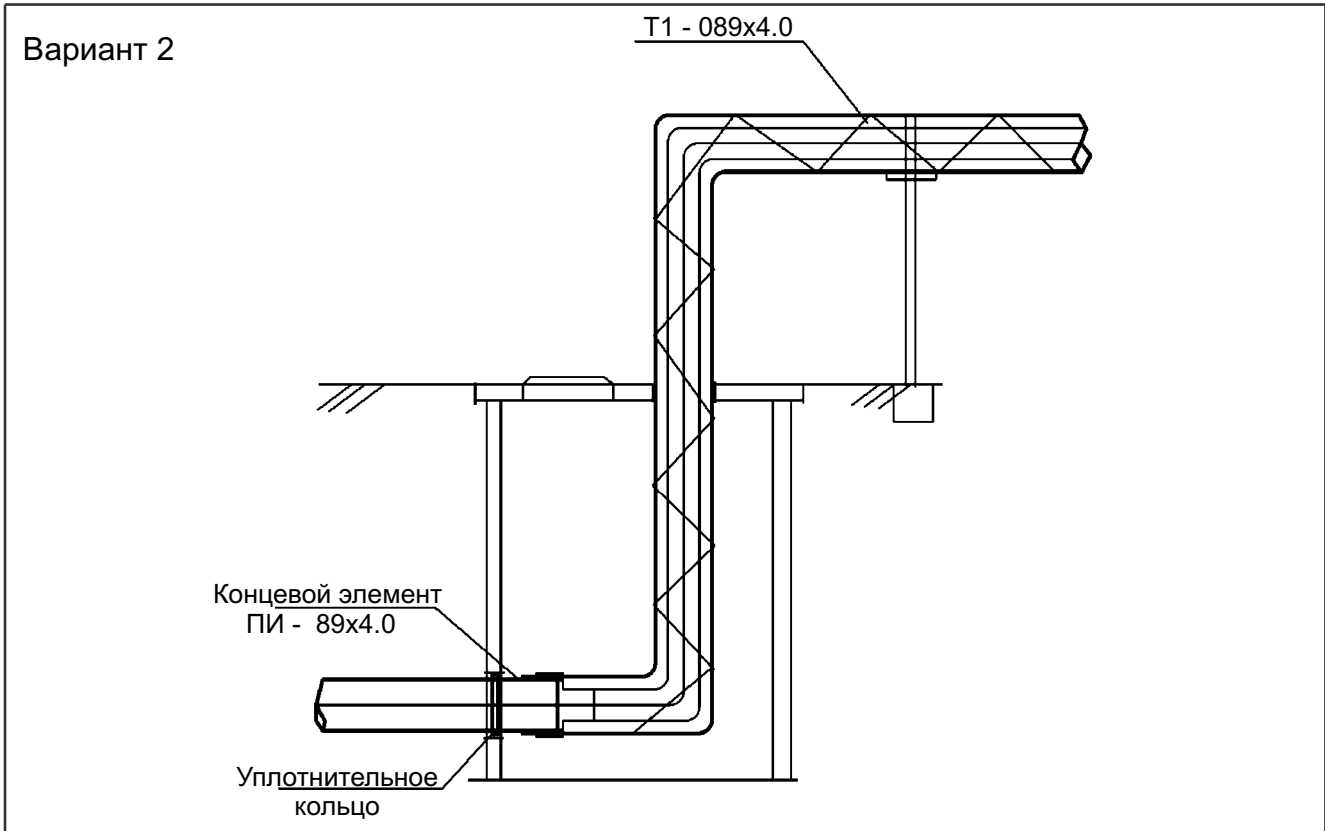
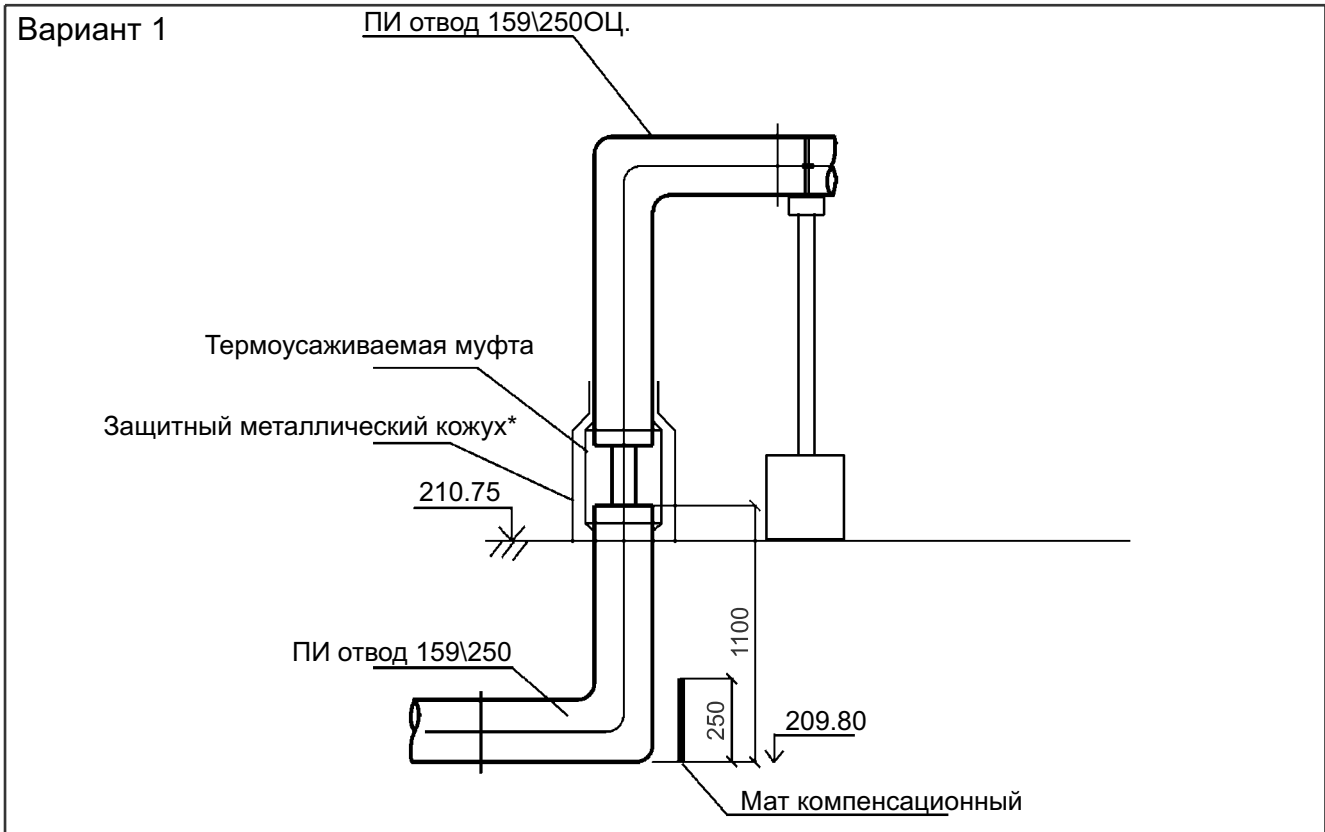
Узел выхода ПИ трубы из здания



Узел выхода ПИ трубы из камеры



Узлы перехода из подземной прокладки в наземную



Литература

1. СНиП 2.04.07-86 «Тепловые сети» (с изменениями к нему). - М., 1986.
2. СНиП 3.05.03-85 «Тепловые сети». - М., 1985.
3. Пособие П1-98 к СНиП 2.04.07-86 «Проектирование и строительство тепловых сетей из теплогидропредизолированных труб». - Мн., 1999.
4. «Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды» (МНПА и ГПАН-5.18). - М: Проматомнадзор, 1999.
5. СТБ 1295-2001 «Трубы стальные предварительно термоизолированные пенополиуретаном. Технические условия». - Мн., 2002.
6. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. / Под ред. А.А. Николаева. - М.: Изд-во литературы по строительству, 1965.
7. СНБ 2.04.01 - 97 «Строительная теплотехника». - Мн., 1997.
8. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование». - М., 1991.
9. СНБ 2.04.02 2000 «Строительная климатология». - Мн., 2000.

Рекомендации
по проектированию трубопроводов из предварительно
изолированных пенополиуретаном труб
производства ООО «Сармат»
Бумага офсетная. Формат 60x84/8. Гарнитура Arial. Печать офсетная. Усл. печ. л.
7,44. Учетн. - изд. л. 6,11.
Отпечатано в ООО «ТМ Арго-графикс».
Лицензия №02330/0056843 от 30 апреля 2004 г.
г. Минск, ул. Жилуновича, 15 - 713, 714

