

В. Г. Злобин

**СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ
И НА КОМПЕНСАЦИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
УДЛИНЕНИЙ**

Учебно-методическое пособие

**Санкт-Петербург
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики

В. Г. Злобин

СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ
И НА КОМПЕНСАЦИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
УДЛИНЕНИЙ

Учебно-методическое пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2024

УДК 621.1 (075)

ББК 31.38я7

З 680

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики
Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного
университета промышленных технологий и дизайна

С. Н. Смородин;

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной энергетики Санкт-
Петербургского государственного лесотехнического университета имени С. М. Кирова

И. В. Иванова

Злобин, В. Г.

З 680 Системы теплоснабжения. Расчет трубопроводов на прочность и на компенсацию температурных удлинений: учебно-методическое пособие / В. Г. Злобин. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 84 с.

Учебно-методическое пособие соответствует программам и учебным планам дисциплины «Системы теплоснабжения» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» для всех форм обучения.

В учебно-методическом пособии изложены методические основы расчетов трубопроводов на прочность и на компенсацию температурных удлинений. Приведена методика и примеры расчетов трубопроводов на компенсацию температурных удлинений, в том числе с Г- и П-образными участками, расчет на прочность трубопровода из ВЧШГ при подземной прокладке, расчет трубопроводов тепловых сетей на прочность. Приводятся справочные данные в таблицах и на графиках, необходимые для расчетов

Учебно-методическое пособие предназначено для бакалавров и магистров всех форм обучения. Материалы, изложенные в пособии, могут быть использованы для выполнения расчетов систем теплоснабжения в курсовом проектировании и при выполнении выпускных квалификационных работ. Учебно-методическое пособие может быть полезно инженерам-теплоэнергетикам, персоналу предприятий по проектированию и эксплуатации систем теплоснабжения.

УДК 621.1 (075)

ББК 31.38я7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

© Злобин В. Г., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ..... | 6 |
| 1. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА КОМПЕНСАЦИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УДЛИНЕНИЙ..... | 7 |
| 1.1. Расчет участка трубопровода на компенсацию температурных удлинений. | 10 |
| 1.2. Расчет на компенсацию температурных удлинений Г-образного участка | 17 |
| 1.3. Расчет на компенсацию температурных удлинений участков трубопровода с П-образными компенсаторами..... | 24 |
| 1.4. Особенности расчета симметричного П-образного компенсатора..... | 30 |
| 1.5. Расчет участка трубопровода с П-образным компенсатором с гнутыми гладкими отводами на самокомпенсацию | 31 |
| 2. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДА ИЗ ВЧШГ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ..... | 35 |
| 3. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ..... | 44 |
| 4. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ..... | 68 |
| 5. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ (ЗАЧЕТУ) ПО КУРСУ «СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ»..... | 73 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 76 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ | 77 |

ВВЕДЕНИЕ

Задача теплоснабжения заключается в обеспечении каждого жителя отоплением, вентиляцией его квартиры на комфортном уровне, бесперебойной подачи горячей воды надлежащей температуры и качества, при этом должны быть созданы условия по оплате этой услуги в том объеме, в котором он ее потребил. Эти задачи должны осуществляться при минимальной затрате средств и с использованием прогрессивных технических решений.

Расчет тепловых и гидравлических режимов тепловых сетей включает в себя:

- 1) определение расчетных тепловых нагрузок;
- 2) выбор схемы тепловой сети;
- 3) разработку трассы сети;
- 4) гидравлический расчет трубопроводов;
- 5) разработку гидравлических режимов работы тепловой сети;
- 6) расчет на прочность;
- 7) расчет компенсации от температурных удлинений или самокомпенсацию.

Основной задачей расчета трубопроводов на прочность является определение или проверка толщин стенок труб, пролетов между подвижными опорами и допускаемых компенсационных напряжений.

Расчет на прочность трубопроводов тепловых сетей производится в соответствии с ПБ 10-573-03 «Правил устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды» [6], по РД 10-249-98 «Нормам расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды» ЦКТИ [7].

Для магистральных газопроводов, нефтепроводов в настоящее время применяется метод расчета труб на прочность, приведенный в [8], учитывающий специфику условий работы этих трубопроводов.

При расчете трубопроводов на прочность учитывают следующие основные нагрузки:

- внутреннее давление теплоносителя;
- собственный вес трубопроводов;
- ветровую нагрузку (при надземной прокладке);
- силы, возникающие при тепловых удлинениях трубопроводов.

К последним относятся: силы упругой деформации и изгибающие моменты гибких компенсаторов, в том числе и углов поворотов, используемых для компенсации; силы трения в подвижных опорах при надземной прокладке и прокладке в каналах; силы трения в сальниковых компенсаторах.

При расчете трубопроводов тепловых сетей на прочность предусматривается полное использование допускаемого напряжения от приведенных выше нагрузок за счет перераспределения напряжений от этих нагрузок между собой.

Следствием перераспределения напряжений от различного вида нагрузок является возможность увеличения пролетов между подвижными опорами,

уменьшения вылетов гибких компенсаторов или длин компенсирующих плеч (для участков самокомпенсации) при недоиспользовании допускаемого напряжения от внутреннего давления.

Изучение комплекса вопросов, связанных с проектированием, монтажом и эксплуатацией систем теплоснабжения, является содержанием рассматриваемого пособия.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ

Целью расчета трубопроводов тепловой сети на прочность и компенсацию температурных удлинений является отработка навыков практических расчетов и формирование необходимых компетенций по проектированию тепловых сетей. При выполнении расчетов практического задания необходимо, ориентируясь на исходные данные и результаты, полученные в расчете курсовой работы по дисциплине «Системы теплоснабжения» на тему «Расчет системы теплоснабжения промышленных и коммунально-бытовых потребителей в г.», выбрать состав, исходные данные и произвести расчеты:

- 1) трубопроводов на компенсацию температурных удлинений, в том числе;
- 2) трубопроводов Г- образными участками;
- 3) трубопроводов с П-образными участками;
- 4) расчет трубопроводов тепловых сетей на прочность.

В объем практического занятия входит расчетно-пояснительная записка и графический материал (1 чертеж формата А3). В качестве графического материала выполняется расчетная схема тепловой сети с указанием длин участков, Г- и П-образными участками.

Расчетно-пояснительная записка к практическому заданию должна включать введение, исходные данные, таблицы с расчетными формулами и результатами расчетов, обоснование выбора параметров для расчета на прочность и компенсацию температурных удлинений, выводы по результатам расчетов, библиографический список. При выполнении расчетов студенты должны пользоваться Международной системой единиц СИ.

При подготовке к защите отчета по практическому заданию необходимо использовать вопросы для подготовки к экзамену (зачету). Рекомендуется выполнять расчеты в Excel (см. Приложение). Расчет на прочность трубопровода из ВЧШГ при подземной прокладке выполняется для отработки навыков проектирования систем водоснабжения.

1. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА КОМПЕНСАЦИЮ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УДЛИНЕНИЙ

Компенсация температурных деформаций стальных трубопроводов имеет исключительно важное значение в технике транспорта теплоты. Если в трубопроводе отсутствует компенсация температурных деформаций, то при сильном нагревании в стенке трубопровода могут возникнуть большие разрушающие напряжения.

В качестве компенсирующих устройств применяют гибкие (П- или S-образные) или сальниковые и волнистые (сильфонные) компенсаторы. Повороты трубопроводов по трассе тепловых сетей, как правило, используют для самокомпенсации. Выбор способа компенсации зависит от параметров теплоносителя, способа прокладки тепловых сетей и других местных условий.

Тепловые удлинения трубопроводов при температуре теплоносителя от 50 °С и выше должны восприниматься специальными компенсирующими устройствами, предохраняющими трубопровод от возникновения недопустимых деформаций и напряжений.

Способы компенсации температурных удлинений, применяемые в тепловых сетях, весьма разнообразны. По своему характеру все компенсаторы могут быть разбиты на две группы: осевые и радиальные. Осевые компенсаторы применяются для компенсации температурных удлинений прямолинейных участков трубопровода.

Радиальная компенсация может быть использована при любой конфигурации трубопровода. Радиальная компенсация широко применяется на теплопроводах, прокладываемых на территориях промышленных предприятий, а при небольших диаметрах теплопроводов (до 200 мм) – также и в городских тепловых сетях. На теплопроводах большого диаметра, прокладываемых под городскими проездами, устанавливаются главным образом осевые компенсаторы. На практике находят применение осевые компенсаторы двух типов: сальниковые и упругие.

Сальниковые компенсаторы в тепловых сетях применяют стальные при давлении теплоносителя до 16 кг/см² при прокладке в каналах, тоннелях и общих коллекторах – для трубопроводов диаметром 250 мм и более, а при бесканальной прокладке – для трубопроводов диаметром 125 мм и более. При стесненных условиях прокладки в каналах можно применять сальниковые компенсаторы для трубопроводов диаметром от 100 мм и более, а при надземной прокладке на низких опорах для трубопроводов диаметром от 250 мм и более.

На рисунке 1.1 показан односторонний сальниковый компенсатор. Между стаканом и корпусом компенсатора располагается сальниковое уплотнение. Сальниковая набивка, обеспечивающая плотность, зажимается между упорным кольцом и грундебуксой. Обычно набивка выполняется из асбестовых колец квадратного сечения, пропитанных графитом. Компенсатор вваривается в трубопровод, поэтому установка его на линии не приводит к увеличению количества фланцевых соединений. На рисунке 1.2 приведен разрез

двухстороннего сальникового компенсатора. Недостатком сальниковых компенсаторов всех типов является сальник, требующий систематического и тщательного ухода в эксплуатации. Набивка в сальниковом компенсаторе изнашивается, теряет со временем упругость и начинает пропускать теплоноситель. Подтяжка сальника в этих случаях не дает положительных результатов, поэтому через определенные периоды времени сальники приходится перебивать. Поэтому в настоящее время такие компенсаторы применяются редко. От этого недостатка свободны все типы упругих компенсаторов.

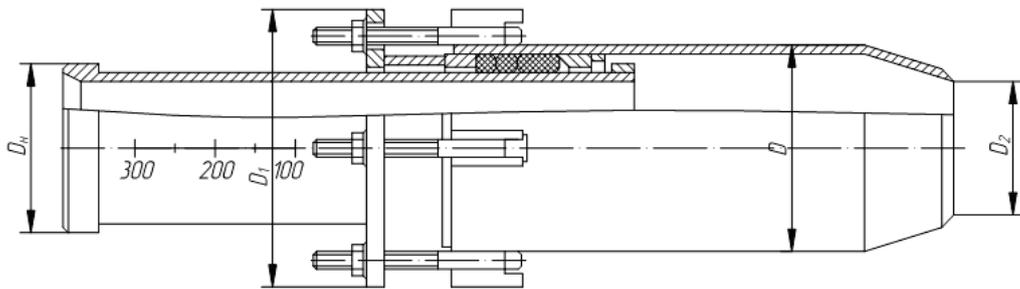


Рисунок 1.1 – Односторонний сальниковый компенсатор

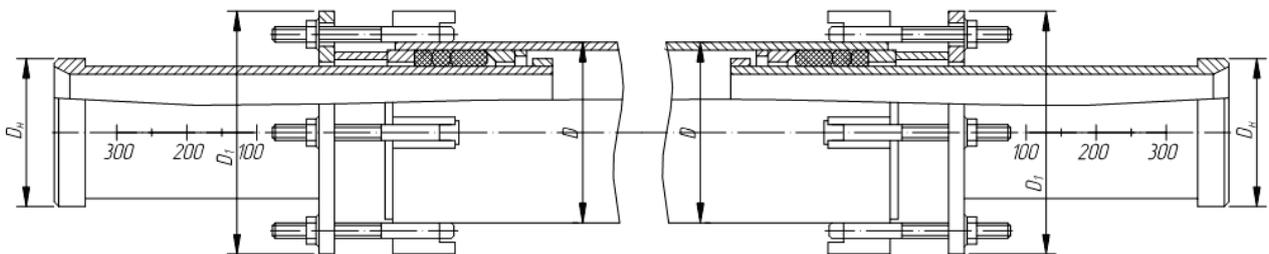


Рисунок 1.2 – Двухсторонний сальниковый компенсатор

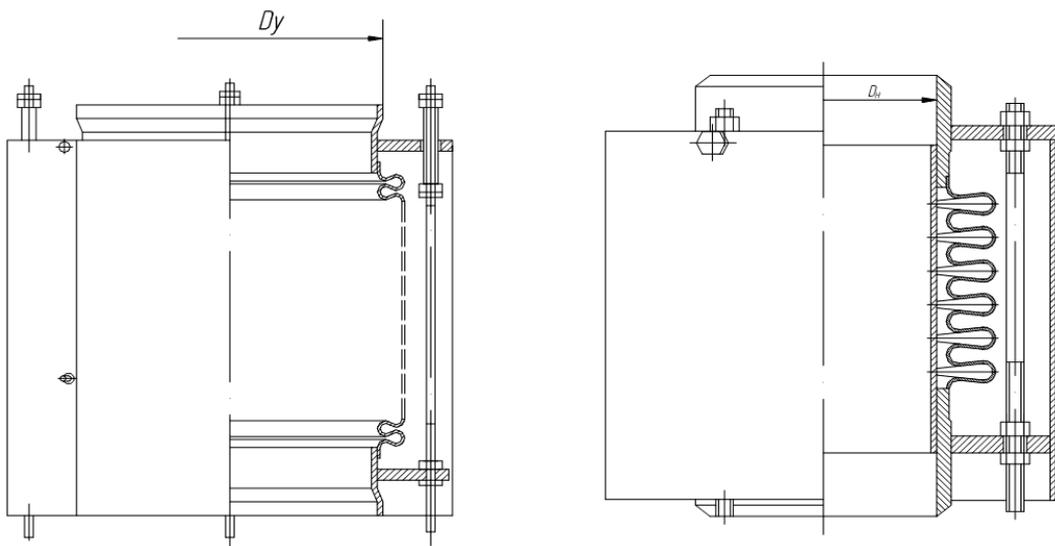


Рисунок 1.3 – Осевой неразгруженный сильфонный компенсатор

На рисунке 1.3 показана секция осевого неразгруженного сифонного компенсатора. Для уменьшения гидравлического сопротивления внутри сифонной секции вварена гладкая труба. Сифонные секции выполняют обычно из легированных сталей или сплавов (в нашей стране из стали 08X18H10T). Компенсирующая способность сифонных компенсаторов определяется обычно по результатам испытаний или принимается по данным заводов-изготовителей.

Для компенсации больших термических деформаций соединяют последовательно несколько сифонных секций.

Осевая реакция сифонных компенсаторов $R_{с.к}$ определяется по формуле:

$$R_{с.к} = R_{ж} + R_p,$$

где $R_{ж}$ – осевая реакция, возникающая вследствие жесткости осевого хода, определяется по формуле:

$$R_{ж} = C_{\lambda} \cdot \lambda,$$

где C_{λ} – жесткость волны, Н/мм, принимаемая по паспорту компенсатора;
 λ – амплитуда осевого хода, мм;

R_p – осевая реакция от внутреннего давления, определяемая по формуле:

$$R_p = \phi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_c^2 - D_n^2) \cdot P_{изб},$$

где ϕ – коэффициент, зависящий от геометрических размеров и толщины стенки волны, равный в среднем 0,5–0,6;

D_c и D_n – соответственно диаметры волн сифона и трубы, м;

$P_{изб}$ – избыточное давление теплоносителя, Па.

Максимальная длина участка $L_{макс}$, на котором устанавливается один сифонный компенсатор, определяется по формуле:

$$L_{макс} = \frac{0,9 \cdot 2 \cdot \lambda}{\alpha \cdot (t - t_{н.о})}$$

где α – коэффициент линейного расширения стали, мм/(м·°С);

t – максимальная расчетная температура теплоносителя, °С;

$t_{н.о}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления обеспеченностью 0,92.

Гибкие компенсаторы П- и S-образные применяют: при надземной прокладке трубопроводов для всех диаметров труб независимо от параметров теплоносителя; при давлении 16 кг/см² для труб диаметром от 25 до 250 мм при прокладке в каналах, тоннелях и общих коллекторах; для труб диаметром от 25 до 100 мм при бесканальной прокладке; для труб всех диаметров при давлении теплоносителя выше 16 кг/см² при всех способах прокладки.

Компенсация тепловых удлинений трубопроводов за счет использования поворотов трассы (самокомпенсация) может применяться при всех способах прокладки тепловых сетей независимо от диаметров трубопроводов и параметров теплоносителя при величине угла до 150°. При величине угла более 150°, а также в том случае, когда по расчету на прочность трубопроводов не

может быть использован для самокомпенсации, трубопроводы в точке поворота крепят неподвижными опорами.

Габариты гибких компенсаторов и длины плеч трубопровода при самокомпенсации определяют расчетом на компенсацию. Полученные расчетом на компенсацию длины плеч проверяют на боковое тепловое смещение трубопровода, которое должно быть не более величины зазора (с учетом запаса около 50 мм) между наружными поверхностями изоляции или между строительной конструкцией и наружной поверхностью изоляции. Максимальное боковое смещение будет в точке поворота трассы.

При расчете труб на компенсацию тепловых удлинений с гибкими П- и S-образными компенсаторами или участками самокомпенсации определяют такие их габариты, при которых продольные изгибающие компенсационные напряжения, возникающие при упругой деформации труб, не превышают допускаемых.

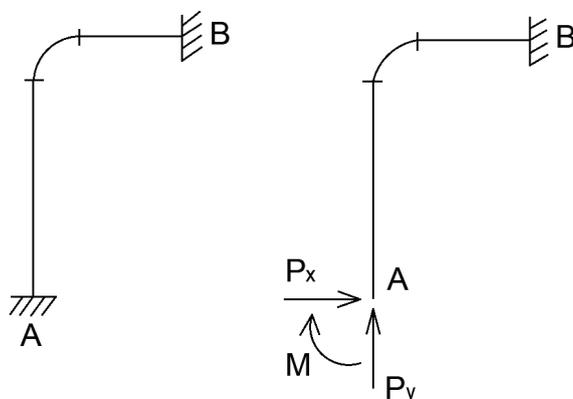


Рисунок 1.4 – Замена на расчетном участке трубопровода AB неподвижной опоры A силами и моментом

Расчет труб на компенсацию тепловых удлинений производят «методом сил», при этом одна из неподвижных опор расчетного участка трубопровода, заключенного между двумя неподвижными опорами, считается раскрепленной. К раскрепленному концу трубопровода прикладывают реактивные силы упругой деформации и изгибающие моменты, заменяющие отброшенную опору (рис. 1.4).

При расчете труб на компенсацию тепловых удлинений приняты следующие допущения:

- неподвижные опоры считаются абсолютно жесткими;
- сопротивление сил трения подвижных опор при тепловом удлинении трубопровода не учитываются.

1.1. Расчет участка трубопровода на компенсацию температурных удлинений

Формулы для расчета участка трубопровода на компенсацию тепловых удлинений приведены в справочнике Николаева А. А. [2, стр.183-192, таблица 10.16].

Алгоритм расчета участка трубопровода на компенсацию тепловых удлинений сведен в таблицах 1.1 – 1.3.

Схема расчетного участка трубопровода по осевой линии, для которого выполнен расчет в таблице 1.1, представлена на рисунке 1.5.

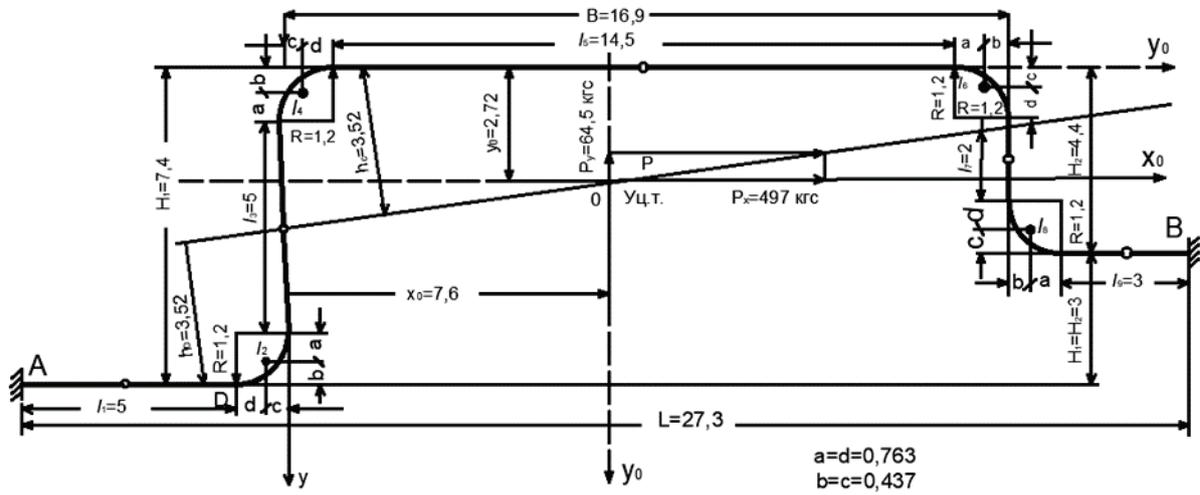


Рисунок 1.5 – Схема расчетного участка трубопровода по осевой линии

Таблица 1.1 – Алгоритм расчета участка трубопровода на компенсацию тепловых удлинений

| № п/п | Элемент расчета | Единица измерений | Расчетные формулы и обозначения | Пример расчета | Результаты расчета |
|-------|--|-------------------|--|--------------------------|--------------------|
| 1 | Максимальная температура теплоносителя | °С | t | 300 | |
| 2 | Условный проход | | D_y | 300 | |
| 3 | Наружный диаметр трубы | м | D_H | 325 | |
| 4 | Номинальная толщина стенки трубы | м | s | 8 | |
| 5 | Материал стенки трубы | - | <i>Сталь марки</i> | 10 | |
| 6 | Расстояние между неподвижными опорами | м | L | 27 3 | |
| 7 | Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления | °С | $t_{H,0}$ | -30 | |
| 8 | Вылеты компенсатора | м | H_1 H_2 | 7,4 4,4 | |
| 9 | Спинка компенсатора | м | B | 16,9 | |
| 10 | Прочие геометрические размеры компенсатора | | l_1 l_3 l_5 l_7 l_9 | 5 5 14,5 2 3 | |
| 11 | Внутренний диаметр трубы | мм | $D_B = D_H - 2 \cdot s$ | 309 | |
| 12 | Момент инерции поперечного сечения стенки трубы | см ⁴ | $I = \frac{\pi}{64} (D_H^4 - D_B^4)$ | 10010 | |
| 13 | Момент сопротивления поперечного сечения стенки трубы | см ³ | $W = \frac{\pi (D_H^4 - D_B^4)}{32 D_H} = \frac{2 \cdot I}{D_H}$ | 616 | |
| 14 | Радиус оси гнутой трубы | мм | R | 1200 | |

| № п/п | Элемент расчета | Единица измерений | Расчетные формулы и обозначения | Пример расчета | Результаты расчета |
|-------|--|-------------------|---|----------------|--------------------|
| 15 | Средний радиус трубы | мм | $r_{cp} = \frac{D_n - s}{2}$ | 158,5 | |
| 16 | Геометрическая характеристика гибкости гнutoго гладкого отвода | - | $h = \frac{s \cdot R}{r_{cp}^2}$ | 0,383 | |
| 17 | Коэффициент гибкости гнutoго гладкого отвода | - | $k = \frac{1,65}{h}$ | 4,3 | |
| 18 | Коэффициент концентрации продольных изгибающих компенсационных напряжений в гнutoм гладком отводе | - | $m = \frac{0,9}{h^{2/3}}$ | 1,71 | |
| 19 | Угол дугового отрезка | - | φ° | 90° | |
| 20 | Угол наклона хорды дугового отрезка к оси x' для l_2 и l_4 | - | β° | 45° | |
| 21 | То же, для l_6 и l_8 | - | | 135° | |
| 22 | Коэффициенты для вычисления расстояния от концов дугового отрезка до центра тяжести дугового отрезка | - | $c_b = c_c = \left[\sin \frac{\varphi}{2} \cos \beta - \left(\nu - \cos \frac{\varphi}{2} \right) \sin \beta \right]$ | 0,364 | |
| | | | $c_a = c_d = \left[\sin \frac{\varphi}{2} \cos \beta + \left(\nu - \cos \frac{\varphi}{2} \right) \sin \beta \right]$ | 0,636 | |
| 23 | Расстояния от концов дугового отрезка до центра тяжести дугового отрезка | м | $b = c = c_b \cdot R = c_c \cdot R$ | 0,437 | |
| | | | $a = d = c_a \cdot R = c_d \cdot R$ | 0,763 | |

| № п/п | Элемент расчета | Единица измерений | Расчетные формулы и обозначения | Пример расчета | Результаты расчета |
|-------|--|-------------------------------|--|----------------------|--------------------|
| 24 | Коэффициент для вычисления приведенной длины дугового отрезка | - | $c_{пр} = 0,0174 \cdot \varphi$ | 1,571 | |
| 25 | Приведенная длина дугового отрезка $l_2 = l_4 = l_2 = l_4$ | м | $l_{пр} = c_{пр} \cdot k \cdot R$ | 8,1 | |
| 26 | Центральные моменты инерции участка относительно осей x_0 и y_0 | $м^3$ | I_{x_0} (по таблице 1.3) | 490,4 | |
| | | | I_{y_0} (по таблице 1.3) | 4156,7 | |
| 27 | Центральный центробежный момент инерции относительно осей x_0 и y_0 | $м^3$ | I_{xy_0} (по таблице 1.3) | -490,7 | |
| 28 | Модуль упругости трубной стали 10 при температуре $t=300^\circ\text{C}$ | $кг/см^2$ | E | $1,775 \cdot 10^6$ | |
| 29 | Коэффициент линейного расширения трубной стали при температуре $t=300^\circ\text{C}$ | $мм/(м \cdot ^\circ\text{C})$ | α | $1,34 \cdot 10^{-2}$ | |
| 30 | Расчетное тепловое удлинение конца A трубопровода по оси x | мм | $\Delta x = \alpha \cdot L \cdot (t - t_{н.0})$ | 121 | |
| 31 | То же, по оси y | мм | $\Delta y = -\alpha \cdot (H_1 - H_2)(t - t_{н.0})$ | -13,3 | |
| 32 | Сила упругой деформации по оси x | кг | $P_x = \frac{\Delta x \cdot I_{y_0} + \Delta y \cdot I_{xy_0}}{I_{x_0} \cdot I_{y_0} - I_{xy_0}^2} \cdot \frac{E \cdot I}{10^7}$ | 497 | |
| 33 | То же, по оси y | кг | $P_y = \frac{\Delta y \cdot I_{x_0} + \Delta x \cdot I_{xy_0}}{I_{x_0} \cdot I_{y_0} - I_{xy_0}^2} \cdot \frac{E \cdot I}{10^7}$ | 64,5 | |
| 34 | Равнодействующая сила упругой деформации | кг | $P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$ | 501,2 | |
| 35 | Изгибающий момент в точке C | $кг \cdot м$ | $M = -P_x \cdot y_0 + P_y \cdot (x_0 - R)$ или $M_c = -P \cdot h_c$ | -1762 | |

| № п/п | Элемент расчета | Единица измерений | Расчетные формулы и обозначения | Пример расчета | Результаты расчета |
|-------|---|--------------------|---|----------------|--------------------|
| 36 | Изгибающий момент в точке D | кг·м | $M_D = P_x(H_1 - y_0) + P_y(x_0 + R)$ или $M_D = P \cdot h_D$ | 1763 | |
| 37 | Максимальное продольное изгибающее компенсационное напряжение в точке D | кг/мм ² | $\sigma_{и(D)}^к = \frac{M_D \cdot m}{W}$ | 4,9 | |

Примечание. 1) расчет произведен в предположении, что конец трубопровода A раскреплен;

2) знак «минус» у изгибающего момента в точке C показывает только направление этого момента и при определении напряжений не учитывается;

3) полученное по расчету на компенсацию максимальное компенсационное напряжение не должно быть больше допустимого компенсационного напряжения, определяемого расчетом на прочность.

Таблица 1.2 – Определение собственных и собственных центробежных моментов инерции

| Отрезки | Геометрическая длина отрезков l или радиус оси отвода $R, м$ | Коэффициент для вычисления собственных моментов инерции | | | Коэффициент гибкости гнутого гладкого отвода k | l^3 или $k \cdot R^3, м^3$ | Собственные и собственные центробежные моменты инерции, $м^3$ | | | |
|------------------------------------|--|---|-------------------|-----------------------|--|------------------------------|--|--|--|--|
| | | c_x c_{x1} | c_y c_{y1} | c_{xy} c_{xy1} | | | $I_x' = c_x \cdot l^3$ или $I_x' = c_{x1} \cdot k \cdot R^3$ | $I_y' = c_y \cdot l^3$ или $I_y' = c_{y1} \cdot k \cdot R^3$ | $I_{xy}' = c_{xy} \cdot l^3$ или $I_{xy}' = c_{xy1} \cdot k \cdot R^3$ | |
| l_1 | 5 | 0 | 0,0833 | 0 | 1 | 125 | 0 | 10,41 | 0 | |
| l_2 | 1,2 | 0,149 | 0,149 | 0,137 | 4,3 | 7,43 | 1,11 | 1,1 | -1,02 | |
| l_3 | 5 | 0,0833 | 0 | 0 | 1 | 125 | 10,41 | 0 | 0 | |
| l_4 | 1,2 | 0,149 | 0,149 | 0,137 | 4,3 | 7,43 | 1,11 | 1,11 | -1,02 | |
| l_5 | 14,5 | 0 | 0,0833 | 0 | 1 | 3049 | 0 | 254 | 0 | |
| l_6 | 1,2 | 0,149 | 0,149 | 0,137 | 4,3 | 7,43 | 1,11 | 1,11 | 1,02 | |
| l_7 | 2 | 0,0833 | 0 | 0 | 1 | 8 | 0,67 | 0 | 0 | |
| l_8 | 1,2 | 0,149 | 0,149 | 0,137 | 4,3 | 7,43 | 1,11 | 1,11 | 1,02 | |
| l_9 | 3 | 0 | 0,0833 | 0 | 1 | 27 | 0 | 2,25 | 0 | |
| Сумма собственных моментов инерции | | | | | | | $\sum I_x' = 15,52$ | $\sum I_y' = 271,1$ | $\sum I_{xy}' = 0$ | |

Таблица 1.3 – Определение центральных моментов инерции

| Отрезки | Приведенная длина отрезка $l_{пр}$, мм | Координаты центра тяжести отрезков, м | | Статические моменты отрезков, м ² | | $S_x \cdot y_c$ | $S_y \cdot x_c$ | $S_x \cdot y_c$ $= S_y \cdot x_c$ |
|--|--|--|-------------------------------------|---|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|
| | | y_c | x_c | $S_x = l_{пр} \cdot y_c$ | $S_y = l_{пр} \cdot x_c$ | | | |
| l_1 | 5 | 7,4 | -3,7 | 37 | -18,5 | 273,8 | 68,5 | -136,9 |
| l_2 | 8,1 | 6,96 | -0,44 | 56,4 | -3,6 | 392,5 | 1,6 | -24,8 |
| l_3 | 5 | 3,7 | 0 | 18,5 | 0 | 68,5 | 0 | 0 |
| l_4 | 8,1 | 0,44 | 0,44 | 3,6 | 3,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| l_5 | 14,5 | 0 | 8,45 | 0 | 122,5 | 0 | 1035,1 | 0 |
| l_6 | 8,1 | 0,44 | 16,46 | 3,6 | 133,3 | 1,6 | 2194,1 | 59,3 |
| l_7 | 2 | 2,2 | 16,9 | 4,4 | 33,8 | 9,7 | 571,2 | 74,4 |
| l_8 | 8,1 | 3,96 | 17,34 | 32,1 | 140,5 | 127,1 | 2436,3 | 556,6 |
| l_9 | 3 | 4,4 | 19,6 | 13,2 | 58,8 | 58,1 | 1152,5 | 258,7 |
| $l_{пр} = \sum l_{пр}$ = 61,9 | | $y_0 = \frac{S_x}{l_{пр}}$ = 2,72 | $x_0 = \frac{S_y}{l_{пр}}$ = 7,6 | $\sum S_x$ = 168,8 | $\sum S_y$ = 470,4 | $\sum S_x \cdot y_c$ = 932,9 | $\sum S_y \cdot x_c$ = 7460,9 | $\sum S_x \cdot y_c$ $= \sum S_y \cdot x_c$ = 788,9 |
| Сумма собственных моментов инерции (по таблице 1.2) | | | | | | $\sum I_x'$ = 15,52 | $\sum I_y'$ = 271,1 | $\sum I_{xy}' = 0$ |
| Моменты инерции участка относительно осей x, y | | | | | | $I_x = 948,4$ | $I_y = 7732$ | $I_{xy} = 788,9$ |
| Поправка на перенос осей в упругий центр тяжести | | | | | | $-L_{пр} \cdot y_0^2$ = -458 | $-L_{пр} \cdot x_0^2$ = -3575,3 | $-L_{пр} \cdot x_0 \cdot y_0$ = -1279,6 |
| Центральные моменты инерции участка относительно осей x_0, y_0 | | | | | | $I_{x_0} = 490,4$ | $I_{y_0} = 4156$ | $I_{x_0 y_0}$ = -490,7 |

1.2. Расчет на компенсацию температурных удлинений Г-образного участка

Г-образными компенсаторами называют естественные углы поворотов трубопровода, используемые для компенсации тепловых удлинений труб.

Использование поворотов трассы (самокомпенсация) применяется для всех способов прокладки тепловых сетей, независимо от диаметров трубопровода и параметров теплоносителя.

Расчёт Г-образного компенсатора заключается в определении длины короткого плеча, необходимого для компенсации тепловых удлинений длинного плеча компенсатора, при котором не будет превышено максимальное допустимое изгибающее напряжение.

Г-образный участок трубопровода с углом поворота 90° схематично представлен на рисунке 1.6.

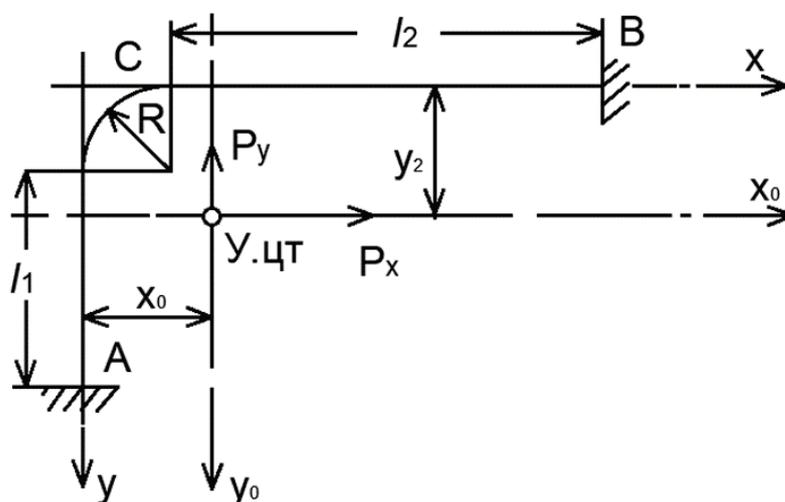


Рисунок 1.6 – Расчетная схема Г-образного участка трубопровода с углом поворота 90° (с учетом гибкости отвода)

Рекомендуется задаваться максимальным напряжением на участках самокомпенсации не более 70 МПа.

Полученные в результате расчета длины плеч, следует проверить на боковое смещение трубопровода, которое должно быть не более величины зазора (с учетом запаса около 50 мм) между наружной поверхностью изоляционной конструкции и строительной конструкцией.

Для компенсации тепловых удлинений труб используют повороты трубопровода с углом от 90 до 130° .

Расчетные формулы даны для условий расчета участков трубопровода с учетом и без учета гибкости отводов. Гибкость отвода учитывают для участков трубопроводов с гнутыми гладкими отводами при коротких прилегающих к отводу плечах. Коэффициенты k и m в этом случае определяют по формулам:

$$\text{при } h \leq 1: \quad k = 1,65/h,$$

где h – геометрическая характеристика гибкости трубы;

при $h > 1$:
$$k = \frac{10+12 \cdot h^2}{1+12 \cdot h^2}.$$

Геометрическая характеристика гибкости трубы определяют по формуле:

Рисунок 1.6 – Расчетная схема Г-образного участка трубопровода с углом поворота 90° (с учетом гибкости отвода)

$$h = s \cdot R / r_{cp}^2,$$

где s – номинальная толщина стенки трубы, мм;

r_{cp} – средний радиус трубы, мм;

R – радиус оси гнутой трубы или условный радиус сварного отвода, мм.

Средний радиус трубы определяют по формуле:

$$r_{cp} = (D_n - s) / 2, \text{ мм}$$

Величина k может быть определена по графику на рисунке 1.7.

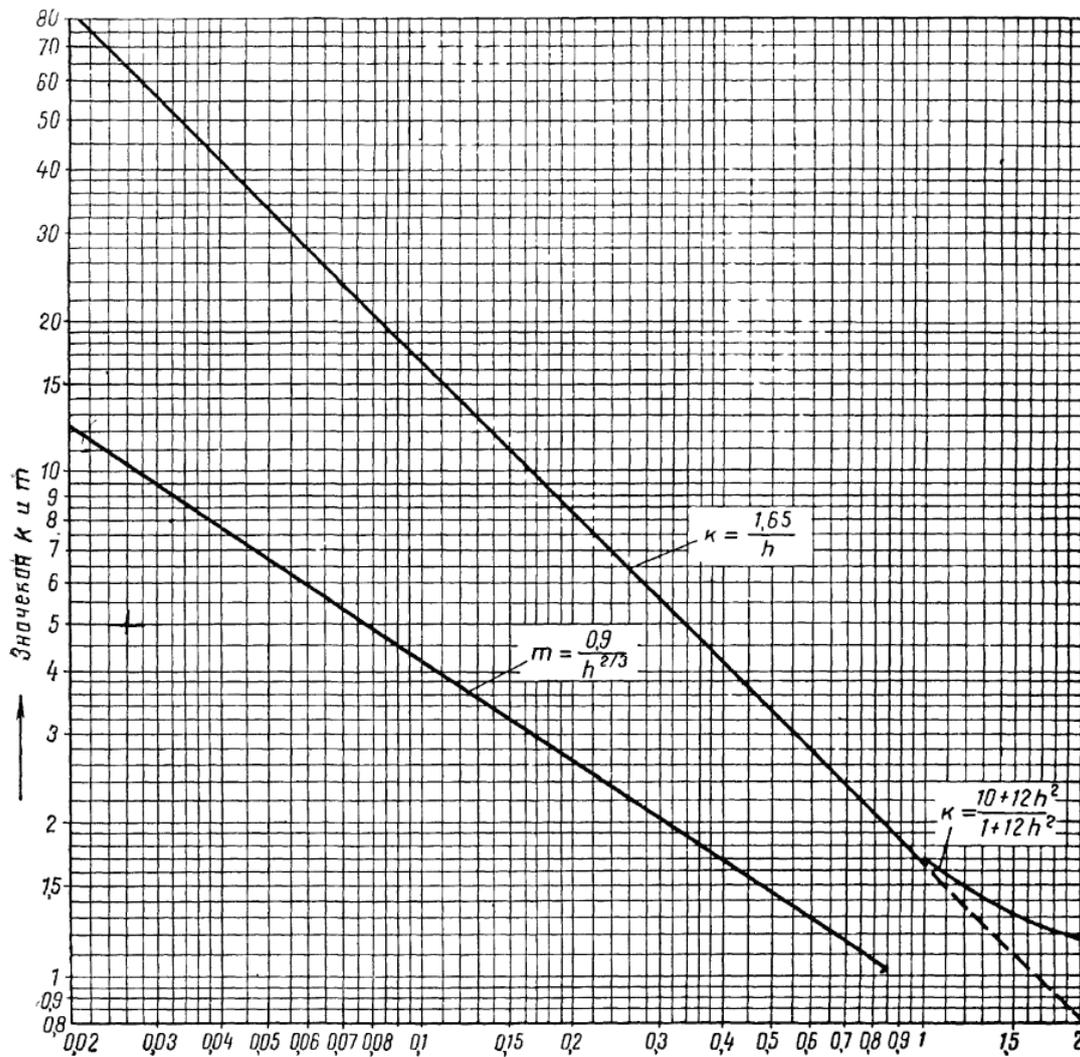


Рисунок 1.7 – График для определения коэффициента гибкости отвода k и коэффициента концентрации продольных изгибающих напряжений в отводах m

Коэффициент концентрации продольных изгибающих напряжений для гнутых гладких отводов определяют по формуле:

$$m = 0,9/h^{2/3},$$

или по графику на рисунке 1.7 и учитывают только при значениях m больших единицы (при $h < 0,85$).

При расчете участков трубопроводов со сварными и крутоизогнутыми отводами, а также при расчете участков трубопроводов с гнутыми гладкими отводами при длинных прилегающих к отводу плечах гибкость отводов не учитывают. Коэффициенты k и m в этом случае принимают равными единице.

В приведенных ниже формулах приняты следующие обозначения:

α – коэффициент линейного расширения трубной стали, мм/(м·град);

E – модуль упругости трубной стали, кг/см²;

I – момент инерции поперечного сечения стенки трубы, см³;

Δt – расчетная разность температур между максимальной температурой теплоносителя t и расчетной для проектирования отопления температурой наружного воздуха $t_{но}$, °С;

l – (с индексами) длины прямых отрезков трубопроводов, м;

R – радиус оси отвода, м;

D_n – наружный диаметр трубы, см.

Алгоритм расчета Г-образного компенсатора сведен в таблицу 1.4.

Результаты расчетов занесены в таблицу 1.5.

Величины изгибающих компенсационных напряжений, полученные по формулам в пунктах 28 и 29 таблицы 1.5, не должны превышать допустимого изгибающего напряжения, полученного по расчету на прочность.

Таблица 1.4 – Алгоритм расчета Г–образного компенсатора [2]

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, вывод, источник |
|-------|--|---|--------------------|----------------------------|
| 1 | Модуль упругости трубной стали | E | кг/см ² | $1,965 \cdot 10^6$ |
| 2 | Наружный диаметр трубы | D_n | мм | - |
| 3 | Толщина стенки трубы | s | мм | - |
| 4 | Коэффициент линейного расширения трубной стали | α | мм/(м·град) | $1,228 \cdot 10^{-2}$ |
| 5 | Длина линии участка трубопровода от точки A до начала изгиба | l_1 | м | - |
| 6 | Длина линии участка трубопровода от точки B до начала изгиба | l_2 | м | - |
| 7 | Радиус оси отвода | $R = D_n \cdot 3$ | м | - |
| 8 | Расчетная разность температур стенки трубы в данный момент при монтаже(обычно принимают как разность расчетной температуры воды в подаче и минус 20) | Δt | °C | 110 |
| 9 | Экваториальный момент инерции поперечного сечения стенки трубы | $I = \pi \cdot (D_n^4 - D_{вн}^4)/64$ | м ⁴ | [1] |
| 10 | Экваториальный момент сопротивления трубы | $W = (\pi \cdot (D_n^4 - D_{вн}^4)/32)/D_n$ | м ⁴ | [1] |
| 11 | Средний радиус трубы | $r_{cp} = (D_n - s)/2$ | м | - |
| 12 | Геометрическая характеристика отвода | $h = s \cdot R/r_{cp}^2$ | м | - |
| 13 | Коэффициент гибкости для гнутых гладких отводов при $h \leq 1$ | $k = 1,65/h$ | - | [1]- |

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, вывод, источник |
|-------|---|--|----------------|----------------------------|
| | (по формуле Кларка и Рейснера) при $h > 1$ по формуле Кармана | $k = \frac{10 + 12 \cdot h^2}{1 + 12 \cdot h^2}$ | | |
| 14 | Поправочный коэффициент напряжения для гнутых гладких труб (если $m < 1$, то принимают $m = 1$) | $m = 0,9/h^{2/3}$ | - | [2] |
| 15 | Расчетные тепловые удлинения вдоль оси x | $\Delta x = \alpha \cdot \Delta t \cdot (l_2 + R)$ | мм | - |
| 16 | Расчетные тепловые удлинения вдоль оси y | $\Delta y = -\alpha \cdot \Delta t \cdot (l_1 + R)$ | мм | - |
| 17 | Приведенная длина осевой линии участка трубопровода | $L_{пр} = l_1 + l_2 + 1,57 \cdot R \cdot k$ | м | - |
| 18 | Координаты упругого центра тяжести x_0 | $x_0 = (l_2 \cdot (0,5 \cdot l_2 + R) + 0,57 \cdot R^2 \cdot k) / L_{пр}$ | м | - |
| 19 | Координаты упругого центра тяжести y_0 | $y_0 = (l_1 \cdot (0,5 \cdot l_1 + R) + 0,57 \cdot R^2 \cdot k) / L_{пр}$ | мм | - |
| 20 | Центральные моменты инерции относительно оси y_0 | $I_{y_0} = l_2 \cdot \left(\left(\frac{l_2^2}{3} \right) + l_2 \cdot R + R^2 \right) + 0,335 \cdot R^3 \cdot k - L_{пр} \cdot x_0^2$ | м ³ | - |
| 21 | Центральные моменты инерции относительно оси x_0 | $I_{x_0} = l_1 \cdot \left(\left(\frac{l_1^2}{3} \right) + l_1 \cdot R + R^2 \right) + 0,335 \cdot R^3 \cdot k - L_{пр} \cdot y_0^2$ | м ³ | - |
| 22 | Центральные моменты инерции относительно оси $x_0 y_0$ | $I_{x_0 y_0} = 0,72 \cdot R^3 \cdot k - L_{пр} \cdot x_0 \cdot y_0$ | м ³ | - |
| 23 | Силы упругой деформации P_x | $P_x = (\Delta x \cdot I_{y_0} + \Delta y \cdot I_{x_0 y_0}) / (I_{x_0} \cdot I_{y_0} - I_{x_0 y_0}^2) \cdot E \cdot I \cdot 10^{-7}$ | кг | - |
| 24 | Силы упругой деформации P_y | $P_y = (\Delta y \cdot I_{x_0} + \Delta x \cdot I_{x_0 y_0}) / (I_{x_0} \cdot I_{y_0} - I_{x_0 y_0}^2) \cdot E \cdot I \cdot 10^{-7}$ | кг | - |
| 25 | Максимальный изгибающий момент на прямом отрезке при $l_1 \leq l_2$ в точке A | $M_{\max} = (l_1 + R - y_0) \cdot P_x + x_0 \cdot P_y$ | кг·м | [1] |

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, вывод, источник |
|-------|---|--|--------------------|----------------------------|
| 26 | Максимальный изгибающий момент на прямом отрезке при $l_1 \geq l_2$ в точке B | $M_{\text{макс}} = -(l_2 + R - x_0) \cdot P_y - y_0 \cdot P_x$ | кг·м | [2] |
| 27 | Максимальный изгибающий момент нагнутом отрезке в точке C (середина дуги) | $M = -(y_0 - 0,293 \cdot R) \cdot P_x + (x_0 - 0,293 \cdot R) \cdot P_y$ | кг·м | [2] |
| 28 | Изгибающие компенсационные напряжения на прямых участках, W - в см ³ | $\sigma_{\text{и}}^{\text{к}} = \frac{M}{W}$ | кг/мм ² | [2] |
| 29 | Изгибающие компенсационные напряжения на гнутых гладких отводах | $\sigma_{\text{и}}^{\text{к}} = \frac{Mm}{W}$ | кг/мм ² | |

Таблица 1.5 – Расчет Г-образных компенсаторов

| № п/п | Наименование угла поворота | УП1 | УП2 | УП3 | УП4... |
|-------|---|-----|-----|-----|--------|
| 1 | Модуль упругости трубной стали | | | | |
| 2 | Наружный диаметр трубы | | | | |
| 3 | Толщина стенки трубы | | | | |
| 4 | Коэффициент линейного расширения трубной стали | | | | |
| 5 | Длина линии участка трубопровода от точки A до начала изгиба | | | | |
| 6 | Длина линии участка трубопровода от точки B до начала изгиба | | | | |
| 7 | Радиус оси отвода | | | | |
| 8 | Расчетная разность температур стенки трубы в данный момент при монтаже (обычно принимают как разность расчетной температуры воды в подаче и минус 20) | | | | |
| 9 | Экваториальный момент инерции поперечного сечения стенки трубы | | | | |

| № п/п | Наименование угла поворота | УП1 | УП2 | УП3 | УП4... |
|-------|--|-----|-----|-----|--------|
| 10 | Экваториальный момент сопротивления трубы | | | | |
| 11 | Средний радиус трубы | | | | |
| 12 | Геометрическая характеристика отвода | | | | |
| 13 | Коэффициент гибкости для гнутых гладких отводов при $h \leq 1$ (по формуле Кларка и Рейснера) при $h > 1$ по формуле Кармана | | | | |
| 14 | Поправочный коэффициент напряжения для гнутых гладких труб (если $m < 1$, то принимают $m = 1$) | | | | |
| 15 | Расчетные тепловые удлинения вдоль оси x | | | | |
| 16 | Расчетные тепловые удлинения вдоль оси y | | | | |
| 17 | Приведенная длина осевой линии участка трубопровода | | | | |
| 18 | Координаты упругого центра тяжести x_0 | | | | |
| 19 | Координаты упругого центра тяжести y_0 | | | | |
| 20 | Центральные моменты инерции относительно оси y_0 | | | | |
| 21 | Центральные моменты инерции относительно оси x_0 | | | | |
| 22 | Центральные моменты инерции относительно оси $x_0 y_0$ | | | | |
| 23 | Силы упругой деформации P_x | | | | |
| 24 | Силы упругой деформации P_y | | | | |
| 25 | Максимальный изгибающий момент на прямом отрезке при $l_1 \leq l_2$ в точке A | | | | |
| 26 | Максимальный изгибающий момент на прямом отрезке при $l_1 \geq l_2$ в точке B | | | | |
| 27 | Максимальный изгибающий момент нагнутом отрезке в точке C (середины дуги) | | | | |
| 28 | Изгибающие компенсационные напряжения на прямых участках, W - в см^3 | | | | |
| 29 | Изгибающие компенсационные напряжения на гнутых гладких отводах | | | | |
| 30 | Максимальный | | | | |
| 31 | Допустимый | | | | |

1.3. Расчет на компенсацию температурных удлинений участков трубопровода с П-образными компенсаторами

Расчет П-образного компенсатора заключается в определении минимальных размеров компенсатора, достаточных для компенсации температурных деформаций трубопровода.

Максимальное напряжение в спинке компенсатора рекомендуется принимать 70 МПа.

Участки трубопровода от неподвижных опор до П-образного компенсатора рекомендуется принимать одинаковой длины. Если компенсатор располагают не посередине участка, а смещают в сторону одной из неподвижных опор, то силы упругой деформации и напряжения увеличиваются примерно на 20-40%, по отношению к значениям, полученным для компенсатора, расположенного посередине.

П-образные компенсаторы применяют для компенсации температурных удлинений труб на протяженных прямых участках, если возможности самокомпенсации трубопровода за счет поворотов тепловой сети – нет.

Отсутствие компенсаторов на жестко закрепленных трубопроводах с переменной температурой рабочей среды, приведет к росту напряжений способных деформировать и разрушить трубопровод.

Длина прилегающих к П-образному компенсатору плеч, как правило, большую протяженность, в связи с этим реакции сил трения опор вызывают дополнительные силы упругой деформации и напряжения в трубопроводах, которые учитывают в расчете на компенсацию тепловых удлинений сокращением длин прилегающих свободных плеч по сравнению с фактическими по $40D_y$.

Если расстояние от неподвижной опоры до компенсатора меньше $40D_y$, в расчете учитывают полную длину компенсирующего участка. При установке направляющих опор длину плеч, учитываемых в расчете, принимают равной расстоянию от направляющей опоры до компенсатора. Во всех случаях расчетное тепловое удлинение определяют для фактической величины компенсируемого участка, т.е. по расстоянию между неподвижными опорами.

Влияние длины прилегающих свободных плеч, учитываемых в расчете, на компенсирующую способность и силу упругой деформации определяются при длине прилегающих свободных плеч, равной $l_{\text{п}} = 40 D_y$, приняты за единицу, а для значений этих величин при $l_{\text{п}} = 10 D_y$; $l_{\text{п}} = 80 D_y$; $l_{\text{п}} = 0 D_y$ даны поправочные коэффициенты n_1 - к компенсирующей способности и n_2 - к силе упругой деформации компенсатора. Усредненные коэффициенты приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Значения поправочных коэффициентов n_1 и n_2 [2, стр. 206]

| Длина прилегающих плеч, учитываемых в расчете, $l_{\text{п}}$ | Поправочный коэффициент | |
|--|---------------------------------------|------------------------------------|
| | к компенсирующей способности n_1 | к силе упругой деформации n_2 |
| $40 D_y$ | 1 | 1 |
| $10 D_y$ | 0,9 | 1,3 |
| $0 D_y$ | 0,8 | 1,7 |

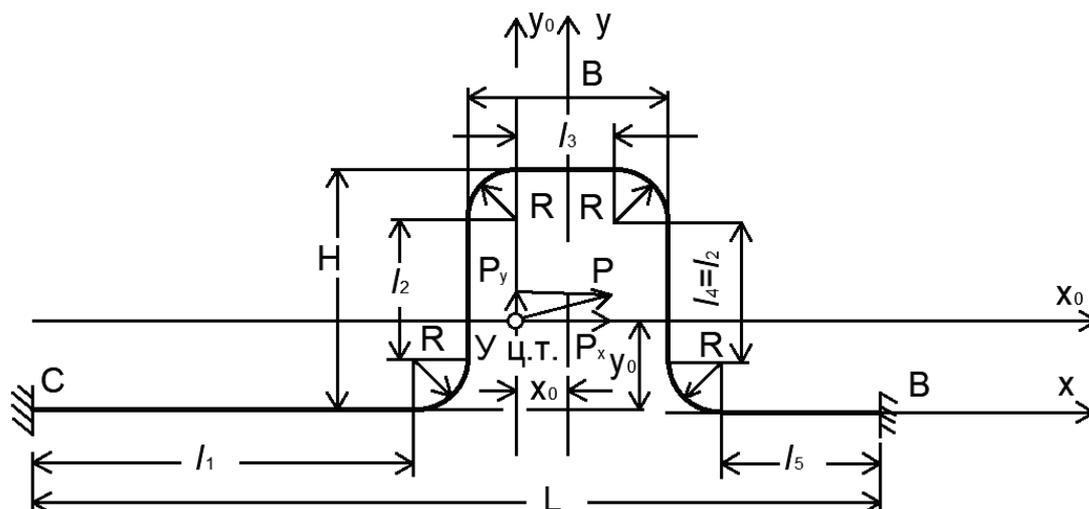


Рисунок 1.8 – Участок трубопровода с не симметричным П-образным компенсатором с гладкими гнутыми отводами при $l_1 > l_5$

Алгоритм расчета участка трубопровода с не симметричным П-образным компенсатором с гнутыми гладкими отводами внесен в таблицу 1.7.

Участок трубопровода с не симметричным П-образным компенсатором с гладкими гнутыми отводами при $l_1 > l_5$ представлен на рисунке 1.8.

Таблица 1.7 – Алгоритм расчета не симметричного П-образного компенсатора [2, стр.208]

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, вывод, источник | Расчетное значение |
|-------|---|---|--------------------|----------------------------|--------------------|
| 1 | Модуль упругости трубной стали | E | кг/см ² | $1,965 \cdot 10^6$ | |
| 2 | Наружный диаметр трубы | D_n | мм | - | |
| 3 | Толщина стенки трубы | s | мм | - | |
| 4 | Коэффициент линейного расширения трубной стали | α | мм/(м·град) | $1,228 \cdot 10^{-2}$ | |
| 5 | Длины линии участка трубопровода | l_1 | м | - | |
| | | l_2 | | | |
| | | l_3 | | | |
| | | l_4 | | | |
| | | l_5 | | | |
| 5 | Длина линии участка трубопровода от точки А до начала изгиба | l_1 | м | - | |
| 7 | Радиус оси отвода | $R = D_n \cdot 3$ | м | - | |
| 8 | Расчетная разность температур стенки трубы в данный момент при монтаже (обычно принимают как разность расчетной температуры воды в подаче и минус 20) | Δt | °С | 110 | |
| 9 | Экваториальный момент инерции поперечного сечения стенки трубы | $I = \pi \cdot (D_n^4 - D_{вн}^4)/64$ | м ⁴ | [1] | |
| 10 | Экваториальный момент сопротивления трубы | $W = (\pi \cdot (D_n^4 - D_{вн}^4)/32)/D_n$ | м ⁴ | [1] | |
| 11 | Средний радиус трубы | $r_{cp} = (D_n - s)/2$ | м | - | |
| 12 | Геометрическая характеристика отвода | $h = s \cdot R/r_{cp}^2$ | м | - | |

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, вывод, источник | Расчетное значение |
|-------|--|---|----------------|----------------------------|--------------------|
| 13 | Коэффициент гибкости гнутых гладких отводов при $h \leq 1$ (по формуле Кларка и Рейснера) при $h > 1$ по формуле Кармана | $k = 1,65/h$ $k = \frac{10 + 12 \cdot h^2}{1 + 12 \cdot h^2}$ | - | [1]- | |
| 14 | Поправочный коэффициент напряжения для гнутых гладких труб (если $m < 1$, то принимают $m=1$) | $m = 0,9/h^{2/3}$ | - | [2] | |
| 17 | Приведенная длина осевой линии участка трубопровода | $L_{пр} = l_1 + 2 \cdot l_2 + l_3 + l_5 + 6,28 \cdot R \cdot k$ | м | - | |
| 18 | Координаты упругого центра тяжести x_0 | $x_0 = (l_1 + l_3 + l_5 + 4 \cdot R) \cdot (l_5 - l_1) / 2 \cdot L_{пр}$ | м | - | |
| 19 | Координаты упругого центра тяжести y_0 | $y_0 = (l_2 + 2 \cdot R) \cdot (l_2 + l_3 + 3,14R \cdot k) / L_{пр}$ | мм | - | |
| 20 | Центральные моменты инерции относительно оси y_0 | $I_{y0} = \frac{l_1^3 + l_3^3 + l_5^3}{12} + \frac{l_1}{4}(l_1 + l_3 + 4R)^2$ $+ \frac{l_5}{4}(l_3 + l_5 + 4R)^2 + l_2 \left(\frac{l_3}{2} + R \right)^2$ $+ 1,57 \cdot R \cdot k \cdot (l_3^2 + 4l_3 \cdot R + 4,9 \cdot R^2)$ $- L_{пр} \cdot x_0^2$ | м ³ | - | |

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, вывод, источник | Расчетное значение |
|-------|---|--|--------------------|----------------------------|--------------------|
| 21 | Центральные моменты инерции относительно оси x_0 | $I_{x0} = \frac{l_3^2}{6} + (2l_2 + 4l_3) \left(\frac{l_2}{2} + R \right)^2 + 6,28Rk \left(\frac{l_2^2}{2} + 1,635l_2R + 1,5R^2 \right) - L_{пр}y_0^2$ | м^3 | - | |
| 22 | Центральный центробежный момент инерции относительно оси x_0, y_0 | $I_{xy0} = -L_{пр} \cdot x_0 \cdot y_0$ | м^3 | - | |
| 15 | Расчетные тепловые удлинения вдоль оси x (*) | $\Delta x = \varepsilon \cdot \Delta l_x$ | мм | - | |
| 16 | Расчетные тепловые удлинения вдоль оси y | $\Delta y = \varepsilon \cdot \Delta l_y$ | мм | - | |
| 23 | Силы упругой деформации P_x | $P_x = [(\Delta x \cdot I_{y0}) / (I_{x0} \cdot I_{y0} - I_{xy0}^2)] \cdot E \cdot I \cdot 10^{-7}$ | кг | - | |
| 24 | Силы упругой деформации P_y | $P_y = [(\Delta y \cdot I_{x0}) / (I_{x0} \cdot I_{y0} - I_{xy0}^2)] \cdot E \cdot I \cdot 10^{-7}$ | кг | | |
| 25 | Максимальный изгибающий момент на прямом отрезке в точке A | $M_{\text{макс}} = P_x \cdot (H - y_0) + P_y \cdot \left(-x_0 + \frac{l_3}{2} \right)$ | кг·м | [1] | |
| 26 | Максимальный изгибающий момент на прямом отрезке в точке B (<u>принимают наибольший из изгибающих моментов</u>) | $M_{\text{макс}} = P_x \cdot y_0 + P_y \left(l_5 + 2R + \frac{l_3}{2} + x_0 \right)$ | кг·м | [2] | |
| 28 | Изгибающие компенсационные напряжения на прямых участках, W - в см^3 | $\sigma_{\text{и}}^{\text{к}} = \frac{M}{W}$ | кг/мм ² | [2] | |
| 29 | Изгибающие компенсационные напряжения на гнутых гладких отводах | $\sigma_{\text{и}}^{\text{к}} = \frac{Mm}{W}$ | кг/мм ² | | |

(*) *Примечание.* Значения коэффициента ε приведены в таблице 1.8. При определении расчетного теплового участка трубопровода без предварительной растяжки коэффициент ε принимают равным единице.

Таблица 1.8 – Коэффициент ε [2, стр.184]

| Максимальная температура теплоносителя, °С | Предварительная растяжка компенсатора, % | Для расчета труб | |
|---|---|---|---|
| | | На холодное состояние $\varepsilon_{хо 1}$ | На рабочее состояние $\varepsilon_{раб}$ |
| $t < 250$ | 50 | 0,5 | 0,5 |
| $250 \leq t \leq 300$ | | 0,6 | |
| $250 < t < 400$ | | 0,7 | |
| $t \geq 400$ | 100 | 1 | 0,35 |

1.4. Особенности расчета симметричного П-образного компенсатора

В том случае, когда длины прилегающих свободных плеч, учитываемых в расчете по обе стороны компенсатора, равны между собой (рисунок 1.9), формулы упрощаются и принимают вид [2, стр.209]:

➤ приведенная длина осевой линии участка трубопровода:

- при $l_{\text{п}} > 0$ $L_{\text{пр}} = 2 \cdot l_{\text{п}} + 2 \cdot l_2 + l_3 + 6,28 \cdot R \cdot k$, м

- при $l_{\text{п}} = 0$ $L_{\text{пр}} = 2 \cdot l_2 + l_3 + 6,28 \cdot R \cdot k$, м;

➤ - координаты упругого центра тяжести:

$$y_0 = (l_2 + 2 \cdot R) \cdot (l_2 + l_3 + 3,14R \cdot k) / L_{\text{пр}}, \text{ м};$$

$$x_0 = 0;$$

➤ - центральный момент инерции относительно оси x_0 , м³:

$$I_{x0} = \frac{l_3^2}{6} + (2l_2 + 4l_3) \left(\frac{l_2}{2} + R \right)^2 + 6,28Rk \left(\frac{l_2^2}{2} + 1,635l_2R + 1,5R^2 \right) - L_{\text{пр}}y_0^2;$$

➤ - расчетное тепловое удлинение вдоль оси x определяется по формуле:

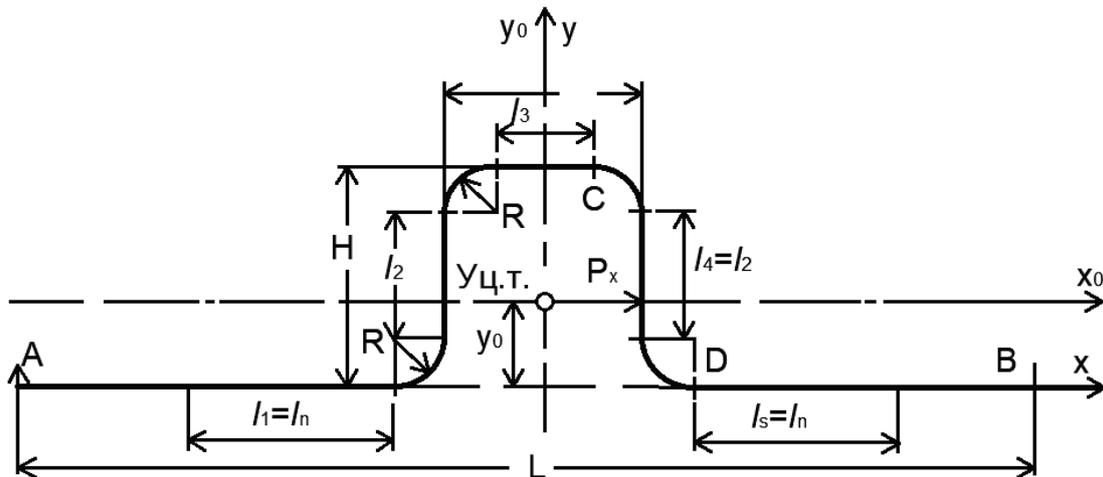


Рисунок 1.9 – Участок трубопровода с симметричным П-образным компенсатором с гнутыми гладкими отводами при $l_1 = l_5 = l_{\text{п}}$

$$\Delta x = \varepsilon \cdot \Delta l_x, \text{ м};$$

➤ - силы упругой деформации:

$$P_x = P_k = \frac{\Delta x \cdot E \cdot I \cdot 10^{-7}}{I_{x0}}, \text{ кг};$$

$$P_y = 0.$$

➤ - максимальный изгибающий момент:

- при $y_0 \leq 0,5 \cdot H$ в точке C: $M_{\text{макс}} = (H - y_0) \cdot P_k$, кг·м;

- при $y_0 \geq 0,5 \cdot H$ в точке D: $M_{\text{макс}} = -y_0 \cdot P_k$, кг·м;

➤ - изгибающие компенсационные напряжения:

- на спинке компенсатора на отводе: $\sigma_{\text{и}}^k = \frac{P_k(H-y_0)m}{W}$, кг/мм²

- на участках, прилегающих к компенсатору, на отводе

$$\sigma_{и(пр)}^к = \frac{\sigma_{и}^к \cdot y_0}{(H - y_0)}, \text{ кг/мм}^2;$$

- на прямых участках, прилегающих к компенсатору,

$$\sigma_{и(пр)}^к = \frac{\sigma_{и}^к \cdot y_0}{(H - y_0) \cdot m}, \text{ кг/мм}^2.$$

1.5. Расчет участка трубопровода с П-образным компенсатором с гнутыми гладкими отводами на самокомпенсацию

Алгоритм расчета участка трубопровода с П-образным компенсатором с гнутыми гладкими отводами на самокомпенсацию приведен в таблице 1.9.

П-образный компенсатор на самокомпенсацию схематично представлен на рисунке 1.10.

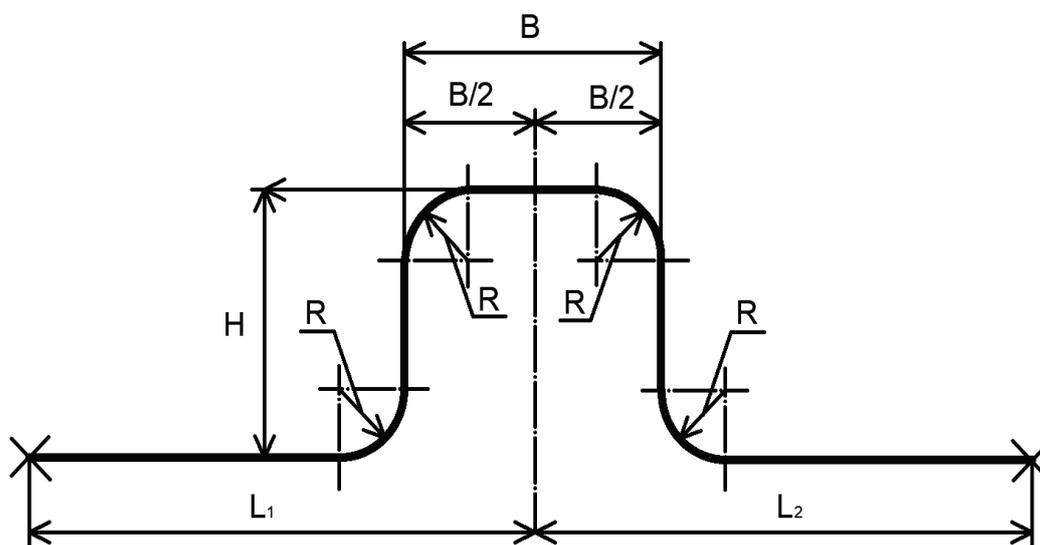


Рисунок 1.10 – К расчету на самокомпенсацию П-образного компенсатора

Результаты расчета заносятся в таблицу 1.10.

Таблица 1.9 – Алгоритм расчета П-образного компенсатора [2]

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, источник, вывод |
|-------|---|--|----------------|----------------------------|
| 1 | Расчетная температура теплоносителя в подающей линии | τ_1 | °С | |
| 2 | Расчетная температура наружного воздуха | τ_2 | °С | |
| 3 | Длина расчетного участка между неподвижными опорами | $L_{н.о.}$ | м | |
| 4 | Коэффициент температурного удлинения стали | α | 1/°С | $12 \cdot 10^{-6}$ |
| 5 | Температурное удлинение расчетного участка | $\Delta l = \alpha \cdot L_{н.о.} \cdot (\tau_1 - \tau_2)$ | | |
| 6 | Коэффициент, учитывающий релаксацию напряжений и предварительную растяжку компенсаторов | ε | - | 0,50 |
| 7 | Расчетное тепловое удлинение трубопровода | $\Delta x = \varepsilon \cdot \Delta l$ | м | |
| 8 | Наружный диаметр | D_H | м | |
| 9 | Внутренний диаметр | $D_{вн}$ | м | |
| 10 | Толщина стенки трубы | $\delta_{ст}$ | м | |
| 11 | Радиус изгиба отвода | $R = D_H \cdot 3$ | м | |
| 12 | Отношение длины спинки компенсатора B к его вылету H | $n_1 = B/H$ | - | |
| 13 | Допустимое напряжение | $\sigma_{доп}$ | МПа | 70 |
| 14 | Модуль инерции | $I = \pi \cdot (D_H^4 - D_{вн}^4)/64$ | м ⁴ | |
| 15 | Модуль упругости первого рода | E | МПа | $19,62 \cdot 10^4$ |
| 16 | Приближенная величина вылета компенсатора | $H = 0,82 \cdot \left((1,5 \cdot \Delta x \cdot E \cdot D_H) / \left((3 \cdot n_1 + 2) \cdot \sigma_{доп} \right) \right)^{1/2}$ | м | |

| № п/п | Величина | Формула, обозначение, действие | Размерность | Результат, источник, вывод |
|-------|--|---|-------------|----------------------------|
| 17 | Средний радиус трубы | $r_{cp} = (D_H - \delta_{ст})/2$ | м | |
| 18 | Геометрическая характеристика отвода | $h = \delta_{ст} \cdot R/r_{cp}^2$ | м | |
| 19 | Коэффициент понижения жесткости гладкого отвода т.к. $h \leq 1$ используем формулу Кларка или Рейснера | $k = 1,65/h$ | - | |
| 20 | Поправочный коэффициент напряжения для гнутых отводов | $m = 0,9/h^{2/3}$ | - | |
| 21 | Коэффициент | $A = \frac{1}{k} \cdot (\pi \cdot R \cdot H^2 - 2,28 \cdot R \cdot H + 1,4 \cdot R^3) + 0,667 \cdot H^3 + B \cdot H^3 - 4 \cdot R \cdot H^2 + 2 \cdot R^2 \cdot H - 1,33 \cdot R^3$ | - | |
| 22 | Напряжение в спинке компенсатора | $\sigma = (\Delta x \cdot E \cdot D_H \cdot H \cdot m)/2 \cdot A$ | МПа | |

Таблица 1.10 – Результаты расчета П-образного компенсатора на самокомпенсацию

| Наименование компенсатора | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 |
|--|----|----|----|----|----|----|----|
| Расчетная температура теплоносителя в подающей линии, °С | | | | | | | |
| Расчетная температура наружного воздуха, °С | | | | | | | |
| Длина расчетного участка между неподвижными опорами, м | | | | | | | |
| Коэффициент температурного удлинения | | | | | | | |
| Температурное удлинение расчетного участка, м | | | | | | | |
| Коэффициент, учитывающий релаксацию напряжений и предварительную растяжку компенсаторов | | | | | | | |
| Расчетное тепловое удлинение трубопровода, м | | | | | | | |
| Наружный диаметр, м | | | | | | | |
| Внутренний диаметр, м | | | | | | | |
| Толщина стенки трубы, м | | | | | | | |
| Радиус изгиба отвода, м | | | | | | | |
| Отношение длины спинки компенсатора B к его вылету H | | | | | | | |
| Допустимое напряжение, МПа | | | | | | | |
| Модуль инерции, м ⁴ | | | | | | | |
| Модуль упругости первого рода, МПа | | | | | | | |
| Приближенная величина вылета компенсатора, м | | | | | | | |
| Средний радиус трубы, м | | | | | | | |
| Геометрическая характеристика отвода, м | | | | | | | |
| Коэффициент понижения жесткости гладкого отвода т.к. $h \leq 1$ используем формулу Кларка или Рейснера | | | | | | | |
| Поправочный коэффициент напряжения для гнутых отводов | | | | | | | |
| Коэффициент | | | | | | | |
| Напряжение в спинке компенсатора, МПа | | | | | | | |

2. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТРУБОПРОВОДА ИЗ ВЧШГ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ

Прочностной расчет трубопровода из ВЧШГ при подземной прокладке рекомендуется выполнять согласно методике, приведенной в разделах 5.10 – 5.12[3] (для самотечного варианта), с учетом [4].

Выбираем исходные данные для расчета:

- наружный диаметр D_n , – 118,0 мм;
- толщина стенки трубы h – 9,0 мм;
- модуль упругости Юнга E – $1,7 \cdot 10^5$ Па;
- несущая способность трубы на внутреннее гидростатическое давление не засыпанного трубопровода P^0 – 9,7 МПа;
- расчетное сопротивление материала трубы на растяжение R_p – 100 МПа (при доверительной вероятности $p^* > 0,997$);
- глубина заложения от уровня земли до верха трубы H – 2,7 м;
- глубина грунтовых вод от уровня земли $H_{гв}$ – 2,0 м;
- удельный вес грунтовых вод γ_v – 0,01 МН/м³;
- удельный вес грунта засыпки траншеи $\gamma_{гр}$ 17,7 кН/м³ (Глина средняя или тяжёлая, разрыхлённая, суглинок плотный, категория грунта Г-III);
- модуль деформации грунта засыпки $E_{гр}$ – 2,2 МПа (для нормальной степени уплотнения);
- расчетное внутреннее гидростатическое давление в трубопроводе $P_{раб}$ – 1,6 МПа;
- атмосферное давление при образовании в трубопроводе вакуума $P_{вак}$ – 0,1 МПа;
- безразмерный коэффициент, используемый для обозначения класса труб, k – 9;
- коэффициент, учитывающий заложение откоса, $m_{з,0}$ – 0,5 (при укладке в траншею с наклонными стенками на плоское основание);
- коэффициент, учитывающий выступание трубы, χ – 0,98 (при опирании на плоское грунтовое основание);
- коэффициент, учитывающий перегрузки для внешних нагрузок, n – 1,15 (при вертикальном давлении грунта), n – 1,1 (при вертикальном давлении транспорта, например, НГ-60), n – 1,1 (при собственной массе трубопровода), n – 1,0 (при массе наполнителя), n – 1,0 (при горизонтальном давлении транспорта), n – 0,8 (при горизонтальном давлении грунта);
- коэффициент, учитывающий боковое давление грунта, $\lambda_{гр}$ – 0,05 (для нормальной степени уплотнения);
- коэффициент, учитывающий боковое давление грунта, λ_n – 0,2 (для нормальной степени уплотнения);
- динамический коэффициент, учитывающий подвижную нагрузку, μ_T – 1 (зависит от глубины заложения трубопровода);

- коэффициент, зависящий от схемы распределения нагрузок и опорной реакции, с учетом активного влияния бокового давления грунта, $f = 1$;
- коэффициент, учитывающий условия работы материала труб, $m = 0,5$ (при доверительной вероятности $p^* \geq 0,997$);
- равномерно распределенное давление от транспортной нагрузки $q_T = 16,5$ кН/м² (для НГ-60).

Выполняем вычисление нагрузок от давления грунта засыпки

Определяем ширину траншеи с наклонными стенками в соответствии с [5], используя исходные данные:

$$B_1 = D_H + 0,6 = 0,118 + 0,6 = 0,718, \text{ м.} \quad (2.1)$$

Определяем ширину траншеи по верху трубы, используя исходные данные и формулу (1):

$$B = B_1 + 2 \cdot D_H + m_{3,0} = 0,718 + 2 \cdot 0,118 + 0,5 = 1,45 \text{ м.} \quad (2.2)$$

Определяем среднюю ширину траншеи на высоте 1/2 от верха трубы, используя исходные данные и формулу (2.1):

$$B_{\text{ср}} = B_1 + 2 \cdot \left(D_H + \frac{H}{2}\right) \cdot m_{3,0} = 0,718 + 2 \cdot \left(0,118 + \frac{2,7}{2}\right) \cdot 0,5 = 2,186 \text{ м.} \quad (2.3)$$

Используя расчетные данные, полученные в формуле (2.3) и отношения $\frac{H}{B_{\text{ср}}} = \frac{2}{2,96} = 1,23$ в зависимости от категории грунтов, принимаем по таблице 2.1[3] коэффициент $K_{\text{тр}}$, учитывающий действие сил трения между засыпкой и стенками трубы, $K_{\text{тр}} = 0,84$.

Таблица 2.1 – Значения коэффициента $K_{\text{тр}}$

| H/D | Коэффициент $K_{\text{тр}}$ при категории грунтов засыпки | | |
|-------|---|------------------|-------|
| | Г-I; Г-II | Г-III; Г-IV; Г-V | Г-VI |
| 0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,1 | 0,981 | 0,984 | 0,986 |
| 0,2 | 0,962 | 0,968 | 0,974 |
| 0,3 | 0,944 | 0,952 | 0,961 |
| 0,4 | 0,928 | 0,937 | 0,948 |
| 0,5 | 0,91 | 0,923 | 0,936 |
| 0,6 | 0,896 | 0,91 | 0,925 |
| 0,7 | 0,881 | 0,896 | 0,913 |
| 0,8 | 0,867 | 0,883 | 0,902 |
| 0,9 | 0,852 | 0,872 | 0,891 |
| 1,0 | 0,839 | 0,862 | 0,882 |
| 1,1 | 0,826 | 0,849 | 0,873 |
| 1,2 | 0,816 | 0,84 | 0,865 |
| 1,3 | 0,806 | 0,831 | 0,857 |
| 1,4 | 0,796 | 0,823 | 0,849 |
| 1,5 | 0,787 | 0,816 | 0,842 |
| 1,6 | 0,778 | 0,809 | 0,835 |
| 1,7 | 0,765 | 0,79 | 0,815 |

| | | | |
|-----|-------|-------|-------|
| 1,8 | 0,75 | 0,775 | 0,80 |
| 1,9 | 0,735 | 0,765 | 0,79 |
| 2,0 | 0,725 | 0,75 | 0,78 |
| 3,0 | 0,63 | 0,66 | 0,69 |
| 4,0 | 0,555 | 0,585 | 0,62 |
| 5,0 | 0,49 | 0,52 | 0,56 |
| 6,0 | 0,435 | 0,47 | 0,505 |

Определяем параметр, характеризующий жесткость грунта засыпки, используя исходные данные:

$$P_{гр} = 0,125 \cdot E_{гр} = 0,125 \cdot 2,2 = 0,275 \text{ МПа} \quad (2.4)$$

Определяем параметр, характеризующий жесткость трубопровода, состоящего из отдельных раструбных труб, используя исходные данные:

$$P_{л} = 2 \cdot E \cdot \left(\frac{h}{D_H - h}\right)^n = 2 \cdot 1,7 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{9}{118 - 9}\right)^3 = 2,36 \text{ МПа}. \quad (2.5)$$

Определяем коэффициент, учитывающий разгрузку трубы от бокового давления грунта засыпки, используя исходные данные:

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot 0,257 \cdot (1,45 - 0,118)}{2,36 \cdot 0,98 \cdot 0,118}} = 0,285 \text{ МПа}. \quad (2.6)$$

Определяем коэффициент концентрации давления грунта засыпки при укладке труб на ненарушенный грунт в насыпи, используя исходные данные:

$$K_H = \frac{3 \cdot (P_{л} + P_{гр})}{2 \cdot (P_{л} + 2 \cdot P_{гр})} = \frac{3 \cdot (2,36 + 0,275)}{2 \cdot (2,36 + 2 \cdot 0,275)} = 1,358 \quad (2.7)$$

Для определения расчетной зависимости по определению вертикальной нагрузки от давления грунта засыпки, сравниваем произведения $B \cdot K_{тр} \cdot \Psi$ и $D_H \cdot K_H$, используя исходные данные и формулы (2.2) и (2.7):

$$\begin{aligned} B \cdot K_{тр} \cdot \Psi &= 1,45 \cdot 0,84 \cdot 0,285 = 0,347 \\ D_H \cdot K_H &= 0,118 \cdot 1,358 = 0,160 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Так как $B \cdot K_{тр} \cdot \Psi < D_H \cdot K_H$, то определение вертикальной нагрузки от давления грунта засыпки производим по формуле:

$$Q_m = n \cdot \gamma \cdot B \cdot K_{тр} \cdot \Psi = 1,15 \cdot 17,7 \cdot 0,347 = 7,06 \text{ кН/м}. \quad (2.9)$$

Определяем равнодействующую расчетной горизонтальной нагрузки от бокового давления грунта, используя исходные данные:

$$\begin{aligned} Q_{г} &= n \cdot \gamma \cdot \left(H + \frac{D_H}{2}\right) \cdot D_H \cdot \lambda_H = 0,8 \cdot 17,7 \cdot \left(2,7 + \frac{0,118}{2}\right) \cdot 0,118 \cdot \\ &0,2 = 0,92 \text{ кН/м}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Выполняем вычисление нагрузки от давления наземного транспорта

Определяем равнодействующую расчетной вертикальной нагрузки от давления наземного транспорта, используя исходные данные и формулу (2.7):

$$Q_{тр}^B = n \cdot q_{тр} \cdot D_H \cdot \mu_T \cdot K_H = 1,1 \cdot 16,5 \cdot 0,118 \cdot 1,0 \cdot 1,358 = 2,91 \text{ кН/м}. \quad (2.11)$$

Определяем равнодействующую расчетной горизонтальной нагрузки от давления наземного транспорта, используя исходные данные:

$$Q_{\text{тр}}^{\Gamma} = n \cdot q_{\text{тр}} \cdot \chi \cdot D_{\text{н}} \cdot \lambda_{\text{н}} = 1,1 \cdot 16,5 \cdot 0,118 \cdot 0,98 \cdot 0,2 = 0,419 \text{ кН/м.} \quad (2.12)$$

Определяем равнодействующую расчетной вертикальной нагрузки от собственного веса трубопровода, используя исходные данные:

$$Q_1 = n \cdot \pi \cdot \gamma_{\text{тр}} \cdot h \cdot (D_{\text{н}} - h) = 1,1 \cdot 3,14 \cdot 72,6 \cdot 0,009 \cdot (0,118 - 0,009) = 0,246 \text{ кН/м} \quad (2.13)$$

Определяем равнодействующую расчетной вертикальной нагрузки от веса транспортируемой воды, используя исходные данные:

$$Q_2 = 0,25 \cdot n \cdot \pi \cdot \gamma_{\text{тр}} \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot b = 0,25 \cdot 1 \cdot 3,14 \cdot 9,8 \cdot (0,118 - 2 \cdot 0,009)^2 \cdot 1 = 0,077 \text{ кН/м} \quad (2.14)$$

Определяем внешнее гидростатическое давление от грунтовых вод, используя исходные данные:

$$P_{\Gamma} = \gamma_{\text{гв}} \cdot (H - H_{\text{гв}}) = 0,01 \cdot (2,7 - 2,0) = 0,007 \text{ МПа.} \quad (2.15)$$

Выполняем вычисление прочности при действии на трубопровод внешних нагрузок

А) При действии на трубопровод давления грунта засыпки, передвижных транспортных средств, собственного веса трубы, внешнего гидростатического давления, веса транспортируемой воды:

Определяем расчетный изгибающий момент от действия грунтовой и транспортной нагрузок при укладке на плоское основание, используя исходные данные и формулы (2.9) и (2.11):

$$MB' = 0,235 \cdot (Q_{\text{т}}^{\text{в}} + Q_{\text{тр}}^{\text{в}}) \cdot r_{\text{ср}} = 0,235 \cdot (7,06 + 2,91) \cdot 0,059 = 0,138 \text{ кН/м.} \quad (2.16)$$

Определяем расчетный изгибающий момент от действия веса воды и собственного веса трубопровода при укладке на плоское основание, используя исходные данные и формулы (2.13) и (2.14):

$$MB'' = 0,18 \cdot (Q_1 + Q_2) \cdot r_{\text{ср}} = 0,18 \cdot (0,246 + 0,077) \cdot 0,059 = 0,003 \text{ кН/м.} \quad (2.17)$$

Определяем расчетный изгибающий момент от действия горизонтальных нагрузок, используя исходные данные и формулы (2.10) и (2.12):

$$M_{\Gamma} = -0,125 \cdot (Q_{\Gamma} + Q_{\text{тр}}^{\Gamma}) \cdot r_{\text{ср}} = -0,125 \cdot (0,92 + 0,419) \cdot 0,059 = -0,009 \text{ кН/м.} \quad (2.18)$$

Определяем максимальный изгибающий момент от действия грунтовой и транспортной нагрузок, используя исходные данные и формулы (2.16), (2.17) и (2.18):

$$M = MB' + MB'' + M_{\Gamma} = 0,138 + 0,003 - 0,009 = 0,132 \text{ кН/м.} \quad (2.19)$$

Определяем расчетную линейную приведенную эквивалентную нагрузку, используя исходные данные и формулу (2.19):

$$Q_{\text{пр}}^0 = \frac{M}{0,318 \cdot r_{\text{ср}}} = \frac{0,132}{0,318 \cdot 0,059} = 7,035 \text{ кН/м.} \quad (2.20)$$

Определяем коэффициент, учитывающий влияние поддерживающего действия (отпора) грунта, используя исходные данные и формулы (2.4), (2.5) и (2.15):

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{P_{гр}}{P_{л} + 0,413 \cdot P_{г}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,275}{2,36 + 0,413 \cdot 0,002}} = 0,897 \text{ кН/м.} \quad (2.21)$$

Определяем предельную раздавливающую внешнюю нагрузку, действующую на трубопровод, уложенный в грунте, используя исходные данные и формулу (2.21):

$$Q_{г}^0 = \frac{m \cdot R \cdot h^2}{0,95 \cdot \xi \cdot D_{н}} = \frac{1,0 \cdot 300 \cdot 9,0^2}{0,95 \cdot 0,897 \cdot 118} = 80,55 \text{ кН/м.} \quad (2.22)$$

Для труб класса К-9 $Q_{г}^0 = 96,4 \text{ кН/м.}$

Рассчитываем коэффициенты запаса прочности:

$$K_o' = \frac{80,55}{7,035} = 11,45; K_o'' = \frac{96,4}{7,035} = 13,7 \quad (2.23)$$

Условие прочности соблюдается.

Б) При действии грунта засыпки, атмосферного давления при образовании в трубопроводе вакуума, собственного веса трубопровода, веса воды:

Суммарный момент от действия этих нагрузок, без учета транспортных нагрузок $M = 0,098 + 0,003 - 0,006 = 0,095 \text{ кН/м}$, тогда расчетная приведенная нагрузка по формуле (2.20) равна $5,06 \text{ кН/м}$.

Определяем коэффициент, учитывающий влияние отпора грунта при образовании в трубопроводе вакуума, используя исходные данные и формулы (2.4), (2.5) и (2.15):

$$\xi_{в} = \frac{1}{1 + \frac{P_{гр} - P_{в}}{P_{л} + 0,413 \cdot P_{г}}} = \frac{1}{1 + \frac{0,275 - 0,1}{2,36 + 0,413 \cdot 0,002}} = 0,931 \text{ кН/м.} \quad (2.24)$$

Определяем предельно допустимую раздавливающую внешнюю нагрузку при образовании в трубопроводе вакуума:

$$Q_{г}^0 = \frac{m \cdot R \cdot h^2}{0,95 \cdot \xi \cdot D_{н}} = \frac{1,0 \cdot 100 \cdot 9,0^2}{0,95 \cdot 0,931 \cdot 118} = 77,61 \text{ кН/м.} \quad (2.25)$$

Условие прочности соблюдается: $77,61 \text{ кН/м} > 7,035 \text{ кН/м}$, коэффициент запаса прочности

$$K = 77,61/5,06 = 15,34.$$

Расчеты показали, что труба из ВЧШГ диаметром 118 мм класса К-9 удовлетворяет требованиям надежной работы подземного напорного трубопровода при образовании вакуума.

Выполняем вычисление устойчивости при воздействии на трубопровод внешних нагрузок

Определяем критическое внешнее равномерное давление исходя из условия: $P_{гр} < \frac{P_{л}}{4}$, получаем, что $P_{гр} = 0,275 \text{ МПа} < 0,339 \text{ МПа}$, тогда $q_{кр} = P_{л} = 2,36 \text{ МПа}$.

Определяем равномерно распределенное давление от действующей нагрузки с учетом q_1 и без учета q_2 воздействия транспортных нагрузок:

а) при действии на трубопровод внешних нагрузок:

$$q_1 = \frac{Q_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{н}}} = \frac{7,035}{11,8} = 0,596 \text{ МПа} \Rightarrow K_0 = \frac{q_{\text{кр}}}{q_1} = \frac{2,36}{0,596} = 3,958 \quad (2.26)$$

$$q_2 = \frac{Q_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{н}}} = \frac{5,06}{11,8} = 0,428 \text{ МПа} \Rightarrow K_0 = \frac{q_{\text{кр}}}{q_1} = \frac{2,36}{0,428} = 5,514 \quad (2.27)$$

б) при образовании в трубопроводе вакуума:

$$q_1 = \frac{Q_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{н}}} + P_{\text{в}} = \frac{7,035}{11,8} + 0,1 = 0,696 \text{ МПа} \Rightarrow K_0 = \frac{q_{\text{кр}}}{q_1} = \frac{2,36}{0,696} = 3,390 \quad (2.28)$$

$$q_2 = \frac{Q_{\text{ЭКВ}}}{D_{\text{н}}} + P_{\text{в}} = \frac{5,06}{11,8} + 0,1 = 0,528 \text{ МПа} \Rightarrow K_0 = \frac{q_{\text{кр}}}{q_1} = \frac{2,36}{0,528} = 4,469 \quad (2.29)$$

Условиям устойчивости трубопровод удовлетворяет.

Выполняем вычисление жесткости (по деформации) при внешнем нагружении расчетной приведенной нагрузкой

Определяем допустимый прогиб труб с цементно-песчаным покрытием в грунте, используя исходные данные и формулы (2.5), (2.20) и (2.21):

$$f = \frac{Q_{\text{пр}}^0}{4 \cdot R_{\text{л}}} \cdot \xi = \frac{7,035 \cdot 0,897}{4 \cdot 2,36} = 0,668 \text{ мм.} \quad (2.30)$$

$$0,668 \leq 0,03 \cdot 118 = 3,54 \text{ мм.} \quad (2.31)$$

Коэффициент запаса прочности в этом случае $K_0 = 3,54/0,668 = 5,3$.

Расчеты показали, что при заданных параметрах внешней нагрузки трубы из ВЧШГ диаметром 100 мм класса К-9 полностью удовлетворяют требованиям по прочности, устойчивости и жесткости от воздействия внешних нагрузок.

Производим проверку трубопровода на комбинированную нагрузку для не засыпанного и засыпанного трубопроводов

Определяем несущую способность трубы на внутреннее гидростатическое давление засыпанного трубопровода, используя исходные данные:

$$P_0 = \frac{R_{\text{п}} \cdot h}{r_0} = \frac{100 \cdot 9,0}{50} = 1,8 \text{ МПа.} \quad (2.32)$$

Определяем значение допустимого внутреннего давления для труб класса К-9 соответственно для не засыпанного и засыпанного трубопроводов, используя исходные данные и формулы (2.20) и (2.32):

$$P_{\text{доп}}' = P_0 \cdot \left(1 - \frac{Q_{\text{пр}}^0}{Q_0}\right) = 1,8 \cdot \left(1 - \frac{7,035}{96,4}\right) = 1,668 \text{ МПа.} \quad (2.33)$$

$$P_{\text{доп}}'' = P_0 \cdot \left(1 - \frac{Q_{\text{пр}}^0}{Q_0}\right) = 1,8 \cdot \left(1 - \frac{7,035}{80,55}\right) = 1,643 \text{ МПа.} \quad (2.34)$$

Для трубы диаметром 100 мм по данным таблицы 2.2[3]:

$P_{\text{доп}} = 7,5 \text{ МПа}$, заданное рабочее давление $P_{\text{раб}} = 1,6 \text{ МПа}$.

Таблица 2.2 – Допустимое внутреннее гидравлическое давление в трубопроводе с раструбными соединениями «TYTON» и «RJ», МПа, для труб класса К-9

| Условный проход, мм | «TYTON» | | | «RJ» | | |
|---------------------|------------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| | $P_{\text{доп}}$ | $P_{\text{и}}$ | $P_{\text{г}}$ | $P_{\text{доп}}$ | $P_{\text{и}}$ | $P_{\text{г}}$ |
| 80 | 6,4 | 8,0 | 8,5 | 8,8 | 11,0 | 11,5 |
| 100 | 6,4 | 8,0 | 8,5 | 7,5 | 9,4 | 9,9 |
| 125 | 6,4 | 8,0 | 8,5 | 6,3 | 7,9 | 8,4 |
| 150 | 6,4 | 8,0 | 8,5 | 6,3 | 7,9 | 8,4 |
| 200 | 6,2 | 7,75 | 8,25 | 4,9 | 6,1 | 6,6 |
| 250 | 5,4 | 6,75 | 7,25 | 3,6 | 4,5 | 5,0 |
| 300 | 4,9 | 6,12 | 6,61 | 3,4 | 4,2 | 4,7 |
| 350 | 4,5 | 5,62 | 6,12 | 3,0 | 3,7 | 4,2 |
| 400 | 4,2 | 5,25 | 5,75 | 2,5 | 3,1 | 3,6 |
| 500 | 3,8 | 4,75 | 5,25 | 2,5 | 3,1 | 3,6 |
| 600 | 3,6 | 4,5 | 5,0 | - | - | - |
| 700 | 3,4 | 4,25 | 4,75 | - | - | - |
| 800 | 3,2 | 4,0 | 4,5 | - | - | - |
| 900 | 3,1 | 3,9 | 4,4 | - | - | - |
| 1000 | 3,0 | 3,75 | 4,25 | - | - | - |

Определяем коэффициенты запаса прочности на внутреннее давление, используя исходные данные и формулы (2.33) и (2.34):

$$K_o' = \frac{1,668}{1,6} = 1,042; K_o'' = \frac{1,643}{1,6} = 1,026; \quad (2.35)$$

Определяем значение испытательного давления для трубопровода диаметром 100 мм класса К-9, используя исходные данные:

$$P_{\text{и}} = 1,25 \cdot P_{\text{раб}} = 1,25 \cdot 1,6 = 2,0 \text{ МПа}. \quad (2.36)$$

Определяем значение приемочного давления для трубопровода диаметром 100 мм класса К-9, используя исходные данные и формулы (2.36):

$$P_{\text{г}} = P_{\text{и}} + 0,5 = 2,0 + 0,5 = 2,5 \text{ МПа}. \quad (2.37)$$

Для расчетов рекомендуется использовать также график несущей способности труб не засыпанного трубопровода, приведенного на рисунке 2.1[3], который позволяет определить значения внешней приведенной нагрузки от заданных величин внутреннего давления и наоборот.

Величина допустимого давления из условия прочности в трубопроводе при $Q_{\text{пр}} = 7,035 \text{ кН/м}$ для трубы класса К-9 равна 8,5 МПа (по графику рисунка 2.1), $P_{\text{и}} = 2,0 \text{ МПа}$, $P_{\text{г}} = 2,5 \text{ МПа}$.

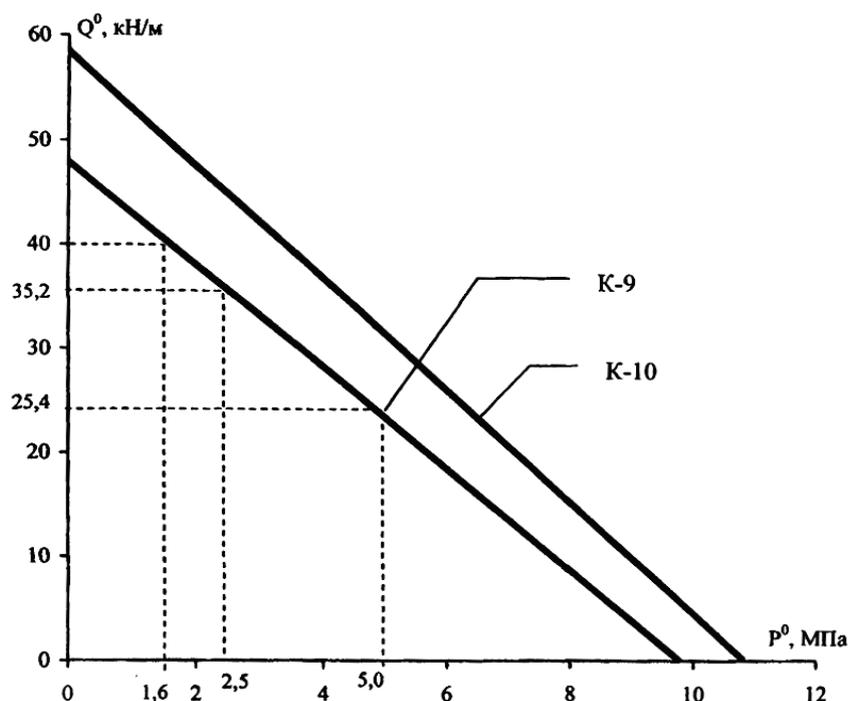


Рисунок 2.1 – Графики прочности труб диаметром 600 мм классов К-9 и К-10

Минимальную диаметральную жесткость трубы диаметром 100 мм класса К-9 определяем по Приложению С-1 к [4], $S = 1350 \text{ кН/м}^2$.

Определяем фактическую диаметральную жесткость трубы 100 мм, используя исходные данные:

$$S_{\phi} = 1000 \cdot \frac{E}{12} \cdot \left(\frac{h}{D_H - h} \right)^3 = 1000 \cdot \frac{170000}{12} \cdot \left(\frac{0,009}{0,118 - 0,009} \right)^3 = 7974,7 \text{ МПа.} \quad (2.38)$$

Фактическая диаметральная жесткость больше минимальной, то есть $7974,7 \text{ МПа} > 1350 \text{ МПа}$.

Расчеты показали, что трубопровод диаметром 100 мм класса К-9 удовлетворяет всем прочностным требованиям, предъявляемым к не засыпанному и засыпанному трубопроводам, при рабочем давлении 1,6 МПа.

ГОСТ ISO 2531—2012

Диаметральный прогиб в процентах составляет одну сотую часть от вертикального прогиба в миллиметрах, деленного на номинальный наружный диаметр DE в миллиметрах. Значения допустимого диаметрального прогиба, указанные в таблице С.1, относятся к трубам класса К9 с цементной футеровкой; они обеспечивают целостность соединения так же, как надежность от перегрузок стенок трубы и чрезмерного растрескивания футеровочного слоя. Изготовители могут устанавливать более строгие ограничения, такие как 3 %.

Диаметральную жесткость труб S определяют по следующей формуле

$$S = 1000 \frac{EI}{D^3} = 1000 \frac{E}{12} \left(\frac{e}{D} \right)^3, \quad (С.1)$$

где S — диаметральная жесткость труб, кН/м^2 ;

E — модуль упругости материала, МПа (170000 МПа);

I — второй момент инерции площади стенки трубы на единицу длины, мм^3 ;

D — средний диаметр трубы ($DE - e$), мм;

e — толщина стенки трубы, мм;

DE — номинальный наружный диаметр, мм.

Приложение С
(справочное)

Жесткость труб и диаметральный прогиб

Трубы из чугуна с шаровидным графитом могут испытывать большие диаметральные прогибы при эксплуатации, сохраняя все функциональные характеристики. Допустимые диаметральные прогибы труб при эксплуатации трубопровода приведены в таблице С.1 вместе с их минимальной диаметральной жесткостью, которая позволяет трубам выдерживать большую толщину покрытия и/или большие дорожные нагрузки при широком диапазоне условий эксплуатации.

Таблица С.1 — Допустимый диаметральный прогиб

| <i>DN</i> , мм | Минимальная диаметральная жесткость <i>S</i> трубы К9, кН/м ² | Допустимое диаметральное отклонение, % |
|----------------|--|--|
| 40 | 14000 | 0,45 |
| 50 | 8000 | 0,55 |
| 60 | 5000 | 0,65 |
| 65 | 4000 | 0,70 |
| 80 | 2400 | 0,85 |
| 100 | 1350 | 1,05 |
| 125 | 800 | 1,30 |
| 150 | 480 | 1,55 |
| 200 | 230 | 1,90 |
| 250 | 155 | 2,20 |
| 300 | 110 | 2,50 |
| 350 | 88 | 2,70 |
| 400 | 72 | 2,90 |
| 450 | 61 | 3,05 |
| 500 | 52 | 3,25 |
| 600 | 41 | 3,55 |
| 700 | 34 | 3,75 |
| 800 | 30 | 4,00 |
| 900 | 26 | 4,00 |
| 1000 | 24 | 4,00 |
| 1100 | 22 | 4,00 |
| 1200 | 20 | 4,00 |
| 1400 | 18 | 4,00 |
| 1500 | 17 | 4,00 |
| 1600 | 17 | 4,00 |
| 1800 | 16 | 4,00 |
| 2000 | 16 | 4,00 |
| 2200 | 15 | 4,00 |
| 2400 | 14 | 4,00 |
| 2600 | 13 | 4,00 |

Примечание — Значения *S* были рассчитаны при предположении, что толщина стенки трубы равна минимальной толщине плюс половина допуска, с учетом того, что имеется только небольшое количество точек, где толщина равна или близка к минимальной толщине.

3. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ

Расчет трубопроводов тепловых сетей на прочность производят на рабочее состояние, при котором принимают:

а) *внутреннее давление теплоносителя* – равным наибольшему рабочему давлению с учетом возможного повышения его при изменениях в режиме работы оборудования (турбин, насосов), а для водяных сетей (и конденсатопроводов) также с учетом отметки положения трубопроводов. Для подающего и обратного трубопроводов тепловых сетей допускается принимать различную величину рабочего давления в соответствии с действительным гидравлическим режимом системы, но не менее 10 кгс/см^2 ;

б) *температуру стенки трубы* – равной максимально возможной температуре теплоносителя; для паропроводов – по температуре пара на коллекторе источника тепла с учетом колебаний в температуре при различных режимах работы оборудования (турбин, котлов); для конденсатопроводов – по температуре конденсата после конденсатоотводчиков или конденсатных насосов; для подающего трубопровода двухтрубной водяной сети – по наивысшей расчетной температуре на коллекторе источника тепла (с учетом повышения температуры на потери тепла в тепловой сети), а для обратного трубопровода – по наивысшей расчетной температуре воды по графику температур с учетом температуры, принимаемой во время тепловых испытаний тепловой сети (но не менее $100 \text{ }^\circ\text{C}$);

в) *расчетный вес* – равным весу трубы, теплоизоляционной конструкции и воды при теплоносителе – воде и весу трубы и теплоизоляционной конструкции при паре. Определившиеся при расчете на рабочее состояние пролет между опорами (для паропроводов) и габариты гибких компенсаторов (при учете их предварительной растяжки в холодном состоянии) проверяют на холодное состояние, при котором принимают:

а) *внутреннее давление теплоносителя равным рабочему давлению*;

б) *температуру стенки трубы равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$* ;

в) *расчетный вес равным весу трубы, теплоизоляционной конструкции и воды*.

Номинальное допускаемое напряжение и модуль упругости стали принимают соответствующими той температуре стенки, для которой производят расчет.

Расчет трубопроводов на прочность производят для наиболее напряженного сечения, т. е. для сечения, в котором сочетание действующих нагрузок создает максимальное суммарное эквивалентное напряжение.

При проверке сечения с поперечным сварным швом напряжения от всех нагрузок, кроме внутреннего давления, определяют с учетом коэффициента прочности поперечного сварного шва.

Толщину стенки трубы, находящуюся под внутренним давлением, определяют при рабочем давлении теплоносителя по формулам:

- при гибких компенсаторах и самокомпенсации (неразрезанные трубы):

$$s' = \frac{P_{\text{раб}} \cdot D_{\text{н}}}{230 \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot \varphi + P_{\text{раб}}} + c, \text{ мм}; \quad (3.1)$$

- при сальниковых компенсаторах (разрезанные трубы):

$$s' = \frac{P_{\text{раб}} \cdot D_{\text{н}}}{200 \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot \varphi + P_{\text{раб}}} + c, \text{ мм}, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление теплоносителя, кг/см²;

$D_{\text{н}}$ – наружный диаметр трубы, мм;

c – прибавка к расчетной толщине стенки трубы, мм;

$\sigma_{\text{доп}}$ – допускаемое напряжение от внутреннего давления, кг/мм², принимают равным номинальному допускаемому напряжению $\sigma_{\text{доп}}^*$ и определяют по таблице 3.1;

φ – коэффициент прочности продольного или спирального сварного шва; принимают для сварных труб по таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Номинальные допускаемые напряжения $\sigma_{\text{доп}}$, кг/мм²

| Расчетная температура стенки трубы, °С | Номинальные допускаемые напряжения для марок стали $\sigma_{\text{доп}}$, кг/мм ² | | | | | |
|--|---|------|-------|--------|------|-------|
| | Ст.2 | 10 | Ст.3 | 15 | Ст.4 | 20 |
| 20 | 11,7 | 12 | 13 | 13,3 | 14,3 | 14,7 |
| 100 | 11,15 | 11,5 | 12,4 | 12,765 | 13,6 | 14,05 |
| 150 | 10,8 | 11,2 | 12,05 | 12,4 | 13,2 | 13,65 |
| 200 | 10,5 | 10,9 | 11,7 | 12,1 | 12,8 | 13,3 |
| 240 | 9,7 | 10 | 10,7 | 11,1 | 11,7 | 12,2 |
| 260 | 9,3 | 9,6 | 10,3 | 10,6 | 11,1 | 11,6 |
| 280 | 8,9 | 9,2 | 9,8 | 10,1 | - | 11,1 |
| 300 | 8,5 | 8,8 | 9,4 | 9,7 | - | 10,5 |
| 320 | - | 8,3 | - | 9,2 | - | 10 |
| 340 | - | 7,9 | - | 8,7 | - | 9,5 |
| 360 | - | 7,5 | - | 8,2 | - | 9,0 |
| 380 | - | 7,1 | - | 7,7 | - | 8,5 |
| 400 | - | 6,7 | - | 7,3 | - | 8 |
| 410 | - | 6,5 | - | 7,1 | - | 7,7 |
| 420 | - | 6,3 | - | 6,9 | - | 7,5 |
| 430 | - | 5,9 | - | 6,5 | - | 7,3 |

Примечание. Для промежуточных значений расчетной температуры стенки трубы допускаемое напряжение определяют интерполяцией между двумя ближайшими величинами с округлением результата до 0,05 кг/мм² в сторону меньшей величины. Значения $\sigma_{\text{доп}}^*$ для температур стенки трубы 100 и 150 °С определены интерполяцией.

Таблица 3.2 – Коэффициенты прочности сварного шва

| Конструкция шва и способ сварки | Коэффициент прочности сварного шва |
|--|------------------------------------|
| Стыковой шов при ручной сварке с подваркой со стороны вершины шва | 0,95 |
| Стыковой шов при ручной односторонней сварке при наличии со стороны вершины шва подкладки или кольца, прилегающих к основному металлу по всему периметру | 0,9 |

| | |
|---|-----|
| Стыковой шов при ручной односторонней сварке | 0,7 |
| Стыковой шов с двухсторонним проваром, выполняемый автоматической сваркой под слоем флюса | 1,0 |
| Стыковой шов, свариваемый только с одной стороны автоматической сваркой под слоем флюса | 0,8 |

Примечание. Коэффициент прочности спирального шва для сварных труб по ГОСТ 8696 с учетом допускаемого по ГОСТ непровара шва принимают равным 0,6.

Толщину стенки трубы s' , определенную по формулам (3.1) и (3.2), округляют до ближайшего большего размера s по «Сортамент труб тепловых сетей» или по ГОСТ. Округление толщины стенки в меньшую сторону разрешается на величину не более 3 % от величины $(s' - c)$.

Величину прибавки c для бесшовных труб определяют по формуле:

$$c = A_1 \cdot (s' - c), \text{ мм}, \quad (3.3)$$

где A_1 – коэффициент, принимаемый в зависимости от величины технологических минусовых допусков на толщину стенки труб, предусмотренных ГОСТ:

при минусовом допуске 15 % $A_1 = 0,2$

то же – 10 % $A_1 = 0,15$

..... – 5 % $A_1 = 0,1$.

При минусовых допусках, имеющих промежуточное значение, коэффициент A_1 определяют интерполяцией.

Определенная по формуле (3.3) величина c включает компенсацию утонения стенки в гibaх труб при условии, что средний радиус гiba будет не менее $3,5 \cdot D_n$.

При применении гнутых труб с радиусами гiba меньшими, чем указанные выше, величина коэффициента A_1 должна быть умножена на величину $\frac{3,5 \cdot D_n}{R}$, где R – радиус оси гнутой трубы, мм.

Величину прибавки c для сварных труб принимают равной величине допускаемых минусовых отклонений по толщине стального листа по соответствующим ГОСТам.

Величину прибавки c во всех случаях принимают не менее 0,5 мм.

Для применяемых в тепловых сетях бесшовных труб обычной точности значение коэффициента A_1 принимают равным 0,2, так как отклонение по толщине стенки при изготовлении этих труб по ГОСТ составляет 15 %.

Величину прибавки c для сварных труб, учитывающую минусовое отклонение по толщине стенки трубы, принимают на сталь рулонную и на сталь прокатную толстолистовую:

при толщине листа $5 \div 5,5$ мм $c = 0,5$ мм;

то же $6 \div 7$ мм $c = 0,6$ мм;

8 мм и более $c = 0,8$ мм.

Величину прибавки c для сварных труб обычной точности изготовления принимают равной 10 %, а по ГОСТ 3262 – 15 % от толщины стенки трубы.

В толщине стенки труб при всех видах надземной и подземной прокладки тепловых сетей запас на наружную коррозию не предусматривают.

При заданной толщине стенки трубы проверку этой толщины по внутреннему давлению производят сравнением приведенного напряжения в стенке трубы от внутреннего давления теплоносителя с допусковым напряжением от внутреннего давления $\sigma_{\text{доп}}$, при этом надо соблюдать условие

$$\sigma_{\text{пр}} \leq \sigma_{\text{доп}}, \text{ кг/мм}^2. \quad (3.4)$$

Приведенное напряжение от внутреннего давления при известной толщине стенки трубы определяют по формулам:

- при гибких компенсаторах и самокомпенсации (неразрезанные трубы):

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{раб}} \cdot (D_{\text{н}} - s^p)}{230 \cdot s^p \cdot \varphi}, \text{ кг/мм}^2; \quad (3.5)$$

- при сальниковых компенсаторах (разрезанные трубы):

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{раб}} \cdot (D_{\text{н}} - s^p)}{200 \cdot s^p \cdot \varphi} \text{ кг/мм}^2, \quad (3.6)$$

где s^p – расчетная толщина стенки трубы в мм.

Расчетную толщину стенки трубы определяют по формуле:

$$s^p = s - c', \text{ мм}, \quad (3.7)$$

где s – номинальная толщина стенки трубы, мм;

c' – минусовый допуск на толщину стенки трубы по соответствующему ГОСТ, мм.

Для бесшовных труб по ГОСТ 8732 обычной точности изготовления при допусковом минусовом отклонении по толщине стенки трубы 15 % величину c' определяют по формуле:

$$c' = 0,15 \cdot s, \text{ мм}. \quad (3.8)$$

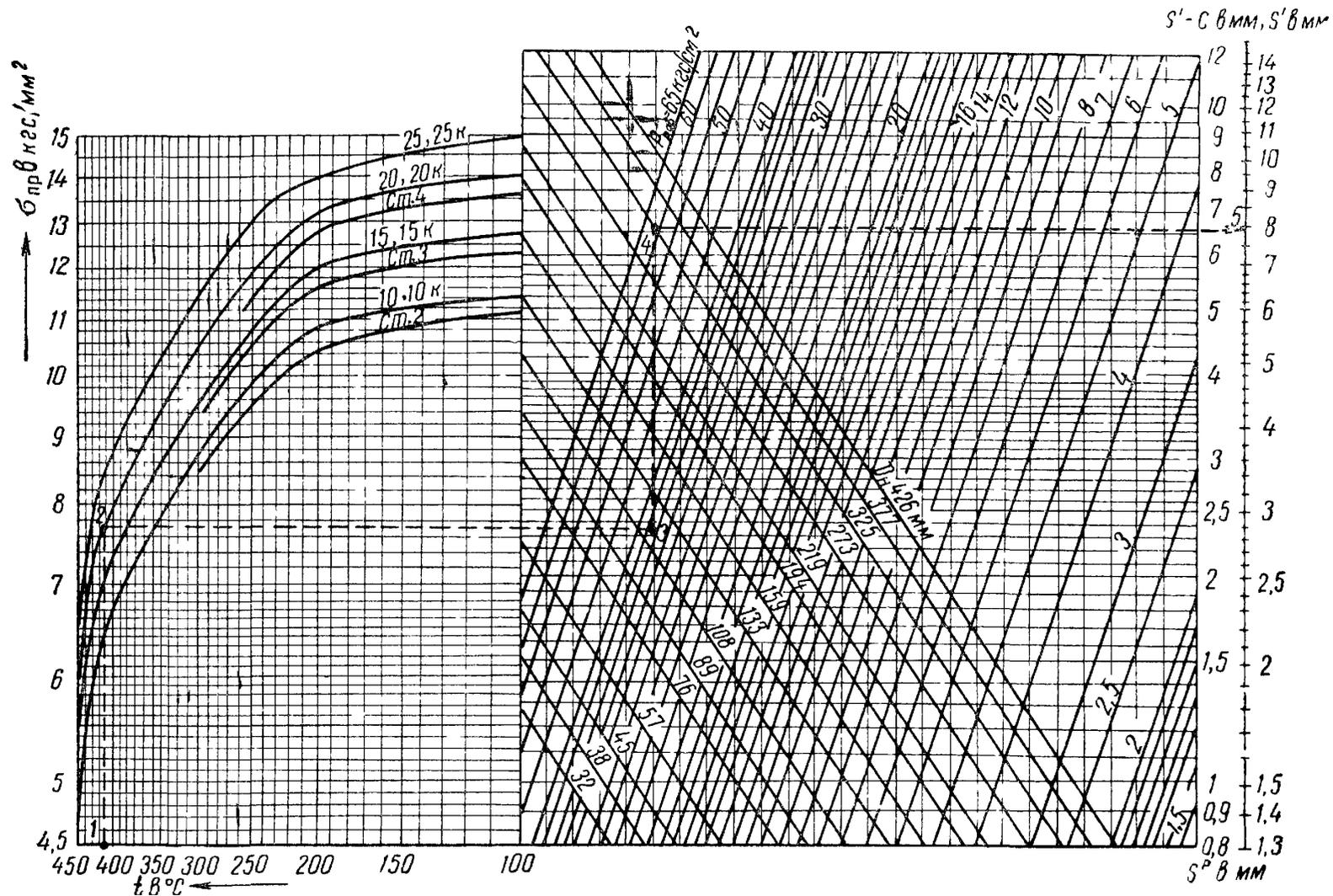


Рисунок 3.1 – Номограмма для определения толщины стенки трубы s' и приведенного напряжения от внутреннего давления $\sigma_{пр}$ для бесшовных неразрезанных труб.

Пример: Определить толщину стенки бесшовной трубы наружным диаметром $D_n = 325$ мм при теплоносителе паре с давлением $P_{раб} = 37$ кг/см² и температурой $t = 425$ °С; материал стенки трубы – сталь марки 20. Соединяя последовательно точки 1, 2, 3, 4 и 5, определяем в точке $5s' = 7,9$ мм.

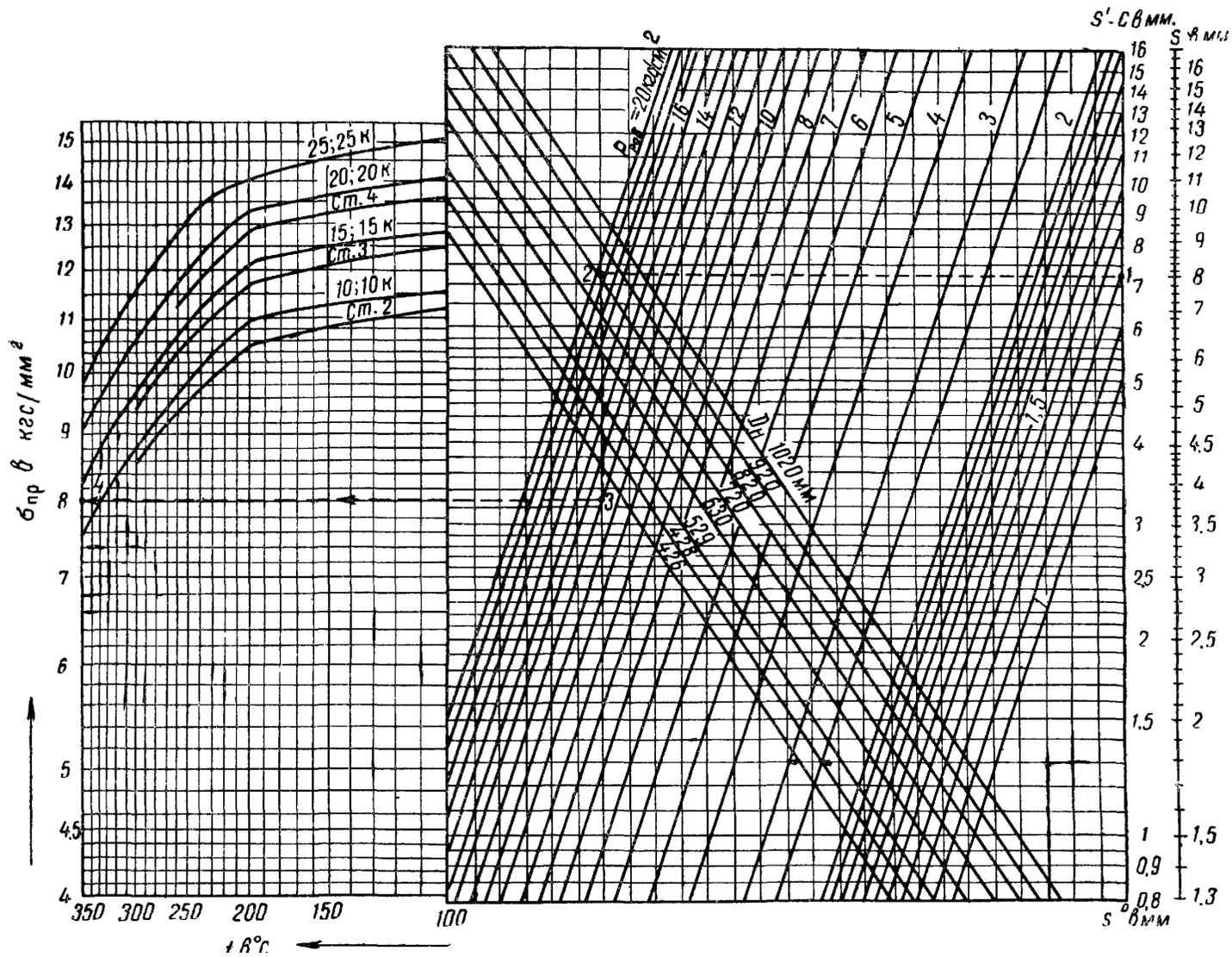


Рисунок 3.2 – Номограмма для определения толщины стенки трубы s' и приведенного напряжения от внутреннего давления $\sigma_{пр}$ для сварных не разрезанных труб. Пример: Определить приведенное напряжение от внутреннего давления для сварной трубы наружным диаметром $D_n = 820$ мм, $s^p = 7,2$ мм, при давлении теплоносителя $P_{раб} = 13$ кг/см². Соединяя последовательно точки 1, 2, 3 и 4, определяем в точке 4 $\sigma_{пр} = 8$ кг/мм².

Для сварных труб величину c' принимают равной c

Величину c' во всех случаях принимают не менее 0,5 мм.

Толщину стенки неразрезанных труб и приведенное напряжение от внутреннего давления для этих труб при известной толщине стенки трубы можно определять по номограммам, приведенным на рисунках 3.1 и 3.2.

Максимальный пролет между подвижными опорами на прямом участке трубопровода из условия прочности трубы определяют по формуле:

$$l_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{12 \cdot \sigma_3^{\text{д}} \cdot W^p \cdot \varphi_1}{0,8 \cdot q_3}}, \text{ м}, \quad (3.9)$$

где $\sigma_3^{\text{д}}$ – допускаемое эквивалентное напряжение для весовой и ветровой нагрузок, кгс/мм²;

W^p – момент сопротивления поперечного сечения трубы при расчетной толщине стенки трубы s^p , см³;

φ_1 – коэффициент прочности поперечного сварного шва; принимают по таблице 3.2;

q_3 – эквивалентная весовая нагрузка, кг/м;

0,8 – коэффициент пластичности.

Допускаемое эквивалентное напряжение для весовой и ветровой нагрузок определяют по формуле:

$$\sigma_3^{\text{д}} = \eta_1 \cdot \sigma_{\text{доп}}, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.10)$$

где η_1 – коэффициент, зависящий от соотношения $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\text{доп}}$ и типа компенсаторов, вычисляют по формулам, приведенным в таблице 3.3, или определяют по графику на рисунке 3.3.

Таблица 3.3 – Формулы для определения коэффициента η_1 .

| Способ компенсации | Расчетные формулы |
|--|---|
| Гибкие компенсаторы или самокомпенсация | $\eta_1 = \sqrt{1,2 - \left(\frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{доп}}}\right)^2} \quad (3.11)$ |
| Сальниковые компенсаторы. Расчет труб по растягивающим напряжениям | $\eta_1 = 1,095 \quad (3.12)$ |
| Сальниковые компенсаторы. Расчет труб по сжимающим напряжениям | $\eta_1 = \sqrt{1,2 - 0,75 \cdot \left(-\frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{доп}}}\right)^2 - \frac{\sigma_{\text{пр}}}{2 \cdot \sigma_{\text{доп}}}} \quad (3.13)$ |

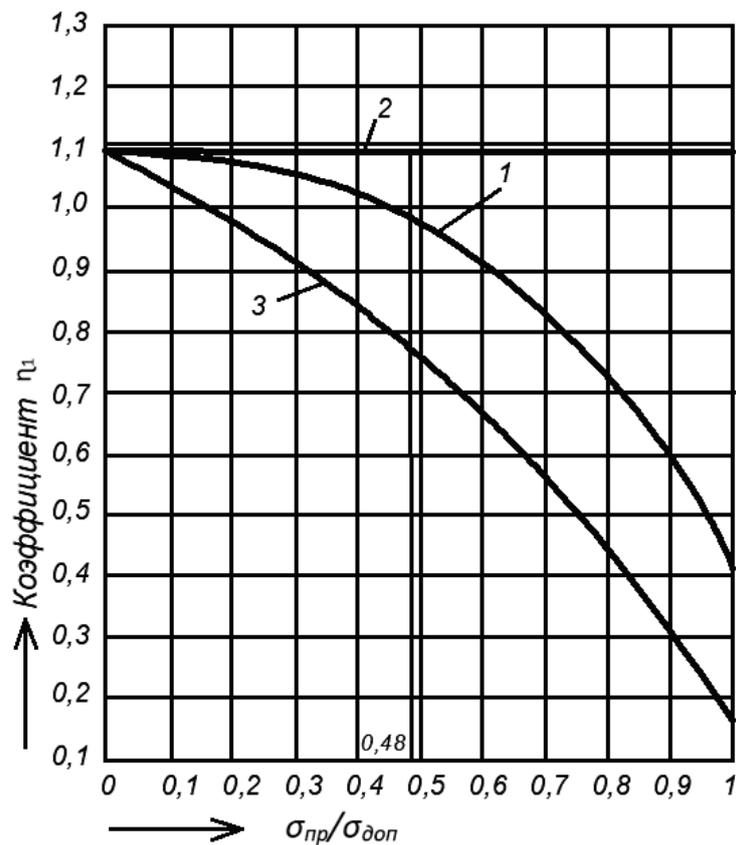


Рисунок 3.3 – График для определения коэффициента η_1 :

1 – при гибких компенсаторах или самокомпенсации; 2 – при сальниковых компенсаторах (расчет по растягивающим напряжениям); 3 – при сальниковых компенсаторах (расчет по сжимающим напряжениям); $\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение от внутреннего давления, кг/мм²; $\sigma_{доп}$ – допускаемое напряжение от внутреннего давления, кг/мм²

Пролет между подвижными опорами при сальниковых компенсаторах определяют расчетом по растягивающим и по сжимающим напряжениям; при расчете по сжимающим напряжениям коэффициент φ_1 в формуле (3.9) принимают равным единице; за расчетный принимают меньший из полученных пролетов.

Для конкретного значения коэффициента φ_1 можно заранее определить, при каких соотношениях $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$ следует производить расчет на растяжение и при каких на сжатие. Так, например, при значении коэффициента $\varphi_1 = 0,7$ при соотношении $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$ от 0 до 0,48 расчет следует производить только по растягивающим напряжениям, а при значении $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$ от 0,48 до 1 – по сжимающим напряжениям

Эквивалентную весовую нагрузку при подземной прокладке трубопроводов принимают равной расчетному весу трубопровода в рабочем или холодном состоянии, $q_э = q$, кг/м.

Эквивалентную весовую нагрузку при надземной прокладке трубопровода, учитывающую наряду с весом трубопровода ветровую нагрузку, определяют по формуле:

$$q_{\text{э}} = m_{\text{в}} \cdot q, \text{ кг/м}, \quad (3.14)$$

где $m_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ветровой нагрузки; определяют по графику рисунка 3.4 в зависимости от нормативного скоростного напора ветра q_0 , приведенного в таблице 3.4.

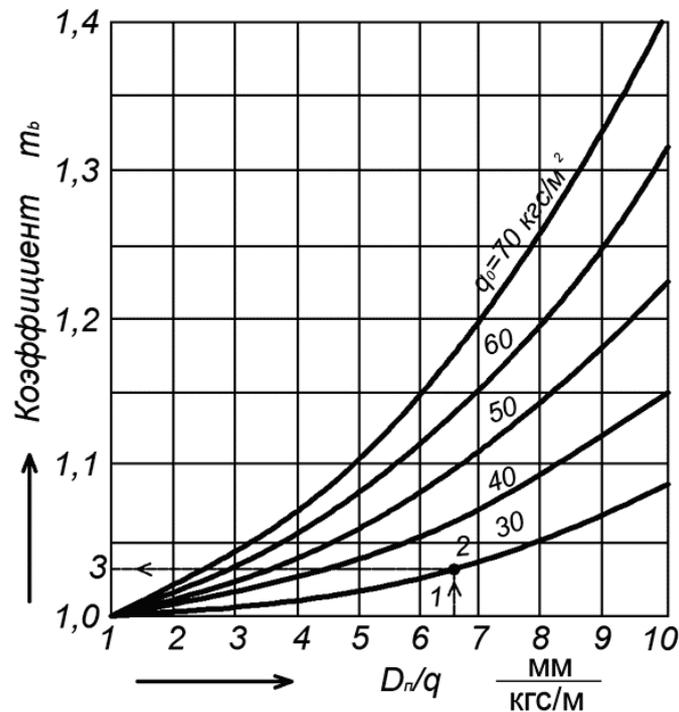


Рисунок 3.4 – График для определения коэффициента влияния ветровой нагрузки $m_{\text{в}}$:

q_0 – нормативный скоростной напор ветра, кг/м²; $D_{\text{п}}$ – наружный диаметр кровного слоя изоляционной конструкции; при прокладке «труба на трубе» принимают равным сумме наружных диаметров кровного слоя изоляционной конструкции несущего и несомого трубопроводов, мм, q – вес трубопроводов, кг/м

Таблица 3.4 – Нормативные скоростные напоры ветра для высоты над поверхностью земли до 10 м

| Районы РФ по приложению 2 главы СНиП II-A.11-62 «Нагрузки и воздействия»- | I | II | III | IV | V | VI | VII |
|---|----|----|-----|----|----|----|-----|
| Нормативный скоростной напор ветра, q_0 , кг/м ² | 27 | 35 | 45 | 55 | 70 | 85 | 100 |

Примечание. При надземной прокладке трубопроводов на высоте от 10 до 20 м табличные значения скоростных напоров ветра увеличивают на 3,5% на каждый метр высоты сверх 10 м

При использовании трубопровода в качестве несущей конструкции для прокладки труб меньшего диаметра (прокладка – «труба на трубе») пролет между подвижными опорами несущего трубопровода определяют с учетом коэффициента K_1 , приведенного на графике рисунка 3.5, в который вводят на величину пролета, полученную по формуле (3.9).

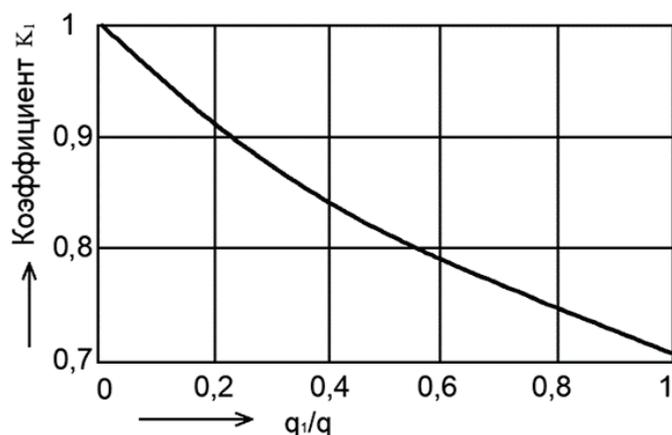


Рисунок 3.5 – График для определения коэффициента изменения пролета между подвижными опорами несущего трубопровода при прокладке «труба на трубе»:

q_1 – вес несомого трубопровода, кг/м; q – вес несущего трубопровода в кг/м

Максимальные пролеты между подвижными опорами на прямом участке для трубопроводов из неразрезанных труб при любых толщинах стенки и весе труб можно определять по номограммам, приведенным на рисунках 3.6 и 3.7.

Максимальные пролеты между подвижными опорами на прямых участках для труб по «Сортамент труб тепловых сетей» при надземной прокладке даны в таблице 3.5.

Максимальные пролеты между подвижными опорами для конечных участков трубопроводов, участков, примыкающих к повороту или к сальниковым компенсаторам, определяют с учетом коэффициентов, приведенных в главе 3 [2], которые вводят на величину пролетов, полученных по формуле (3.9).

Максимальный пролет между подвижными опорами по допускаемому прогибу для прямого участка трубопровода определяют по формулам ВНИИСТ из условия максимального провисания трубопровода в пролете $u_{\text{Макс}} = 0,02 \cdot D_y$ (см. рис. 3.8):

$$l_1 = \frac{21 \cdot E \cdot J^p \left(\frac{D_y}{50} + i_x \right)}{q \cdot x^3 \cdot 10^4} + x, \text{ м}; \quad (3.15)$$

$$l_2 = 2 \cdot x + \sqrt{x^2 - \frac{24 \cdot E \cdot J^p}{q \cdot 10^4} \cdot \frac{D_y}{50} \cdot \frac{1}{x^2}}, \text{ м}, \quad (3.16)$$

где D_y – условный проход трубы в м;

x – расстояние от низшей подвижной опоры до сечения с максимальным прогибом, м;

q – расчетный вес трубопровода в рабочем состоянии, кг/м;

J^p – момент инерции поперечного сечения трубы при расчетной толщине стенки трубы, см⁴;

E – модуль упругости трубной стали при максимальной температуре теплоносителя, кг/см²;

i – уклон трубопровода.

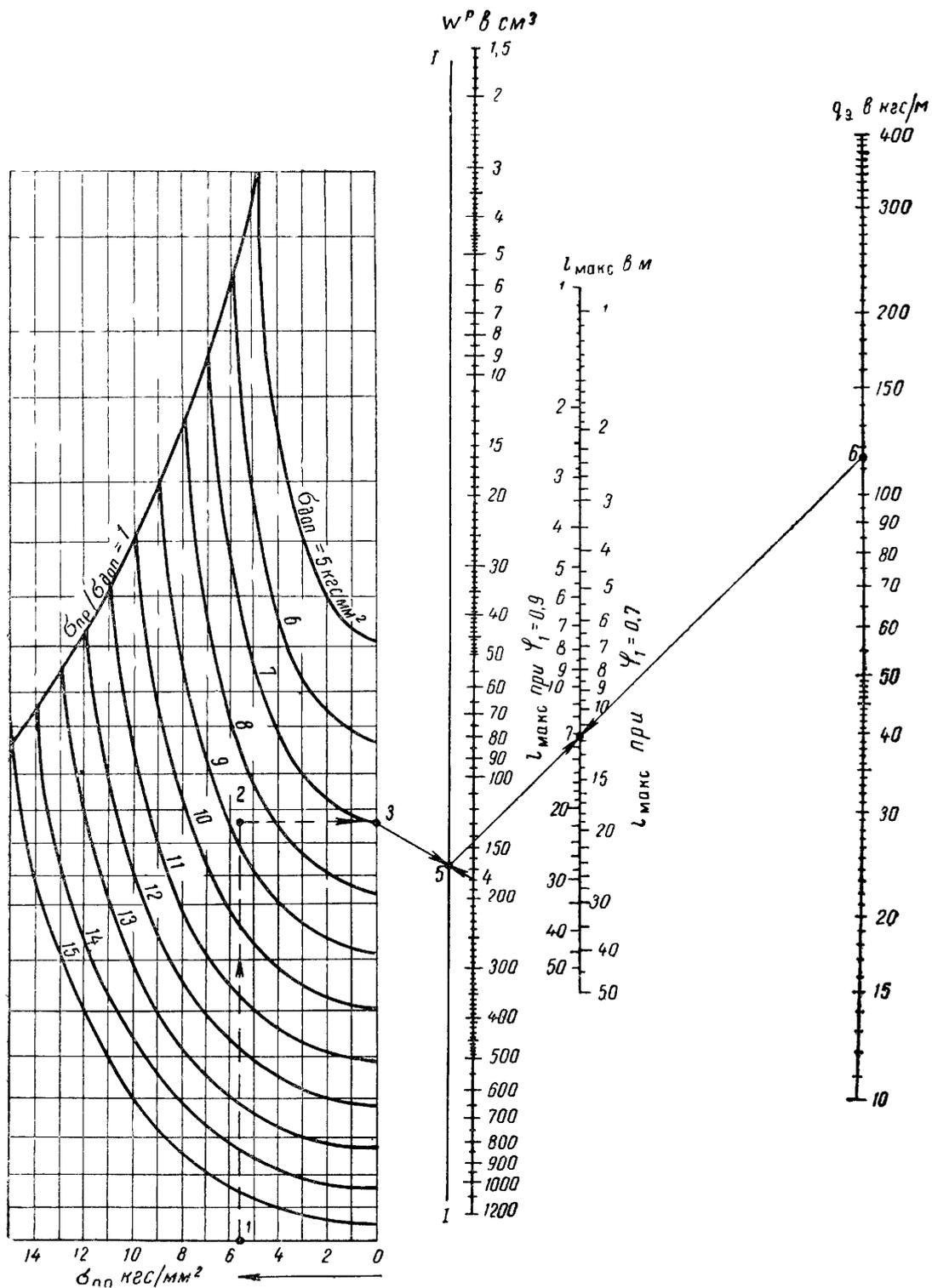


Рисунок. 3.6 – Номограмма для определения максимального пролета между подвижными опорами $l_{\text{макс}}$ на прямом участке для трубопроводов из бесшовных неразрезанных труб по расчету на прочность

Пример: Определить величину максимального пролета на прямом участке трубопровода при приведенном напряжении от внутреннего давления $\sigma_{\text{п}} = 5,82 \text{ кг/мм}^2$, коэффициенте прочности поперечного сварного шва $\varphi_1 = 0,7$; $\sigma_{\text{доп}} = 8,8 \text{ кг/мм}^2$, моменте сопротивления $W^p = 179 \text{ см}^3$ и эквивалентной весовой нагрузке $q_{\text{э}} = 113 \text{ кг/м}$. Соединяя последовательно точки 1, 2, 3, 4, 5, 6, находим в точке 7 $l_{\text{макс}} = 11,3 \text{ м}$.

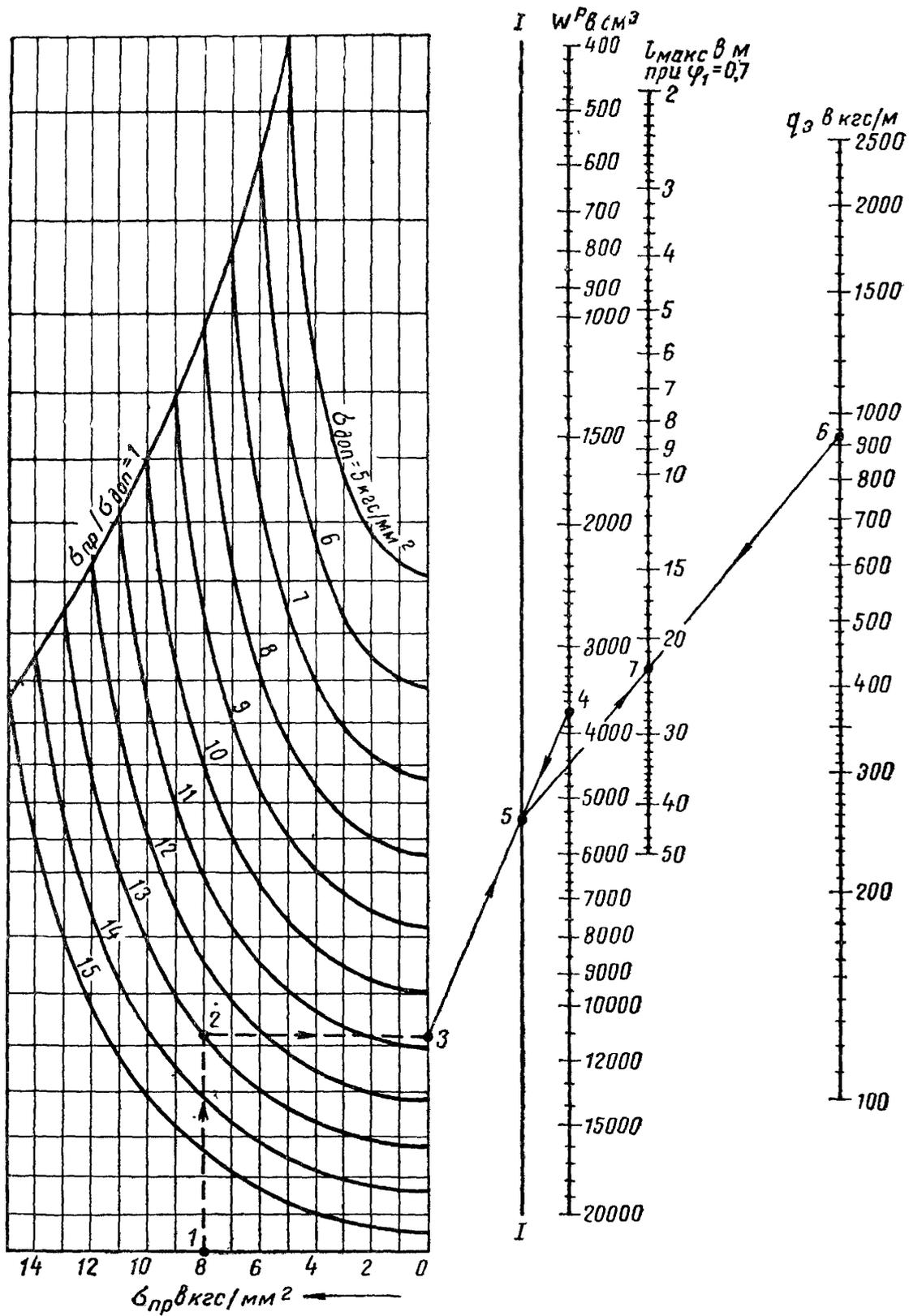


Рисунок 3.7 – Номограмма для определения максимального пролета между подвижными опорами l_{max} на прямом участке для трубопроводов из сварных неразрезанных труб по расчету на прочность

Таблица 3.5 – Максимальные пролеты между подвижными опорами $l_{\text{макс}}$ в м на прямых участках трубопроводов при надземной прокладке

| Размеры труб $D_n \times s$ в мм | Компенсаторы П-образные или самокомпенсация | | | | | | Компенсаторы сальниковые | | | |
|----------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | Максимальные пролеты между подвижными опорами в м при параметрах теплоносителя $P_{\text{раб}}$, кг/см ² , t , °С | | | | | | | | | |
| | $P_{\text{раб}} = 8,$ $t = 100$ | $P_{\text{раб}} = 16,$ $t = 150$ | $P_{\text{раб}} = 8,$ $t = 250$ | $P_{\text{раб}} = 13,$ $t = 300$ | $P_{\text{раб}} = 36,$ $t = 325;$ $P_{\text{раб}} = 21,$ $t = 350$ | $P_{\text{раб}} = 36,$ $t = 425$ | $P_{\text{раб}} = 8,$ $t = 100$ | $P_{\text{раб}} = 16,$ $t = 150;$ | $P_{\text{раб}} = 8,$ $t = 250$ | $P_{\text{раб}} = 13,$ $t = 300$ |
| 32×2,5 | - | - | 3,1 | 3 | 2,5 | 2,1 | - | - | - | - |
| 38×2,5 | 4,6 | 4,5 | 3,7 | 3,2 | 2,7 | 2,5 | - | - | - | - |
| 45×2,5 | 5,2 | 5,1 | 4,2 | 3,7 | 3,2 | 2,7 | - | - | - | - |
| 57×3,5 | 6,7 | 6,3 | 5,2 | 5,2 | 4,1 | 3,8 | - | - | - | - |
| 76×3,5 | 7,5 | 7,3 | 6,4 | 5,8 | 5 | 4,4 | - | - | - | - |
| 89×3,5 | 8,7 | 8 | 7 | 6,3 | 5,4 | 4,9 | - | - | - | - |
| 108×4 | 9,4 | 8,7 | 7,8 | 7,1 | 6,2 | 5,6 | 9,6 | 9,1 | 7,8 | 7,4 |
| 133×4 | 10,5 | 9,7 | 8,7 | 7,9 | 7 | 6,3 | 10,8 | 10,8 | 8,5 | 8,3 |
| 159×4,5 | 11,8 | 10,9 | 10,1 | 9,2 | 8 | 7 | 12,3 | 11,7 | 9,7 | 9,4 |
| 194×5 | 13 | 12,3 | 11,8 | 10,9 | 9,5 | 7,2 | 13,4 | 13,1 | 11,2 | 10,9 |
| 219×6 | 14,6 | 13,9 | 13,1 | 12,3 | 10,7 | 9,2 | 17,4 | 14,8 | 12,8 | 12,3 |
| 273×7 | 16,8 | 15,8 | 15,7 | 15,1 | 13,6 | 10,0 | 17,4 | 16,8 | 15 | 14,6 |
| 325×8 | 18,9 | 17,8 | 17,8 | 17,3 | 14,9 | 13,9 | 19,6 | 19,2 | 17 | 17 |
| 377×9 | 20,7 | 19,6 | 19,3 | 18,9 | 17 | 15 | 21,5 | 21,2 | 18,5 | 18,3 |
| 426×9 | - | - | - | - | 19 | - | - | - | - | - |
| 426×11 | - | - | - | - | - | 15,4 | - | - | - | - |
| 426×6 | 19,6 | 17,8 | 18,4 | 17,9 | - | - | 21 | 17,2 | 19,5 | 18,3 |
| 478×6 | 19,9 | 17,9 | 19 | 17,9 | - | - | 21,7 | 16,5 | 20,4 | 17,3 |
| 426×6 | 19,6 | 17,9 | 19,4 | 18,3 | - | - | 22 | 13,5 | 21,2 | 16,8 |
| 630×7 | 22,8 | 19,7 | 21,7 | 21,4 | - | - | 24,6 | 17 | 23,6 | 19,8 |
| 720×7 | 22,5 | 19,2 | 22,3 | 21,9 | - | - | 24,6 | 13,4 | 25 | 15,2 |
| 820×8 | 25 | 20,4 | 24,1 | 22,5 | - | - | 26,4 | 14,7 | 25,7 | 15,4 |
| 920×9 | 27 | 22,1 | 26,2 | 24,3 | - | - | 23,9 | 16,6 | 27,7 | 18,9 |
| 1020×10 | 28,6 | 23,7 | 28,2 | 26,2 | - | - | 31,1 | 18,1 | 30 | 21,7 |

Примечания. 1) Жирная линия является границей между трубами по ГОСТ 8732и ГОСТ 4015; 2) При определении максимальных пролетов между опорами принято: а) коэффициент прочности поперечного сварного шва - для труб при $P_{\text{раб}}=36$ кгс/см² и $t=425^\circ\text{C}$ условным проходом от 100 до 400 мм $\varphi_1=0,9$, для остальных труб $\varphi_1=0,7$; б) коэффициент прочности продольного сварного шва $\varphi=0,8$; в) марки стали для бесшовных труб при $P_{\text{раб}}=33$ кгс/см², $t=425^\circ\text{C}$ – сталь 20; для бесшовных труб с другими параметрами теплоносителя – сталь 10; для сварных труб – Ст. 3; 3) В настоящей таблице приведены меньшие из максимальных пролетов, полученных по расчету труб на рабочее и холодное состояние (для паропроводов).

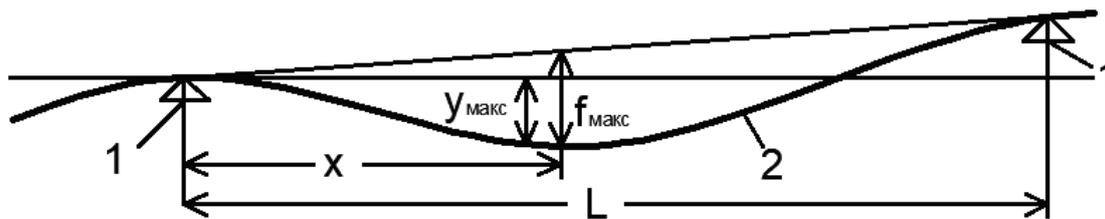


Рисунок 3.8 – Схема провисания трубопровода:
 1 – подвижная опора; 2 – трубопровод

При определении пролета между подвижными опорами по формулам следует, задаваясь величиной x , определять l_1 и l_2 . Пролет между подвижными опорами по допускаемому прогибу определится при таком значении x , при котором $l_1 \approx l_2$.

Для трубопроводов тепловых сетей при минимальном уклоне $i = 0,002$, для определения пролета между опорами по допускаемому прогибу, можно пользоваться более простой приближенной формулой:

$$i = 3,98 \sqrt[3]{\frac{E \cdot J^P}{q \cdot 10^6}} - 1,4, \text{ м} \quad (3.17)$$

Максимальные пролеты между подвижными опорами, определенные по допускаемому прогибу для труб по «Сортамент труб тепловых сетей», даны в таблице 3.6.

При прокладке в непроходных каналах труб больших диаметров величину пролета ограничивают предельной нагрузкой на подушку опоры трубопровода.

При надземной прокладке труб различных диаметров на эстакадах пролет между опорами ограничивают унифицированным шагом типовых эстакад. При надземной прокладке труб различных диаметров на отдельно стоящих опорах пролет принимают по оптимальным условиям непосредственного опирания на опору наибольшего количества труб без устройства дополнительных промежуточных опор. При прокладке «труба на трубе» (или при подвеске «трубы к трубе») пролет несомой трубы принимают кратным принятому пролету несущей трубы. При прокладке по стенам зданий пролет принимают кратным шагу несущих колонн здания.

Во всех случаях принятый пролет между подвижными опорами не должен превышать максимального пролета по расчету на прочность и на допускаемый прогиб, при этом допускаемое изгибающее компенсационное напряжение, полученное при принятом пролете, должно обеспечивать необходимые габариты компенсаторов и длины участков самокомпенсации.

Таблица 3.6 – Максимальные пролеты между подвижными опорами на прямых участках трубопроводов при надземной прокладке (по расчету на прогиб)

| Размеры труб $D_n \times s$, мм | Максимальные пролеты между подвижными опорами, м при параметрах теплоносителя $P_{раб}$, кг/см ² , t , °С | | | | | |
|--|--|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|
| | $P_{раб} = 8$, $t = 100$ | $P_{раб} = 16$, $t = 150$ | $P_{раб} = 8$, $t = 250$ | $P_{раб} = 13$, $t = 300$ | $P_{раб} = 16$, $t = 325$; $P_{раб} = 21$, $t = 350$ | $P_{раб} = 36$, $t = 425$ |
| 32×2,5 | - | - | 2,1 | 2 | 2 | 1,8 |
| 38×2,5 | 3 | 2,7 | 2,5 | 2,3 | 2,3 | 2,2 |
| 45×2,5 | 3,4 | 3,2 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,5 |
| 57×3,5 | 4,4 | 4,3 | 3,8 | 3,8 | 3,6 | 3,4 |
| 76×3,5 | 5,3 | 5,2 | 4,9 | 4,8 | 4,6 | 4,4 |
| 89×3,5 | 6,1 | 5,9 | 5,5 | 5,4 | 5 | 5 |
| 108×4 | 6,8 | 6,3 | 6,3 | 6,2 | 5,9 | 5,7 |
| 133×4 | 8 | 7,9 | 7,5 | 7,1 | 6,9 | 6,8 |
| 159×4,5 | 9,2 | 9 | 8,7 | 8,3 | 8 | 7,8 |
| 194×5 | 10,6 | 10,4 | 10,5 | 10,2 | 9,7 | 9,4 |
| 219×6 | 11,9 | 11,7 | 11,9 | 11,3 | 11,1 | 10,6 |
| 273×7 | 14,4 | 14,2 | 14,6 | 14 | 13,5 | 13,3 |
| 325×8 | 16,6 | 16,2 | 17,2 | 16,7 | 16 | 15,5 |
| 377×9 | 18,4 | 18,3 | 19,4 | 18,9 | 18,3 | 17,8 |
| 426×9 | - | - | - | - | 20 | - |
| 426×11 | - | - | - | - | - | 20 |
| 426×6 | 18,2 | 18 | 20,1 | 19,5 | - | - |
| 478×6 | 19,4 | 19,3 | 21,9 | 21 | - | - |
| 426×6 | 20,7 | 20,5 | 23,4 | 22,7 | - | - |
| 630×7 | 23,5 | 23,5 | 27,4 | 26,7 | - | - |
| 720×7 | 25,5 | 25,5 | 30,3 | 29,6 | - | - |
| 820×8 | 27,8 | 27,7 | 34,2 | 33 | - | - |
| 920×9 | 30,8 | 30,2 | 38,2 | 36,9 | - | - |
| 1020×10 | 33 | 32,5 | 42,1 | 40,8 | - | - |

Примечание. 1) Жирная линия является границей между трубами по ГОСТ 8732 и ГОСТ 4015; 2) Таблица составлена при величине уклона трубопровода $i = 0,002$.

Допускаемое изгибающее компенсационное напряжение, возникающее при компенсации тепловых удлинений гибкими компенсаторами или самокомпенсацией, определяют по формулам:

- для трубопроводов, расположенных в горизонтальной плоскости:

$$\sigma_{н.к}^д = \sqrt{\left(\sigma_{экв}^д - \frac{\sigma_{тр}^{оп}}{\varphi_1}\right) \cdot \left(\frac{\varphi_1}{0,8}\right)^2 - \sigma_{и}^2 - \sigma_{и.в}}, \text{ кг/мм}^2; \quad (3.18)$$

- для трубопроводов, расположенных в вертикальной плоскости:

$$\sigma_{н.к}^д = \left(\sigma_{экв}^д - \frac{\sigma_{тр}^{оп}}{\varphi_1}\right) \cdot \frac{\varphi_1}{0,8} - \sigma_{и} - \sigma_{и.в}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.19)$$

где $\sigma_{экв}^д$ – допускаемое эквивалентное напряжение от всех нагрузок, действующих на трубопровод, кроме внутреннего давления, кг/мм²;

$\sigma_{тр}^{оп}$ – осевое напряжение от сил трения в подвижных опорах, кг/мм²;

$\sigma_{и}$ – изгибающее напряжение от собственного веса трубопровода, кг/мм²;

$\sigma_{и.в}$ – изгибающее напряжение от ветровой нагрузки, кг/мм² (учитывают при надземной прокладке трубопроводов);

φ_1 – коэффициент прочности поперечного сварного шва, принимают по таблице 3.2.

Допускаемое осевое напряжение, возникающее при компенсации тепловых удлинений сальниковыми компенсаторами, определяют по формуле:

$$\sigma_{р.к}^Д = \sigma_{эКВ}^Д \cdot \varphi_1 - 0,8 \cdot \sqrt{\sigma_{и}^2 + \sigma_{и.в}^2}, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.20)$$

В формулах (3.18) и (3.19) не учтены осевые напряжения от силы упругой деформации гибких компенсаторов или участков самокомпенсации, так как величина этих напряжений незначительна и не влияет на результат расчета.

Допускаемое эквивалентное напряжение от всех нагрузок, действующих на трубопровод, кроме внутреннего давления, определяют по формуле:

$$\sigma_{эКВ}^Д = \eta_2 \cdot \sigma_{доп}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.21)$$

где η_2 – коэффициент, зависящий от соотношения $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$, и типа компенсаторов; вычисляют по формулам, приведенным в таблице 3.7, или определяют по графику на рисунке 3.9.

Таблица 3.7 – Формулы для определения коэффициента η_2

| Способ компенсации | Расчетные формулы |
|--|---|
| Гибкие компенсаторы или самокомпенсация | $\eta_2 = \sqrt{2,1 - \left(\frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{доп}}\right)^2}$ (3.22) |
| Сальниковые компенсаторы. Расчет труб по растягивающим напряжениям | $\eta_2 = 1,45$ (3.23) |
| Сальниковые компенсаторы. Расчет труб по сжимающим напряжениям | $\eta_2 = \sqrt{2,1 - 0,75 \cdot \left(-\frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{доп}}\right)^2} - \frac{\sigma_{пр}}{2 \cdot \sigma_{доп}}$ (3.24) |

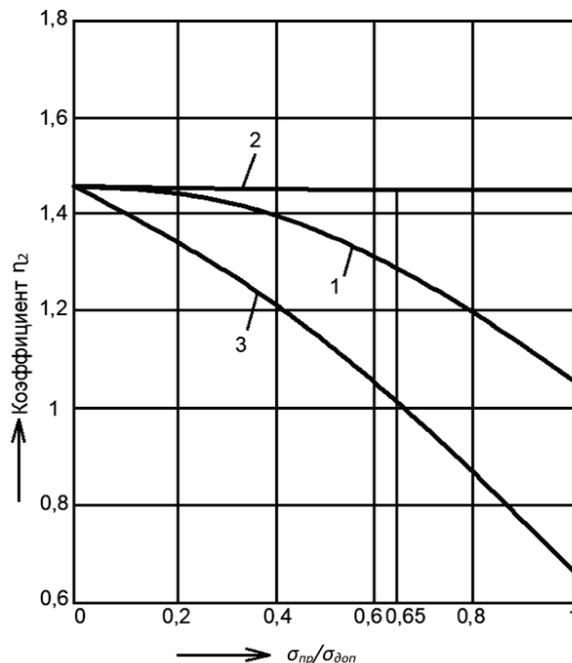


Рисунок 3.9 – График для определения коэффициента η_2 :

1 – при гибких компенсаторах или самокомпенсации; 2 – при сальниковых компенсаторах (расчет по растягивающим напряжениям); 3 – при сальниковых компенсаторах (расчет по сжимающим напряжениям); $\sigma_{пр}$ – приведенное напряжение от внутреннего давления, кг/мм²; $\sigma_{доп}$ – допускаемое напряжение от внутреннего давления, кг/мм².

Допускаемое осевое напряжение, возникающее при сальниковых компенсаторах, определяют по растягивающим или по сжимающим напряжениям; при расчете по сжимающим напряжениям коэффициент φ_1 в формуле (3.20) принимают равным единице. За допускаемое напряжение принимают меньшее из полученных по расчету на растяжение и сжатие. Для конкретного значения коэффициента φ_1 так же, как при определении пролета между подвижными опорами, можно заранее определить, при каких соотношениях $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$ следует производить расчет на сжатие и при каких на растяжение.

Таблица 3.8 – Допускаемые компенсационные напряжения $\sigma_{и.к.}^Д$, кг/мм² для расчета П-образных компенсаторов при максимальных пролетах между подвижными опорами

| Состояние трубопровода | Характеристика труб | Марка стали | Допускаемые компенсационные напряжения при параметрах теплоносителя: $P_{раб}$, кг/см ² , t , °С | | | | | | |
|------------------------|---------------------|-------------|---|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | | $P_{раб} = 8, t = 100$ | $P_{раб} = 16, t = 150$ | $P_{раб} = 8, t = 250$ | $P_{раб} = 13, t = 300$ | $P_{раб} = 16, t = 325$ | $P_{раб} = 21, t = 350$ | $P_{раб} = 36, t = 425$ |
| Рабочее | Бесшовные | 10 | 9,5 | 9,3 | 8,1 | 7,3 | 6,8 | 6,4 | - |
| | | 20 | 11,7 | 11,3 | 9,8 | 8,7 | 8,1 | 7,7 | 6,1 7,9* |
| | Бесшовные и сварные | Ст.3 | 10,3 | 10 | 8,7 | 7,8 | - | - | - |
| Холодное | Бесшовные | 10 | 9,95 | | | | | | - |
| | | 20 | 12,2 | | | | | | 12,2, 15,7* |
| | Бесшовные и сварные | Ст.3 | 10,8 | | | - | - | - | |

Примечание. 1) Допускаемые компенсационные напряжения даны для сечения на компенсаторе (без учета сил трения); 2) Допускаемые компенсационные напряжения определены при коэффициенте прочности поперечного сварного шва $\varphi_1 = 0,7$, а для значений, отмеченных звездочкой, при $\varphi_1 = 0,9$.

Так, например, при значении коэффициента $\varphi_1 = 0,7$ по растягивающим напряжениям следует производить расчет при соотношениях $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$ от 0 до 0,65, а по сжимающим напряжениям при $\sigma_{пр}/\sigma_{доп}$ от 0,65 до 1.

Допускаемые компенсационные напряжения для расчета П-образных компенсаторов из труб по «Сортамент труб тепловых сетей» даны в таблице 3.8 при максимальных пролетах между подвижными опорами, указанных в таблице 3.5, а в таблице 3.9 – для усредненных условий расчета трубопроводов при пролетах между подвижными опорами, приведенных в таблице 3.10.

Таблица 3.9 – Допускаемые компенсационные напряжения $\sigma_{и.к}^Д$ в кг/мм² для усредненных условий расчета трубопроводов

| Для расчета компенсаторов на холодное состояние | | | | | Для расчета участков самокомпенсации на рабочее состояние | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Допускаемые компенсационные напряжения при параметрах теплоносителя $P_{раб}$, кг/см ² , t , °С | | | | | | | | |
| $P_{раб}$ = 16, t = 150; | | | | | | | $P_{раб}$ = 13, t = 300; | |
| $P_{раб}$ = 8, t = 250; | $P_{раб}$ = 16, t = 325 | $P_{раб}$ = 21, t = 350 | $P_{раб}$ = 36, t = 425 | $P_{раб}$ = 16, t = 150 | $P_{раб}$ = 8, t = 250 | $P_{раб}$ = 16, t = 325 | $P_{раб}$ = 21, t = 350 | $P_{раб}$ = 36, t = 425 |
| $P_{раб}$ = 13, t = 300 | | | | | | | | |
| 11 | 13 | 11,5 | 16 | 8 | 9 | - | 6 | 6 |

Осевое напряжение от сил трения в подвижных опорах определяют по формуле:

$$\sigma_{тр}^{оп} = \frac{P_{тр}^{оп}}{f^P}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.25)$$

где $P_{тр}^{оп}$ – сила трения в подвижных опорах, кг;

f^P – площадь поперечного сечения стенки трубы при расчетной толщине стенки трубы s^P , мм².

Изгибающее напряжение от собственного веса трубопровода определяют по формуле:

$$\sigma_{и} = \frac{q \cdot l^2}{Б \cdot W^P}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.26)$$

где q – расчетный вес трубопровода, кг/м;

l – расстояние между подвижными опорами, м;

$Б$ – коэффициент, определяющий опорные моменты, в зависимости от расположения расчетного пролета, принимаемый:

Для пролета на прямом участке 12;

То же, между ближайшими к повороту опорами (до и после поворота).....5,33;

То же, между последней и предпоследней опорами (до и после поворота).....3;

Для последних двух пролетов с каждой стороны сальникового компенсатора....8.

Таблица 3.10 – Пролеты между подвижными опорами трубопроводов при надземной прокладке и в тоннелях (для верхних рядов труб) на прямых участках

| Условный проход D_y , мм | Компенсаторы П-образные или самокомпенсация | | | | Компенсаторы сальниковые | |
|-------------------------------|--|---|--|-------------------------------|---|---|
| | Пролеты в м при параметрах теплоносителя $P_{раб}$, кг/см ² , t , °С | | | | | |
| | $P_{раб} = 8$, $t = 100$; $P_{раб} = 16$, $t = 150$ | $P_{раб} = 8$, $t = 250$; $P_{раб} = 13$, $t = 300$ | $P_{раб} = 16$, $t = 325$; $P_{раб} = 21$, $t = 350$ | $P_{раб} = 36$, $t = 425$ | $P_{раб} = 8$, $t = 100$; $P_{раб} = 16$, $t = 150$ | $P_{раб} = 8$, $t = 250$; $P_{раб} = 13$, $t = 300$ |
| 25 | - | 2 | 2 | 2 | - | 2 |
| 32 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 40 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| 50 | 3 | 3 | 3 | 2,5 | 3 | 3 |
| 70 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3 | 3,5 | 3,5 |
| 80 | 4 | 4 | 4 | 3,5 | 4 | 4 |
| 100 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| 125 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| 150 | 7 | 8 | 7 | 7 | 7 | 8 |
| 175 | 8 | 9 | 7 | 7 | 8 | 9 |
| 200 | 9 | 11 | 8 | 8 | 9 | 11 |
| 250 | 11 | 12 | 10 | 10 | 11 | 12 |
| 300 | 12 | 14 | 12 | 12 | 12 | 14 |
| 350 | 14 | 16 | 14 | 14 | 14 | 15 |
| 400 | 14 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 |
| 450 | 14 | 16 | - | - | 13 | 15 |
| 500 | 14 | 16 | - | - | 13 | 15 |
| 600 | 15 | 18 | - | - | 13 | 15 |
| 700 | 15 | 19 | - | - | 13 | 15 |
| 800 | 16 | 20 | - | - | 13 | 15 |
| 900 | 18 | 22 | - | - | 15 | 18 |
| 1000 | 20 | 24 | - | - | 16 | 20 |

Примечание. Над жирной линией указаны пролеты для бесшовных труб, под жирной – для сварных труб.

Изгибающее напряжение от ветровой нагрузки при надземной прокладке трубопроводов определяют по формуле:

$$\sigma_{и.в} = \frac{q_0 \cdot c \cdot D_{п} \cdot l^2}{B \cdot W^P}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.27)$$

где c – аэродинамический коэффициент; принимают равным 1,4;

q_0 – нормативный скоростной напор ветра, кг/м²; принимают по таблице 3.4;

$D_{п}$ – наружный диаметр покровного слоя изоляционной конструкции, м.

Расчетные изгибающие компенсационные напряжения, определяемые расчетом на компенсацию тепловых удлинений при гибких компенсаторах и при самокомпенсации трубопроводов, должны быть не более допускаемых напряжений, полученных по формулам (3.18) и (3.19), и должны удовлетворять следующим условиям:

1) при расчете на самокомпенсацию без холодной растяжки (расчет на рабочее состояние):

$$\sigma_{и(раб)}^к \leq \sigma_{и.к(раб)}^д, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.28)$$

2) при гибких компенсаторах или самокомпенсации с холодной растяжкой (расчет на рабочее или на холодное состояние):

а) при расчете на рабочее состояние (с проверкой напряжений в холодном состоянии):

$$\sigma_{и(раб)}^к \leq \sigma_{и.к(раб)}^д, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.29)$$

$$\sigma_{и(раб)}^к \leq \sigma_{и.к(хол)}^д \frac{E_{(раб)} \cdot \varepsilon_{(раб)}}{E_{(хол)} \cdot \varepsilon_{(хол)}}, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.30)$$

б) при расчете на холодное состояние (с проверкой напряжений в рабочем состоянии):

$$\sigma_{и(хол)}^к \leq \sigma_{и.к(хол)}^д, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.31)$$

$$\sigma_{и(хол)}^к \leq \sigma_{и.к(раб)}^д \frac{E_{(хол)} \cdot \varepsilon_{(хол)}}{E_{(раб)} \cdot \varepsilon_{(раб)}}, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.32)$$

где $\sigma_{и(раб)}^к$ и $\sigma_{и(хол)}^к$ – расчетные изгибающие компенсационные напряжения в рабочем и холодном состоянии, полученные по расчету на компенсацию тепловых удлинений, кг/мм²;

$\sigma_{и.к(раб)}^д$ и $\sigma_{и.к(хол)}^д$ – допускаемые изгибающие компенсационные напряжения в рабочем и холодном состоянии, полученные по расчету на прочность, кг/мм²;

$E_{(раб)}$ и $E_{(хол)}$ – модули упругости трубной стали в рабочем и холодном состоянии, кг/см²;

$\varepsilon_{(раб)}$ и $\varepsilon_{(хол)}$ – коэффициенты, учитывающие влияние предварительной растяжки компенсаторов, возможную неточность ее выполнения и влияние релаксации компенсационных напряжений в рабочем и холодном состоянии.

Расчетное осевое напряжение, возникающее при компенсации тепловых удлинений сальниковыми компенсаторами, определяется по формуле:

$$\sigma_{р.к} = \sigma_{тр}^{оп} + \sigma_{тр}^с, \text{ кг/мм}^2, \quad (3.33)$$

где $\sigma_{тр}^{оп}$ – напряжение от сил трения в подвижных опорах, кг/мм²;

$\sigma_{тр}^с$ – напряжение от сил трения в сальниковом компенсаторе, кг/мм².

Напряжение от сил трения в сальниковом компенсаторе определяют по формуле:

$$\sigma_{тр}^с = \frac{P_c}{f^P}, \text{ кг/мм}^2 \quad (3.34)$$

Пример расчета труб на прочность при надземной прокладке трубопровода с П-образными компенсаторами дан в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Пример расчета трубопровода с П-образными компенсаторами на прочность при надземной прокладке

| Элемент расчета | Единица измерения | Расчетные формулы | Результаты расчета | | | |
|---|--------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | | На рабочее состояние (пример) | На холодное состояние (пример) | На рабочее (расчет) | На холодное (расчет) |
| Теплоноситель, пар, давление | кг/см ² | $P_{\text{раб}}$ | 21 | | | |
| температура | °С | t | 350 | 20 | | |
| Наружный диаметр трубы | мм | $D_{\text{н}}$ | 219 | | | |
| Номинальная толщина стенки трубы | мм | s | 6 | | | |
| Минусовое отклонение по толщине стенки трубы | % | - | -15 | | | |
| Материал стенки трубы | - | - | Сталь 10 | | | |
| Модуль упругости стали | кг/см ² | E | $1,695 \cdot 10^6$ | $2,05 \cdot 10^6$ | | |
| Коэффициент прочности поперечного сварного шва | - | φ_1 | 0,7 | | | |
| Расстояние от неподвижной опоры до оси П-образного компенсатора | м | L | 50 | | | |
| Пролет между подвижными опорами на компенсаторе | м | l | 6 | | | |
| Вес паропровода | кг/м | q | 119 | 153 | | |
| Нормативный скоростной напор ветра | кг/см ² | q | 30 | | | |
| Аэродинамический коэффициент | - | c | 1,4 | | | |

| Элемент расчета | Единица измерения | Расчетные формулы | Результаты расчета | | | |
|--|--------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | | На рабочее состояние (пример) | На холодное состояние (пример) | На рабочее (расчет) | На холодное (расчет) |
| Наружный диаметр покровного слоя изоляционной конструкции | м | D_{Π} | 0,51 | | | |
| Коэффициент трения подвижных (скользящих) опор | - | f | 0,3 | | | |
| Расчетная толщина стенки трубы | мм | $s^P = s - 0,15 \cdot s$ | 5,1 | | | |
| Внутренний диаметр трубы при s^P | мм | $D_B^P = D_H - 2 \cdot s^P$ | 208,8 | | | |
| Момент сопротивления поперечного сечения трубы при s^P | см ³ | $W^P = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D_H^4 - D_B^{P\ 4})}{D_H}$ | 179 | | | |
| Площадь поперечного сечения стенки трубы при s^P | мм ² | $f^P = 0,785 \cdot (D_H^2 - D_B^{P\ 2})$ | 3420 | | | |
| Допускаемое напряжение от внутреннего давления (по табл. 3.1) | кг/мм ² | $\sigma_{\text{доп}}$ | 7,7 | 12 | | |
| Приведенное напряжение от внутреннего давления | кг/мм ² | $\sigma_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{раб}} \cdot (D_H - s^P)}{230 \cdot s^P}$ | 3,83 | | | |
| Определение максимального пролета между опорами | | | | | | |
| Отношение приведенного напряжения от внутреннего давления к допускаемому | - | $\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\text{доп}}$ | 0,498 | 0,319 | | |

| Элемент расчета | Единица измерения | Расчетные формулы | Результаты расчета | | | |
|---|--------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | | На рабочее состояние (пример) | На холодное состояние (пример) | На рабочее (расчет) | На холодное (расчет) |
| Коэффициент для определения допускаемого эквивалентного напряжения от весовых и ветровых нагрузок | - | $\eta_1 = \sqrt{1,2 - \left(\frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{доп}}\right)^2}$ | 0,975 | 1,05 | | |
| Допускаемое эквивалентное напряжение от весовых и ветровых нагрузок | кг/мм ² | $\sigma_э^д = \eta_1 \cdot \sigma_{доп}$ | 7,5 | 12,6 | | |
| Соотношение | $\frac{мм}{кг/м}$ | $\frac{D_{п}}{q}$ | 4,28 | 3,33 | | |
| Коэффициент влияния ветровой нагрузки по графику рис.3.4 | - | m_B | 1,01 | 1,01 | | |
| Максимальный пролет между подвижными опорами на прямом участке | м | $l_{макс} = \sqrt{\frac{15 \cdot \sigma_э^д \cdot W^P \cdot \varphi_1}{q \cdot m_B}}$ | 10,7 | 12,3 | | |
| Максимальный пролет между ближайшими к повороту опорами (на компенсаторе) | м | $l = 0,67 \cdot l_{макс}$ | 7,15 > 6 | 8,25 > 6 | | |
| Изгибающее напряжение от весовой нагрузки при $l = 6 м$ | кг/мм ² | $\sigma_{и} = \frac{q \cdot l^2}{5,33 \cdot W^P}$ | 4,53 | 5,83 | | |

| Элемент расчета | Единица измерения | Расчетные формулы | Результаты расчета | | | |
|---|--------------------|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | | На рабочее состояние (пример) | На холодное состояние (пример) | На рабочее (расчет) | На холодное (расчет) |
| Изгибающее напряжение от ветровой нагрузки при $l = 6$ м | кг/мм ² | $\sigma_{и.в} = \frac{q_0 \cdot c \cdot D_{п} \cdot l^2}{5,33 \cdot W^P}$ | 0,815 | | | |
| Коэффициент для определения эквивалентного напряжения от всех нагрузок, кроме внутреннего давления | - | $\eta_2 = \sqrt{2,1 - \left(\frac{\sigma_{пр}}{\sigma_{доп}}\right)^2}$ | 1,36 | 1,415 | | |
| Допускаемое эквивалентное напряжение от всех нагрузок, действующих на трубопровод, кроме внутреннего давления | кг/мм ² | $\sigma_{эkv}^д = \eta_2 \cdot \sigma_{доп}$ | 10,5 | 17 | | |
| Допускаемое изгибающее компенсационное напряжение для сечения на компенсаторе | кг/мм ² | $\sigma_{и.к}^д = \sqrt{\sigma_{эkv}^д^2 \cdot \frac{\varphi_1^2}{0,64} - \sigma_{и}^2 - \sigma_{и.в}^2}$ | 7 | 12,8 | | |

Примечание. Приведенное напряжение от внутреннего давления $\sigma_{пр}$ меньше допускаемого напряжения в рабочем состоянии. Следовательно, заданная толщина стенки трубы $s = 6$ мм удовлетворяет условиям расчета трубы на прочность. На основании полученных по расчету допускаемых компенсационных напряжений в рабочем состоянии $\sigma_{и.к}^д(раб) = 7$ кг/мм² и холодном состоянии $\sigma_{и.к}^д(хол) = 12,8$ кг/мм² выбирают допускаемые напряжения для расчета на компенсацию с учетом предварительной растяжки; для данного параметра теплоносителя коэффициент ε , учитывающий влияние предварительной растяжки компенсатора в размере 50% полного теплового удлинения и релаксацию компенсационных напряжений принимают по таблице 1.8 $\varepsilon_{хол} = 0,7$; $\varepsilon_{раб} = 0,5$. По формуле (3.32) получим допускаемое компенсационное напряжение для расчета на компенсацию в холодном состоянии: $\sigma_{и.к}^д(хол) \leq \sigma_{и.к}^д(раб) \frac{E_{(хол)} \cdot \varepsilon_{(хол)}}{E_{(раб)} \cdot \varepsilon_{(раб)}} = 11,5$ кг/мм²

4. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ

Общие требования к оформлению отчета по практическому заданию

Шрифт: Times New Roman, обычный, цвет: черный, размер 14 пт. Выравнивание текста – по ширине. Межстрочный интервал – полуторный (допускается одинарный). Красная строка (абзацный отступ) – 1,25 см. Отступы и интервалы в тексте – 0 см. Размеры полей: левое – 3,0 см, правое – 1,5 см, верхнее и нижнее – 2,0 см. Номера страниц – арабскими цифрами, внизу по центру тем же шрифтом и размером, что и основной текст.

Титульный лист включают в общую нумерацию страниц. Номер страницы на титульном листе не проставляют.

Оформление содержания

При оформлении содержания структурные элементы СОДЕРЖАНИЕ, ВВЕДЕНИЕ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ, БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК, ПРИЛОЖЕНИЯ (или ПРИЛОЖЕНИЕ А, ПРИЛОЖЕНИЕ Б и т.д.) НЕ нумеруются и пишутся прописными (заглавными буквами).

Каждую запись содержания оформляют как отдельный абзац, выровненный влево. Номера страниц указывают выровненными по правому краю поля и соединяют с наименованием структурного элемента работы посредством отточия.

Пример оформления содержания:

| | |
|-------------------------------|----|
| 1 НАЗВАНИЕ РАЗДЕЛА | 10 |
| 1.1 Подраздел | 11 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 15 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 20 |

Оформление заголовков разделов и подразделов

Заголовки разделов пишутся с абзацным отступом (как и основной текст), в конце цифр и текста заголовка точки НЕ ставятся. Для выделения заголовков используется полужирный шрифт, а также прописное и строчное написание.

Заголовки первого уровня выполняются прописными буквами и выравниваются по центру страницы. Заголовки второго уровня выполняются строчными буквами и выравниваются по центру страницы. Заголовки третьего и последующих уровней выполняются строчными буквами с абзаца. До и после заголовка и подзаголовка оставляется одна пустая строка.

Названия разделов СОДЕРЖАНИЕ, ВВЕДЕНИЕ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ, БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК, ПРИЛОЖЕНИЯ всегда начинаются с новой страницы, пишутся заглавными буквами посередине строки.

Пример оформления заголовков:

| |
|--|
| 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТА |
| 1.1 Анализ предметной области |
| 1.1.1 Необходимость web-сайта для компании |

Оформление перечислений (списков)

Перед каждой позицией перечисления следует ставить тире или, если есть необходимость делать в тексте документа ссылки на одно из перечислений, –

списки маркируются строчными буквами, начиная с буквы «а» (за исключением – г, з, й, о, ь, ы, ь), после которой ставится скобка.

НЕ допускается использование данной точки «•».

При наличии конкретного числа перечислений допускается использовать арабские цифры со скобками.

Пример оформления маркированного списка:

Можно выделить следующие задачи, которые должен разрешить сайт:

- облегчение получения пользователем информации;
- повышение скорости обратной связи;
- облегчение поиска пользователем организации на карте.

Пример оформления нумерованного списка (использования букв и цифр в перечислениях):

Разрабатываемое сверхмощное устройство можно будет применить в различных отраслях реального сектора экономики:

а) в машиностроении:

- 1) для очистки отливок от формовочной смеси;
- 2) для холодной штамповки из листа;

б) в ремонте техники:

- 1) устранение наслоений во внутренних стенках труб;
- 2) очистка каналов от грязи.

Оформление рисунков

Перед вставкой рисунка обязательно должна быть ссылка на него в тексте, под рисунком должна быть полная подпись, до рисунка и после подписи под рисунком – пустая строка.

НЕ допускается сокращение типа «Рис. 5». В тексте обязательно полное. Допускается нумерация рисунков в пределах раздела, например, «Рисунок 2.1 – Название рисунка». Для названий рисунков используется шрифт основного текста. Выравнивание рисунка и подписи – по центру.

Если название рисунка состоит из нескольких строк, то его записывают через один межстрочный интервал. Точка в конце названия не ставится.

Пример оформления рисунка:

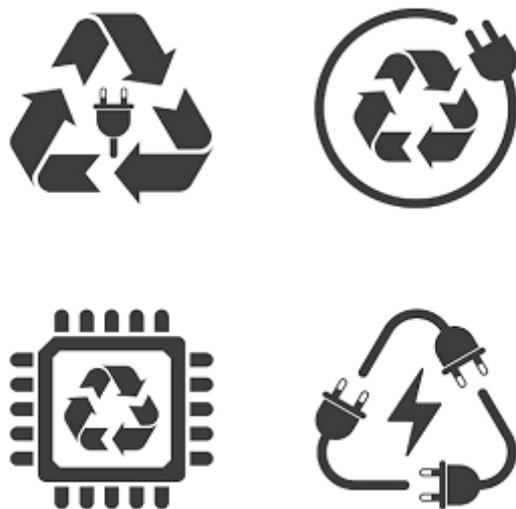


Рисунок 1 – Название рисунка

Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку.

Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки (в случае если подряд приводится больше двух формул и уравнений, то свободные строки между формулами оставлять не нужно). Если уравнение не умещается в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (-), умножения (\times), деления (:), или других математических знаков, причем знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак « \times ».

Ссылки в тексте на порядковые номера формул указывают в скобках, например, «... в формуле (1)».

Формула должна быть выровнена по центру, а номер формулы – выровнен по правому краю.

Пояснения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, должны быть приведены непосредственно под формулой. Пояснения каждого символа следует давать с новой строки в той последовательности, в которой символы приведены в формуле.

Первая строка пояснения должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него с абзаца.

Пример оформления формулы:

$$A = b - c, \tag{1}$$

где b –
 c –

Оформление таблиц

Таблицы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией; название таблицы следует помещать над таблицей слева без абзацного отступа в одну

строку с ее номером через тире, например, «Таблица 1 – Название» (в конце точка не ставится; шрифт 14, светлый, прямой).

Как и у рисунка, до вставки таблицы необходимо сделать на нее ссылку в тексте.

Таблицы слева, справа и снизу ограничивают линиями. Допускается применять размер шрифта в таблице меньший, чем в тексте.

В приложениях таблицы нумеруются в соответствии с номером (буквенным обозначением) приложения и обозначаются: Таблица А.1 – Исходные данные

Если таблица занимает больше двух страниц, то после первого переноса таблицы пишут «Продолжение таблицы 1», а на самом последнем листе «Окончание таблицы 1».

Графу «Номер по порядку» в таблицу включать не допускается. При необходимости нумерации показателей, параметров или других данных порядковые номера следует указывать в первой графе (боковике) таблицы непосредственно перед их наименованием.

Пример оформления таблицы:

Таблица 1 – Название таблицы

| Номер эксперимента | Параметр | Значение параметра |
|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| Эксперимент 1 | Параметр | Значение параметра |
| Эксперимент 2 | Параметр | Значение параметра |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Институт (название института)

Кафедра (название кафедры)

ОТЧЕТ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ

по дисциплине «Название дисциплины»

на тему:

Тема практического задания без кавычек

Выполнил студент учебной группы №

(фамилия, имя, отчество)

Проверил

(должность, фамилия, имя, отчество)

**Санкт-Петербург
2023**

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ (ЗАЧЕТУ) ПО КУРСУ «СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ»

1. Обзор состояния и перспективы развития отечественной энергетики.
2. Состояние энергетического комплекса Санкт-Петербурга.
3. Приоритеты в развитии топливно-энергетического комплекса Санкт-Петербурга.
4. Оценка энергетической эффективности теплофикации. Определение расхода топлива на выработку электрической энергии и теплоты на паротурбинных ТЭЦ.
5. Оценка энергетической эффективности теплофикации. Определение расхода топлива на отдельную выработку электрической энергии и теплоты.
6. Определение абсолютной экономии топлива при теплофикации от паротурбинных ТЭЦ.
7. Классификация тепловых нагрузок. Коммунально-бытовое, санитарно-техническое, технологическое теплоснабжение.
8. Сезонная нагрузка. Отопление. Методы расчета расхода теплоты на отопление.
9. Сезонная нагрузка. Вентиляция. Методы расчета расхода теплоты на вентиляцию.
10. Круглогодичная нагрузка. Горячее водоснабжение. Методы расчета расхода теплоты на ГВС.
11. Круглогодичная нагрузка. Технологическое теплоснабжение.
12. Годовой расход теплоты.
13. Построение и использование графика продолжительности тепловых нагрузок.
14. Классификация систем теплоснабжения. Выбор теплоносителя и типа системы теплоснабжения. Открытые и закрытые системы теплоснабжения.
15. Водяные системы теплоснабжения. Зависимые и независимые схемы присоединения абонентских установок к тепловым сетям.
16. Присоединение отопительных установок в закрытой и открытой системах теплоснабжения.
17. Присоединение установок ГВС в закрытой системе теплоснабжения. Выбор схемы присоединения водонагревателей ГВС.
18. Присоединение установок ГВС в открытой системе теплоснабжения. Однотрубная система теплоснабжения.
19. Паровые системы теплоснабжения промышленных предприятий.
20. Системы отопления жилых и общественных зданий.
21. Системы горячего водоснабжения.
22. Нагревательные приборы систем отопления.
23. Воздушное отопление.
24. Панельно-лучистое отопление. Теплые полы.
25. Промышленное газолучистое отопление. Инфракрасное водяное отопление.
26. Новые типы систем теплоснабжения.

27. «Пассивный дом».
28. Режимы регулирования водяных систем теплоснабжения. Методы регулирования.
29. Регулирование однородной тепловой нагрузки водяных тепловых сетей. Выбор, расчет и построение температурного графика.
30. Тепловой и гидравлический режимы водяной тепловой сети при комбинированном регулировании разнородной тепловой нагрузки. Регулирование отопительной нагрузки.
31. Тепловой и гидравлический режимы водяной тепловой сети при комбинированном регулировании разнородной тепловой нагрузки. Регулирование вентиляционной нагрузки.
32. Тепловой и гидравлический режимы водяной тепловой сети при комбинированном регулировании разнородной тепловой нагрузки. Регулирование нагрузки ГВС.
33. Необходимость корректировки температурного графика и порядок ее выполнения. Сводный температурный график при качественном регулировании отпуска тепла.
34. Регулирование отпуска теплоты по совмещенной тепловой нагрузке отопления и ГВС.
35. Выбор метода центрального регулирования тепловой нагрузки.
36. Схемы и конфигурации тепловых сетей.
37. Гидравлический расчет тепловых сетей. Задачи гидравлического расчета. Основные понятия.
38. Последовательность выполнения гидравлического расчета.
39. Гидравлические режимы водяных тепловых сетей. Построение и использование пьезометрического графика.
40. Выбор насосов тепловых сетей.
41. Гидравлический удар в тепловых сетях.
42. Оборудование тепловых сетей. Тепловые сети. Способы прокладки тепловых сетей.
43. Оборудование тепловых сетей. Трубы, фасонные изделия и опоры тепловых сетей.
44. Оборудование тепловых сетей. Тепловая изоляция труб.
45. Оборудование тепловых сетей. Компенсаторы тепловых сетей.
46. Оборудование тепловых сетей. Трубопроводная арматура.
47. Тепловые пункты. Назначение и оборудование тепловых пунктов. Центральные тепловые пункты.
48. Тепловые пункты. Назначение и оборудование тепловых пунктов. Индивидуальные тепловые пункты. Автоматизированные тепловые пункты.
49. Системы учета и регулирования теплопотребления. Измерение температуры, давления, расхода теплоносителя.
50. Приборы учета тепловой энергии. Приборы автоматического регулирования теплопотребления.

51. Расчет тепловых потерь изолированных трубопроводов. Потери тепла трубопроводами при надземных прокладках.
52. Расчет тепловых потерь изолированных трубопроводов. Потери тепла трубопроводами при подземных бесканальных прокладках.
53. Расчет тепловых потерь изолированных трубопроводов. Потери тепла трубопроводами при подземных канальных прокладках.
54. Прочностной расчет трубопроводов тепловых сетей. Расчет труб на прочность. Расчет напряжений в трубах, вызванных внутренним давлением теплоносителя.
55. Прочностной расчет трубопроводов тепловых сетей. Расчет трубопроводов на весовую и ветровую нагрузки.
56. Стоимость тепловых потерь в теплосетях.
57. Затраты на перекачку сетевой воды.
58. Испытания тепловых сетей.
59. Основы эксплуатации тепловых сетей. Заполнение, пуск и промывка тепловых сетей и абонентских установок.
60. Наладка тепловых и гидравлических режимов систем теплоснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учебник для вузов – 7-е изд., стереот / Е. Я. Соколов. – М. : Издательство МЭИ, 2001. – 472 с. – Текст: непосредственный.
2. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. / под ред. инж. А. А. Николаева. – М. : Стройиздат, 1965. – 359 с. – Текст: непосредственный.
3. СП 66.13330.2011 Проектирование и строительство напорных сетей водоснабжения и водоотведения с применением высокопрочных труб из чугуна с шаровидным графитом. – М.: Аналитик, 2015 – 147 с. – Текст: непосредственный.
4. ГОСТ Р ИСО 2531. Трубы, фитинги, арматура и их соединения из чугуна с шаровидным графитом для водо- и газоснабжения. – М.: Стандарт информ., 2013. – 42 с. – Текст: непосредственный.
5. СП 45.13330.2017 Свод правил. Земляные сооружения, основания и фундаменты. – М.: Минстрой, 2017. – 239 с. – Тест: непосредственный.
6. ПБ 10-573-03 Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. Выпуск 46. – М.: НТЦ БВП, 2008. – 128 с. – Текст: непосредственный.
7. РД 10-249-98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. Вып.6. – М.: ФГУП «НТЦ БВП Гостехнадзора России, 2004. – 219 с. – Текст: непосредственный.
8. СНиП II-Д.10-62 Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования. – М.: Гос. издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963 – 34 с. – Текст: непосредственный.
9. СНиП 41-02-2003 Тепловые сети. – М.: Минрегионразвития РФ, 2012. – 78 с. – Текст: непосредственный.
10. СП 33.13330.2012 СНиП 2.04.12-86 Расчет на прочность стальных трубопроводов. – М: Аналитик, 2012. – 28 с. – Текст: непосредственный.
11. СП 50.1330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 95 с. – Текст: непосредственный.
12. РД 10-400-01. Нормы расчета на прочность трубопроводов тепловых сетей. – СПб: Издательство ДЕАН, 2002. – 80 с. – Текст: непосредственный.

Расчет в Excel компенсации трубопроводов тепловой сети с Г- и П-образными компенсаторами

Расчет компенсаторов тепловой сети в Excel [Режим совместимости] - Microsoft Excel

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Вырезать Копировать Вставить Формат по образцу Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число

Условное форматирование Форматировать как таблицу Стили Вставить Удалить Формат Ячейки Автозаполнение Заполнить Очистить Сортировка и фильтр Найти и выделить Редактирование

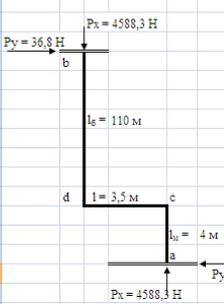
R23C21 fx

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34

6

7 **Расчет Z-образного горизонтального компенсатора (А.А.Николаев, "Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей", таблица 10.19)**

8 **Схема расчетного участка**

9 

10 $\Delta t, ^\circ\text{C}$ исходные данные 38 разность температур рабочей и при монтаже

11 $l_{01}, \text{м}$ исходные данные 4 длина меньшего параллельного плеча

12 $l_1, \text{м}$ исходные данные 3,5 длина перпендикулярного плеча

13 $l_{02}, \text{м}$ исходные данные 110 длина большего параллельного плеча

14 $d_n, \text{м}$ исходные данные 0,219 наружный диаметр трубопровода

15 $\delta, \text{м}$ исходные данные 0,006 толщина стенки трубопровода

16 $I, 10^8 \text{ м}^4$ $I = 0,05 [d_n^4 - (d_n - 2\delta)^4] \cdot 10^5$ 2,32 центральный момент инерции сечения трубы

17 $\alpha, 1/^\circ\text{C}$ исходные данные 0,000012 коэффициент линейного удлинения

18 n $n = l_{01} (l_{01} + l_0)$ 0,04 расчетная величина

19 p $p = (l_{01} + l_0) / l_1$ 32,57 расчетная величина

20 $E, \text{МПа}$ исходные данные 195219 модуль продольной упругости

21 A $A = \frac{3p^2 + 4p^2 - 3 - 6n(1-n)(2p^2 - p + 1)}{p^2(1-p)(1-3n-3n^2)(1+3pn-3pn^2)}$ 27,2 расчетный коэффициент

22 B $B = \frac{3(3p^2 + 4p + 1 + 6np^2(1-n)(2-p-p^2))}{p^2(1-p)(1-3n-3n^2)(1+3pn-3pn^2)}$ 0,2 расчетный коэффициент

23 $C_{(a)}$ $C_{(a)} = \frac{2pn + p^2}{2(1-p)} - B - A \frac{1+2p-2pn}{2(1-p)}$ -22,4 расчетный коэффициент

24 $C_{(b)}$ $C_{(b)} = \frac{1+2pn}{2(1-p)} - A - B \frac{p^2 + 2p - 2pn}{2(1-p)}$ -2,3 расчетный коэффициент

25 $C_{(c)}$ $C_{(c)} = \frac{p^2 - 2p^2 n}{2(1-p)} - B - A \frac{1+2p-2pn}{2(1-p)}$ -22,7 расчетный коэффициент

26 $C_{(d)}$ $C_{(d)} = \frac{1+2pn}{2(1-p)} - A - B \frac{p^2 - 2p^2 n}{2(1-p)}$ -1,9 расчетный коэффициент

27 $\sigma_a, \text{МПа}$ $\sigma = C_{(a)} \cdot \alpha \cdot E \cdot d_n \cdot \Delta t / (2 \cdot l_1)$ 62,5 изгибающее напряжение, возникающее в меньшем плече в месте защемления у неподвижной опоры

28 $\sigma_b, \text{МПа}$ $\sigma = C_{(b)} \cdot \alpha \cdot E \cdot d_n \cdot \Delta t / (2 \cdot l_1)$ 6,4 изгибающее напряжение, возникающее в большем плече в месте защемления у неподвижной опоры

29 $\sigma_c, \text{МПа}$ $\sigma = C_{(c)} \cdot \alpha \cdot E \cdot d_n \cdot \Delta t / (2 \cdot l_1)$ 63,1 изгибающее напряжение, возникающее в отводе меньшего плеча

30 $\sigma_d, \text{МПа}$ $\sigma = C_{(d)} \cdot \alpha \cdot E \cdot d_n \cdot \Delta t / (2 \cdot l_1)$ 5,2 изгибающее напряжение, возникающее в отводе большего плеча

31 ϕ при ручной сварке с полваркой со стороны вершины шва 0,95 коэффициент прочности сварного шва

32 $[\sigma], \text{МПа}$ РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 147,0 номинальные допускаемые напряжения

33 $\sigma_{доп}, \text{МПа}$ $\sigma_{доп} = \phi \cdot [\sigma]$ 139,7 допускаемое компенсационное напряжение

34 $P_x, \text{Н}$ $P_x = A \cdot \alpha \cdot E \cdot I \cdot \Delta t / l^2$ 4588,3 сила упругой деформации

35 $P_y, \text{Н}$ $P_y = B \cdot \alpha \cdot E \cdot I \cdot \Delta t / l^2$ 36,8 сила упругой деформации

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48 **Расчет Г-образного горизонтального компенсатора (А.А.Николаев, "Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей", таблица 10.19)**

49 **Компенсаторы по Николаеву** / Компенсаторы по Соколову / РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 / Объемы земляных работ / Гидравлика / Трубы / КМС / Лист1

Готово

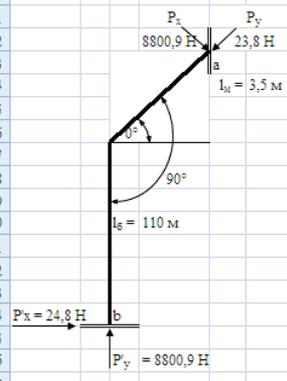
80% 10:49 28.02.2024

Расчет компенсаторов тепловой сети в Excel

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Вырезать Вставить Буфер обмена Копировать Формат по образцу Шрифт Выравнивание Число Условное форматирование

R23C21 fx

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---|--|-------------------------------------|--|--|--|-----------|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 47 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48 | Расчет Г-образного горизонтального компенсатора (А.А.Николаев, "Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей", таблица 10.19) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 49 | Схема расчетного участка | | Величина | | Формула | | Результат | | Пояснения | | | | | | | | | | |
| 50 |  | | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | | исходные данные | | 19 | | разность температур рабочей и при монтаже | | | | | | | | | | |
| 51 | | | $l_{\text{м}}, \text{м}$ | | исходные данные | | 3,5 | | длина меньшего плеча | | | | | | | | | | |
| 52 | | | $l_{\text{б}}, \text{м}$ | | исходные данные | | 110 | | длина большего плеча | | | | | | | | | | |
| 53 | | | $d_{\text{в}}, \text{м}$ | | исходные данные | | 0,219 | | наружный диаметр трубопровода | | | | | | | | | | |
| 54 | | | $\delta, \text{м}$ | | исходные данные | | 0,006 | | толщина стенки трубопровода | | | | | | | | | | |
| 55 | | | $I, 10^5 \cdot \text{м}^4$ | | $I = 0,05 \cdot [d_{\text{в}}^4 - (d_{\text{в}} - 2\delta)^4] \cdot 10^5$ | | 2,32 | | центральный момент инерции сечения трубы | | | | | | | | | | |
| 56 | | | $\alpha, 1/(\text{}^\circ\text{C})$ | | исходные данные | | 0,0000118 | | коэффициент линейного удлинения | | | | | | | | | | |
| 57 | | | n | | $n = l_{\text{б}} / l_{\text{м}}$ | | 31,4 | | отношение длины большего плеча к длине меньшего | | | | | | | | | | |
| 58 | | | $E, \text{МПа}$ | | исходные данные | | 201105 | | модуль продольной упругости | | | | | | | | | | |
| 59 | | | $\omega, ^\circ$ | | исходные данные | | 90 | | угол между коротким и длинным плечами | | | | | | | | | | |
| 60 | | | $\beta = \omega - 90, ^\circ$ | | исходные данные | | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 61 | | | A' | | $\frac{3[(3n^3 + 4n^2 + 3) + \sin\beta(7n^2 + n)]}{n^3(1+n)\cos\beta}$ | | 0,3 | | расчетный коэффициент | | | | | | | | | | |
| 62 | | | B' | | $\frac{3[n^2(n^3 - 4n^2 - 3) + \sin^2\beta(7n^2 + n) + \sin\beta(n^3 - 4n^2 - 1)]}{n^3(1+n)\cos^2\beta}$ | | 103,0 | | расчетный коэффициент | | | | | | | | | | |
| 63 | | | A | | $\frac{3[(n^3 + 4n^2 + 3) + \sin\beta(7n^2 + 7n)]}{n(1+n)\cos\beta}$ | | 103,0 | | расчетный коэффициент | | | | | | | | | | |
| 64 | | | B | | $\frac{3[(3n^3 - 4n^2 - 1) + n^2\sin^2\beta(n^2 - 7n) - n\sin\beta(n^3 - 4n^2 - 10n - 1)]}{n^3(1+n)\cos^2\beta}$ | | 0,3 | | расчетный коэффициент | | | | | | | | | | |
| 65 | | | C | | $\frac{1,5(n^3 + 2n^2 + 1)}{n(n+1)\cos\beta} + \text{tg}\beta \frac{1,5(n+3)}{(n+1)}$ | | 48,6 | | расчетный коэффициент | | | | | | | | | | |
| 66 | | | $P_{\text{х}}, \text{Н}$ | | $P_{\text{х}} = A' \cdot \alpha \cdot E \cdot I \cdot \Delta t / l_{\text{м}}^2$ | | 24,8 | | сила упругой деформации | | | | | | | | | | |
| 67 | | | $P_{\text{у}}, \text{Н}$ | | $P_{\text{у}} = B' \cdot \alpha \cdot E \cdot I \cdot \Delta t / l_{\text{м}}^2$ | | 8800,9 | | сила упругой деформации | | | | | | | | | | |
| 68 | | | $P_{\text{х}}, \text{Н}$ | | $P_{\text{х}} = A \cdot \alpha \cdot E \cdot I \cdot \Delta t / l_{\text{м}}^2$ | | 8800,9 | | сила упругой деформации | | | | | | | | | | |
| 69 | | | $P_{\text{у}}, \text{Н}$ | | $P_{\text{у}} = B \cdot \alpha \cdot E \cdot I \cdot \Delta t / l_{\text{м}}^2$ | | 23,8 | | сила упругой деформации | | | | | | | | | | |
| 70 | | | $\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$ | | $\sigma = C \cdot \alpha \cdot E \cdot d_{\text{в}} \cdot \Delta t / (l_{\text{м}})$ | | 137,1 | | изгибающее напряжение, возникающее в меньшем плече в месте заземления у неподвижной опоры | | | | | | | | | | |
| 71 | | | ω | | при ручной сварке с подваркой со стороны вершины шва | | 0,95 | | коэффициент прочности сварного шва | | | | | | | | | | |
| 72 | | | $[\sigma], \text{МПа}$ | | РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 | | 147,0 | | номинальные допускаемые напряжения | | | | | | | | | | |
| 73 | | | $\sigma_{\text{доп}}, \text{МПа}$ | | $\sigma_{\text{доп}} = \omega \cdot [\sigma]$ | | 139,7 | | допускаемое компенсационное напряжение | | | | | | | | | | |
| 74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 77 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 78 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 79 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 81 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 82 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 84 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Расчет компенсаторов тепловой сети в Excel [Режим совместимости] - Microsoft Excel

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Вырезать Вставить Копировать Формат по образцу Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число Условное форматирование Форматировать как таблицу Стили Вставить Удалить Формат Ячейки Заполнить Очистить Сортировка и фильтр Найти и выделить Редактирование

R13C8 удлинение короткого плеча

| Расчет Г-образного горизонтального компенсатора (Е.Я. Соколов "Теплофикация и тепловые сети", 1999 г.) | | | | Расчет П-образного горизонтального компенсатора (Е.Я. Соколов "Теплофикация и тепловые сети", 1999 г.) | | | |
|--|--|-----------|--|--|---|-----------|-------------------|
| Величина | Формула | Результат | Пояснения | Величина | Формула | Результат | Пояснения |
| $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | исходные данные | 50 | разность температур рабочей и при монтаже | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | исходные данные | 100 | разнос |
| $l, \text{м}$ | исходные данные | 110,0 | длина короткого плеча | $L, \text{м}$ | исходные данные | 24 | рассто |
| $l_1, \text{м}$ | исходные данные | 3 | длина длинного плеча | $R, \text{м}$ | исходные данные | 0 | радиус |
| $\alpha, \text{мм}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | исходные данные | 0,000012 | коэффициент линейного удлинения | $l_1, \text{м}$ | исходные данные | 4,5 | длина с |
| $\Delta, \text{м}$ | $\Delta = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$ | 0,066 | удлинение короткого плеча | $l, \text{м}$ | исходные данные | 0,5 | вылет л |
| n | $n = l_1/l$ | 0,027 | отношение длины длинного плеча к длине короткого | ω | без растяжки | 1 | коэфф. |
| $\omega, ^\circ$ | исходные данные | 90 | угол между коротким и длинным плечами | $\alpha, \text{мм}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ | исходные данные | 0,0000122 | коэфф. |
| $\beta = \omega - 90, ^\circ$ | исходные данные | 0 | | $\Delta, \text{м}$ | $\Delta = \alpha \cdot L \cdot \Delta t$ | 0,02928 | линейн |
| $d_n, \text{м}$ | исходные данные | 0,219 | наружный диаметр трубопровода | $d_n, \text{м}$ | исходные данные | 0,076 | наружн |
| $E, \text{МПа}$ | исходные данные | 195219 | модуль продольной упругости | $\delta, \text{м}$ | исходные данные | 0,003 | толщи |
| $\sigma, \text{МПа}$ | $\sigma = \frac{1,5 \cdot \Delta \cdot E \cdot d}{l^2 \cdot \cos \beta} \times (n + 1 + \frac{n+3}{n+1} \sin \beta)$ | 0,4 | макс. изгибающее напряжение, возникающее в коротком плече в месте защемления у неподвижной | $r_{cp}, \text{м}$ | $r_{cp} = (d_n - \delta)/2$ | 0,04 | радиус |
| ω | при ручной сварке с подваркой со стороны вершины шва | 0,95 | коэффициент прочности сварного шва | h | $h = \delta \cdot R / r_{cp}^2$ | 0,00 | геомет |
| $[\sigma], \text{МПа}$ | РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 | 130,0 | номинальные допускаемые напряжения | k | $k = 1$ | 1,00 | коэфф. |
| $\sigma_{доп}, \text{МПа}$ | $\sigma_{доп} = \omega \cdot [\sigma]$ | 123,5 | допускаемое компенсационное напряжение | m | $m = 1$ | 1,00 | поправ |
| | | | | $E, \text{МПа}$ | исходные данные | 193747,5 | модуль |
| | | | | $A, \text{м}^3$ | $A = 2 \cdot [\frac{1}{k} (3,14Rl^2 - 2,28R^3l + 1,4R^3) + 0,67l^3 + l_1l^2 - 4Rl^2 + 2R^3l - 1,33R^3]$ | 2,4 | расчет |
| | | | | $I, 10^5 \cdot \text{м}^4$ | $I = 0,05 \cdot [d_n^4 - (d_n - 2\delta)^4] \cdot 10^5$ | 0,05 | центра |
| | | | | $P, \text{Н}$ | $P = \Delta \cdot E \cdot I / A$ | 1097,29 | осевое |
| | | | | $\sigma, \text{МПа}$ | $\sigma = \Delta \cdot E \cdot d \cdot l \cdot m \cdot \omega / A$ | 89,2 | макс. и средне |
| | | | | ω | при ручной односторонней сварке | 0,70 | коэфф. |
| | | | | $[\sigma], \text{МПа}$ | РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 | 125,0 | номина |
| | | | | $\sigma_{доп}, \text{МПа}$ | $\sigma_{доп} = \omega \cdot [\sigma]$ | 87,5 | допуск |

Рис. 9.40. Схема П-образного компенсатора

Рис. 9.42. Схема Ω-образного компенсатора

Компенсаторы по Николаеву Компенсаторы по Соколову РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 Объемы земляных работ Гидравлика Трубы КМС Лист1

10:50 28.02.2024

Расчет компенсаторов тепловой сети в Excel [Режим совместимости] - Microsoft Excel

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число Условное форматирование Форматировать как таблицу Стили Ячейки Редактирование

R13C8 удлинение короткого плеча

| 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|----|---|--|----|----|----|--|---|----|----|----|-----------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 7 | ра (Е.Я. Соколов "Теплофикация и тепловые сети", 1999 г.) | | | | | Расчет П-образного горизонтального компенсатора (Е.Я. Соколов "Теплофикация и тепловые сети", 1999 г.) | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | Результат | Пояснения | | | | Величина | Формула | | | | Результат | Пояснения | | | | | | | | |
| 9 | 50 | разность температур рабочей и при монтаже | | | | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | исходные данные | | | | 100 | разность температур рабочей и при монтаже | | | | | | | | |
| 10 | 110,0 | длина короткого плеча | | | | L, м | исходные данные | | | | 24 | расстояние между неподвижными опорами | | | | | | | | |
| 11 | 3 | длина длинного плеча | | | | R, м | исходные данные | | | | 0 | радиус отвода | | | | | | | | |
| 12 | 0,000012 | коэффициент линейного удлинения | | | | $\lambda, \text{м}$ | исходные данные | | | | 4,5 | длина спинки компенсатора | | | | | | | | |
| 13 | 0,066 | удлинение короткого плеча | | | | l, м | исходные данные | | | | 0,5 | вылет компенсатора | | | | | | | | |
| 14 | 0,027 | отношение длины длинного плеча к длине короткого | | | | ω | без растяжки | | | | 1 | коэфф., учитывающий предварительную растяжку | | | | | | | | |
| 15 | 90 | угол между коротким и длинным плечами | | | | $\alpha, \text{мм}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ | исходные данные | | | | 0,0000122 | коэффициент линейного удлинения | | | | | | | | |
| 16 | 0 | | | | | $\Delta, \text{м}$ | $\Delta = \alpha \times L \times \Delta t$ | | | | 0,02928 | линейное удлинение компенсируемого участка | | | | | | | | |
| 17 | 0,219 | наружный диаметр трубопровода | | | | $d_n, \text{м}$ | исходные данные | | | | 0,076 | наружный диаметр трубопровода | | | | | | | | |
| 18 | 195219 | модуль продольной упругости | | | | $\delta, \text{м}$ | исходные данные | | | | 0,003 | толщина стенки трубопровода | | | | | | | | |
| 19 | 0,4 | макс. изгибающее напряжение, возникающее в коротком плече в месте заземления у неподвижной | | | | $r_{\text{ср}}, \text{м}$ | $r_{\text{ср}} = (d_n - \delta)/2$ | | | | 0,04 | радиус изгиба оси трубы | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | h | $h = \delta \cdot R / r_{\text{ср}}^2$ | | | | 0,00 | геометрическая характеристика отвода | | | | | | | | |
| 21 | 0,95 | коэффициент прочности сварного шва | | | | k | $k = 1$ | | | | 1,00 | коэффициент жесткости гнутого гладкого отвода | | | | | | | | |
| 22 | 130,0 | номинальные допускаемые напряжения | | | | m | $m = 1$ | | | | 1,00 | поправочный коэффициент напряжения | | | | | | | | |
| 23 | 123,5 | допускаемое компенсационное напряжение | | | | E, МПа | исходные данные | | | | 193747,5 | модуль продольной упругости | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | A, м ³ | $A = 2 \cdot \left[\frac{1}{k} (3,14Rl^2 - 2,28R^2l + 1,4R^3) + 0,67l^3 + l_1^2 - 4Rl^2 + 2R^3l - 1,33R^3 \right]$ | | | | 2,4 | расчетная величина | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | I, 10 ⁵ ·м ⁴ | $I = 0,05 \cdot [d_n^4 - (d_n - 2\delta)^4] \cdot 10^5$ | | | | 0,05 | центральный момент инерции сечения трубы | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | P, Н | $P = \Delta \cdot E \cdot I / A$ | | | | 1097,29 | осевое усилие | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | $\sigma, \text{МПа}$ | $\sigma = \Delta \cdot E \cdot d \cdot l \cdot m \cdot \omega / A$ | | | | 89,2 | макс. изгибающее напряжение, возникающее в средней части спинки компенсатора | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | ω | при ручной односторонней сварке | | | | 0,70 | коэффициент прочности сварного шва | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | [σ], МПа | РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 | | | | 125,0 | номинальные допускаемые напряжения | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | $\sigma_{\text{доп}}, \text{МПа}$ | $\sigma_{\text{доп}} = \omega \cdot [\sigma]$ | | | | 87,5 | допускаемое компенсационное напряжение | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

схема П-образного компенсатора

Компенсаторы по Соколову РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5

Готово 120% 10:51 28.02.2024

Расчет компенсаторов тепловой сети в Excel [Режим совместимо]

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Вырезать Копировать Вставить Формат по образцу Буфер обмена

Times New Rom 12 Шрифт

Выравнивание

Число

R23C9 147

| Номинальные допускаемые напряжения [σ] для углеродистой и марганцевистой сталей, не зависящие от расчетного ресурса, МПа | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| t, °C | | Марка стали | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Ст2кп | Ст3кп | Ст2сп, Ст2пс | Ст3сп, Ст3пс | Ст4пс, Ст4сп | СЗГпс | 22К | 14ГНМА | 16ГНМ, 16ГНМА | | | | | | | | | | | | |
| От 20 до 50 | | 124 | 133 | 130 | 140 | 145 | 150 | 170 | 180 | 190 | | | | | | | | | | | | |
| 150 | | 106 | 115 | 112 | 125 | 129 | 134 | 155 | 179 | 181 | | | | | | | | | | | | |
| 200 | | 93 | 111 | 100 | 117 | 121 | 125 | 147 | 175 | 176 | | | | | | | | | | | | |
| 250 | | 80 | 102 | 86 | 107 | 111 | 115 | 140 | 171 | 172 | | | | | | | | | | | | |
| 275 | | | | 78 | 102 | 106 | 109 | 135 | 170 | 169 | | | | | | | | | | | | |
| 300 | | | | 70 | | 98 | 103 | 130 | 169 | 167 | | | | | | | | | | | | |
| 320 | | | | | | | | 126 | 164 | 165 | | | | | | | | | | | | |
| 340 | | | | | | | | 122 | 161 | 163 | | | | | | | | | | | | |
| 350 | | | | | | | | 120 | 159 | 161 | | | | | | | | | | | | |
| 360 | | | | | | | | | 157 | 159 | | | | | | | | | | | | |
| 370 | | | | | | | | | 155 | 157 | | | | | | | | | | | | |
| 380 | | | | | | | | | 152 | 154 | | | | | | | | | | | | |
| Номинальные допускаемые напряжения [σ] для углеродистой и марганцевистой сталей, МПа | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t, °C | | Марка стали | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 08, 10, 12К | | | | | | 15, 15К, 16К | | | 20, 20К, 18К | | | 16ГС, 09Г2С | | | 10Г2С1, 17ГС, 17Г1С, | | | 15ГС | | |
| | | Расчетный ресурс, ч | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁶ | 1·10 ⁷ | 2·10 ⁷ | 1·10 ⁸ | 1·10 ⁹ | 2·10 ⁹ | 3·10 ⁹ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 1·10 ⁶ | 1·10 ⁷ | 2·10 ⁷ | 1·10 ⁸ | 1·10 ⁹ | 2·10 ⁹ | |
| От 20 до 100 | | 130 | 130 | 130 | 130 | 140 | 140 | 140 | 147 | 147 | 147 | 147 | 170 | 170 | 170 | 177 | 177 | 177 | 185 | 185 | 185 | |
| 200 | | 120 | 120 | 120 | 120 | 130 | 130 | 130 | 140 | 140 | 140 | 140 | 150 | 150 | 150 | 165 | 165 | 165 | 169 | 169 | 169 | |
| 250 | | 108 | 108 | 108 | 108 | 120 | 120 | 120 | 132 | 132 | 132 | 132 | 145 | 145 | 145 | 156 | 156 | 156 | 165 | 165 | 165 | |
| 275 | | 102 | 102 | 102 | 102 | 113 | 113 | 113 | 126 | 126 | 126 | 126 | 140 | 140 | 140 | 150 | 150 | 150 | 161 | 161 | 161 | |
| 300 | | 96 | 96 | 96 | 96 | 106 | 106 | 106 | 119 | 119 | 119 | 119 | 133 | 133 | 133 | 144 | 144 | 144 | 153 | 153 | 153 | |
| 320 | | 92 | 92 | 92 | 92 | 101 | 101 | 101 | 114 | 114 | 114 | 114 | 127 | 127 | 127 | 139 | 139 | 139 | 145 | 145 | 145 | |
| 340 | | 87 | 87 | 87 | 87 | 96 | 96 | 96 | 109 | 109 | 109 | 109 | 122 | 122 | 122 | 133 | 133 | 133 | 137 | 137 | 137 | |
| 350 | | 85 | 85 | 85 | 85 | 93 | 93 | 93 | 106 | 106 | 106 | 106 | 120 | 120 | 120 | 131 | 131 | 131 | 133 | 133 | 133 | |
| 360 | | 82 | 82 | 82 | 82 | 90 | 90 | 90 | 103 | 103 | 103 | 103 | 117 | 117 | 117 | 127 | 127 | 127 | 129 | 129 | 129 | |
| 380 | | 76 | 76 | 76 | 71 | 85 | 85 | 85 | 97 | 97 | 97 | 97 | 88 | 112 | 112 | 112 | 121 | 121 | 121 | 121 | 121 | |
| 400 | | 73 | 73 | 66 | 60 | 80 | 80 | 72 | 92 | 92 | 78 | 71 | 107 | 107 | 95 | 113 | 113 | 96 | 113 | 113 | 96 | |
| 410 | | 70 | 68 | 61 | 55 | 77 | 72 | 65 | 89 | 86 | 70 | 63 | 104 | 97 | 83 | 107 | 102 | 85 | 107 | 102 | 85 | |
| 420 | | 68 | 62 | 57 | 50 | 74 | 66 | 58 | 86 | 79 | 63 | 56 | 102 | 87 | 73 | 102 | 90 | 75 | 102 | 90 | 75 | |
| 430 | | 66 | 57 | 51 | 45 | 71 | 60 | 52 | 83 | 72 | 57 | 50 | 98 | 76 | 63 | 97 | 78 | 65 | 97 | 78 | 65 | |
| 440 | | 63 | 51 | 45 | 40 | 68 | 53 | 45 | 80 | 66 | 50 | 44 | 95 | 68 | 55 | 92 | 70 | 55 | 92 | 70 | 55 | |
| 450 | | 61 | 46 | 38 | 35 | 65 | 47 | 38 | 77 | 59 | 46 | 39 | 89 | 62 | 46 | 88 | 63 | 46 | 88 | 63 | 46 | |
| 460 | | 58 | 40 | 33 | 29 | 62 | 40 | 33 | 74 | 52 | 38 | 34 | 83 | 54 | 38 | 82 | 54 | 38 | 82 | 54 | 38 | |
| 470 | | 52 | 34 | 28 | 24 | 54 | 34 | 28 | 64 | 46 | 32 | 28 | 71 | 46 | 32 | 71 | 46 | 32 | 71 | 46 | 32 | |
| 480 | | 45 | 28 | 22 | 18 | 46 | 28 | 22 | 56 | 39 | 27 | 24 | 60 | | | 60 | | | 60 | | | |
| 490 | | 39 | 24 | | | 40 | 24 | | 49 | 33 | | | | | | | | | | | | |
| 500 | | 33 | 20 | | | 34 | 20 | | 41 | 26 | | | | | | | | | | | | |
| Номинальные допускаемые напряжения [σ] для теплоустойчивой стали, МПа | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t, °C | | Марка стали | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 12ХМ, 12МХ | | | | 15ХМ | | | | 12Х1МФ | | | | 12Х2МФСР | | | | 15Х1 М1Ф | | | | |
| | | Расчетный ресурс, ч | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁶ | 1·10 ⁷ | 2·10 ⁷ | 3·10 ⁷ | 1·10 ⁸ | 1·10 ⁹ | 2·10 ⁹ | 3·10 ⁹ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁶ | 1·10 ⁷ | 2·10 ⁷ | 3·10 ⁷ | |
| От 20 до 150 | | 147 | 147 | 147 | 147 | 153 | 153 | 153 | 153 | 173 | 173 | 173 | 173 | 167 | 167 | 167 | 192 | 192 | 192 | 192 | 192 | |

Компенсаторы по Николаеву Компенсаторы по Соколову РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 Объемы земляных работ Гидравлика Трубы КМС Лист 1

Продолжение приложения

Расчет компенсаторов тепловой сети

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Вырезать Копировать Вставить Формат по образцу Буфер обмена Шрифт Times New Rom 12 Ж К У Выравнивание Перенос текста Объединить и поместить в центре Число

R23C9 fx 147

| | | Номинальные допустимые напряжения [σ] для теплостойчивой стали, МПа | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| | | Марка стали | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| t, °C | | 12X2M, 12M2X | | | | | | 15X2M | | | | | | 12X1MΦ | | | | | | 12X2MΦCP | | | | | | 15X1 M1Φ | | | | |
| | | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | |
| От 20 до 150 | | 147 | 147 | 147 | 147 | 153 | 153 | 153 | 153 | 173 | 173 | 173 | 173 | 167 | 167 | 167 | 167 | 192 | 192 | 192 | 192 | | | | | | | | | |
| 250 | | 145 | 145 | 145 | 145 | 152 | 152 | 152 | 152 | 166 | 166 | 166 | 166 | 160 | 160 | 160 | 160 | 186 | 186 | 186 | 186 | | | | | | | | | |
| 300 | | 141 | 141 | 141 | 141 | 147 | 147 | 147 | 147 | 159 | 159 | 159 | 159 | 153 | 153 | 153 | 153 | 180 | 180 | 180 | 180 | | | | | | | | | |
| 350 | | 137 | 137 | 137 | 137 | 140 | 140 | 140 | 140 | 152 | 152 | 152 | 152 | 147 | 147 | 147 | 147 | 172 | 172 | 172 | 172 | | | | | | | | | |
| 400 | | 132 | 132 | 132 | 132 | 133 | 133 | 133 | 133 | 145 | 145 | 145 | 145 | 140 | 140 | 140 | 140 | 162 | 162 | 162 | 162 | | | | | | | | | |
| 420 | | 129 | 129 | 129 | 129 | 131 | 131 | 131 | 131 | 142 | 142 | 142 | 142 | 137 | 137 | 137 | 137 | 158 | 158 | 158 | 158 | | | | | | | | | |
| 440 | | 126 | 126 | 126 | 126 | 128 | 128 | 128 | 128 | 139 | 139 | 139 | 139 | 134 | 134 | 134 | 134 | 154 | 154 | 154 | 154 | | | | | | | | | |
| 450 | | 125 | 125 | 125 | 125 | 127 | 127 | 127 | 127 | 138 | 138 | 138 | 138 | 133 | 133 | 133 | 133 | 152 | 152 | 152 | 152 | | | | | | | | | |
| 460 | | 123 | 123 | 123 | 123 | 125 | 125 | 125 | 125 | 136 | 136 | 136 | 136 | 130 | 131 | 131 | 131 | 150 | 150 | 150 | 150 | | | | | | | | | |
| 480 | | 120 | 120 | 102 | 102 | 122 | 122 | 119 | 103 | 133 | 133 | 120 | 107 | 128 | 128 | 119 | 146 | 145 | 130 | 123 | | | | | | | | | | |
| 500 | | 116 | 93 | 77 | 64 | 119 | 105 | 85 | 76 | 130 | 113 | 96 | 88 | 121 | 106 | 97 | 140 | 120 | 108 | 100 | | | | | | | | | | |
| 510 | | 114 | 78 | 60 | 53 | 117 | 85 | 72 | 62 | 126 | 101 | 88 | 79 | 115 | 94 | 87 | 137 | 107 | 96 | 90 | | | | | | | | | | |
| 520 | | 107 | 68 | 49 | 43 | 110 | 70 | 58 | 50 | 112 | 90 | 77 | 72 | 105 | 85 | 79 | 125 | 96 | 86 | 80 | | | | | | | | | | |
| 530 | | 93 | 54 | 40 | 35 | 97 | 56 | 44 | 39 | 100 | 81 | 69 | 65 | 95 | 78 | 70 | 111 | 86 | 77 | 72 | | | | | | | | | | |
| 540 | | 77 | 43 | | | 80 | 45 | 35 | 31 | 88 | 73 | 62 | 58 | 87 | 70 | 63 | 100 | 78 | 69 | 65 | | | | | | | | | | |
| 550 | | 60 | | | | 62 | 35 | 26 | 23 | 80 | 66 | 56 | 52 | 80 | 63 | 56 | 90 | 71 | 63 | 58 | | | | | | | | | | |
| 560 | | | | | | 52 | 27 | | | 72 | 59 | 50 | 46 | 72 | 57 | 50 | 81 | 64 | 57 | 52 | | | | | | | | | | |
| 570 | | | | | | 42 | 21 | | | 65 | 53 | 44 | 41 | 65 | 52 | 45 | 73 | 57 | 51 | 47 | | | | | | | | | | |
| 580 | | | | | | | | | | 59 | 47 | 39 | 36 | 59 | 46 | 41 | 66 | 52 | 46 | 43 | | | | | | | | | | |
| 590 | | | | | | | | | | 53 | 41 | 35 | 32 | 53 | 41 | 36 | 60 | 47 | 42 | 39 | | | | | | | | | | |
| 600 | | | | | | | | | | 47 | 37 | 31 | 29 | 47 | 37 | 33 | 54 | 43 | 38 | 35 | | | | | | | | | | |
| 610 | | | | | | | | | | 41 | 33 | | | 41 | 33 | 28 | 48 | 40 | | | | | | | | | | | | |
| 620 | | | | | | | | | | 35 | | | | 35 | | 43 | | | | | | | | | | | | | | |

| | | Номинальные допустимые напряжения [σ] для высокохромистой и аустенитной сталей, МПа | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|--|--|--|
| | | Марка стали | | | | | | | | | | | | | | |
| t, °C | | 12X11B2MΦ | | | | | 12X18H12T, 12X18H10T | | | | | 09X14H19B2BP, по умолчанию | | | | |
| | | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | | | |
| От 20 до 150 | | 195 | 195 | 195 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 | | | | |
| 250 | | 183 | 183 | 183 | 125 | 125 | 125 | 125 | 131 | 131 | 131 | | | | | |
| 300 | | 175 | 175 | 175 | 120 | 120 | 120 | 120 | 128 | 128 | 128 | | | | | |
| 350 | | 167 | 167 | 167 | 116 | 116 | 116 | 116 | 125 | 125 | 125 | | | | | |
| 400 | | 158 | 158 | 158 | 111 | 111 | 111 | 111 | 123 | 123 | 123 | | | | | |
| 450 | | 152 | 152 | 152 | 107 | 107 | 107 | 107 | 120 | 120 | 120 | | | | | |
| 500 | | 145 | 145 | 145 | 104 | 104 | 104 | 104 | 117 | 117 | 117 | | | | | |
| 520 | | 143 | 134 | 128 | 103 | 103 | 103 | 103 | 116 | 116 | 116 | | | | | |
| 530 | | 141 | 124 | 119 | 103 | 103 | 103 | 102 | 116 | 116 | 116 | | | | | |
| 540 | | 140 | 115 | 108 | 102 | 102 | 102 | 100 | 115 | 115 | 115 | | | | | |
| 550 | | 130 | 107 | 100 | 102 | 102 | 100 | 93 | 115 | 115 | 115 | | | | | |
| 560 | | 121 | 97 | 90 | 101 | 101 | 91 | 87 | 114 | 114 | 114 | | | | | |
| 570 | | 113 | 87 | 80 | 101 | 97 | 87 | 81 | 114 | 114 | 114 | | | | | |
| 580 | | 104 | 78 | 72 | 100 | 90 | 81 | 74 | 113 | 113 | 113 | | | | | |
| 590 | | 95 | 69 | 64 | 98 | 81 | 73 | 68 | 113 | 113 | 109 | | | | | |
| 600 | | 87 | 60 | 55 | 94 | 74 | 66 | 62 | 112 | 112 | 102 | | | | | |
| 610 | | 78 | 51 | 47 | 88 | 68 | 59 | 55 | 111 | 104 | 94 | | | | | |
| 620 | | 70 | 47 | 39 | 82 | 62 | 53 | 50 | 111 | 97 | 87 | | | | | |
| 630 | | 62 | 37 | 31 | 78 | 57 | 49 | 46 | 110 | 89 | 79 | | | | | |
| 640 | | 54 | 27 | 23 | 72 | 52 | 45 | 42 | 110 | 81 | 72 | | | | | |
| 650 | | 45 | 20 | | 65 | 48 | 41 | 38 | 109 | 74 | 64 | | | | | |
| 660 | | 38 | | | 60 | 45 | 37 | | 103 | 66 | 56 | | | | | |
| 670 | | 30 | | | 55 | 41 | 34 | | 96 | 59 | 49 | | | | | |
| 680 | | | | | 50 | 38 | 32 | | 88 | 52 | 41 | | | | | |
| 690 | | | | | 45 | 34 | 28 | | 79 | 44 | 34 | | | | | |

Компенсаторы по Николаеву | Компенсаторы по Соколову | РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 | Объемы земляных работ | Гидравлика

Расчет компенсаторов тепловой сети в Excel

Главная Вставка Разметка страницы Формулы Данные Рецензирование Вид ABBYY FineReader 11

Вырезать Копировать Вставить Формат по образцу Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число Условное форматирование

R23C9 f_к 147

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|--|--|--|--|----|----|--|--|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 69 | 570 | | | | | 42 | 21 | | | | 65 | 53 | 44 | 41 | 65 | 52 | 45 | 73 | 57 | 51 | 47 |
| 70 | 580 | | | | | | | | | | 59 | 47 | 39 | 36 | 59 | 46 | 41 | 66 | 52 | 46 | 43 |
| 71 | 590 | | | | | | | | | | 53 | 41 | 35 | 32 | 53 | 41 | 36 | 60 | 47 | 42 | 39 |
| 72 | 600 | | | | | | | | | | 47 | 37 | 31 | 29 | 47 | 37 | 33 | 54 | 43 | 38 | 35 |
| 73 | 610 | | | | | | | | | | 41 | 33 | | | 41 | 33 | 28 | 48 | 40 | | |
| 74 | 620 | | | | | | | | | | 35 | | | | 35 | | | 43 | | | |

Номинальные допускаемые напряжения [σ] для для высокохромистой и аустенитной сталей, МПа

| t, °C | Марка стали | | | | | | | | | |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 12Х11В2МФ | | | 12Х18Н12Т; 12Х18Н10Т | | | 09Х14Н19В2ЕР; 09Х14Н14В2ЕР | | | |
| | Расчетный ресурс, ч | | | | | | | | | |
| | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ | 3·10 ⁵ | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ |
| От 20 до 150 | 195 | 195 | 195 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 | 147 |
| 250 | 183 | 183 | 183 | 125 | 125 | 125 | 125 | 131 | 131 | 131 |
| 300 | 175 | 175 | 175 | 120 | 120 | 120 | 120 | 128 | 128 | 128 |
| 350 | 167 | 167 | 167 | 116 | 116 | 116 | 116 | 125 | 125 | 125 |
| 400 | 158 | 158 | 158 | 111 | 111 | 111 | 111 | 123 | 123 | 123 |
| 450 | 152 | 152 | 152 | 107 | 107 | 107 | 107 | 120 | 120 | 120 |
| 500 | 145 | 145 | 145 | 104 | 104 | 104 | 104 | 117 | 117 | 117 |
| 520 | 143 | 134 | 128 | 103 | 103 | 103 | 103 | 116 | 116 | 116 |
| 530 | 141 | 124 | 119 | 103 | 103 | 103 | 102 | 116 | 116 | 116 |
| 540 | 140 | 115 | 108 | 102 | 102 | 102 | 100 | 115 | 115 | 115 |
| 550 | 130 | 107 | 100 | 102 | 102 | 100 | 93 | 115 | 115 | 115 |
| 560 | 121 | 97 | 90 | 101 | 101 | 91 | 87 | 114 | 114 | 114 |
| 570 | 113 | 87 | 80 | 101 | 97 | 87 | 81 | 114 | 114 | 114 |
| 580 | 104 | 78 | 72 | 100 | 90 | 81 | 74 | 113 | 113 | 113 |
| 590 | 95 | 69 | 64 | 98 | 81 | 73 | 68 | 113 | 113 | 109 |
| 600 | 87 | 60 | 55 | 94 | 74 | 66 | 62 | 112 | 112 | 102 |
| 610 | 78 | 51 | 47 | 88 | 68 | 59 | 55 | 111 | 104 | 94 |
| 620 | 70 | 47 | 39 | 82 | 62 | 53 | 50 | 111 | 97 | 87 |
| 630 | 62 | 37 | 31 | 78 | 57 | 49 | 46 | 110 | 89 | 79 |
| 640 | 54 | 27 | 23 | 72 | 52 | 45 | 42 | 110 | 81 | 72 |
| 650 | 45 | 20 | | 65 | 48 | 41 | 38 | 109 | 74 | 64 |
| 660 | 38 | | | 60 | 45 | 37 | | 103 | 68 | 56 |
| 670 | 30 | | | 55 | 41 | 34 | | 96 | 59 | 49 |
| 680 | | | | 50 | 38 | 32 | | 88 | 52 | 41 |
| 690 | | | | 45 | 34 | 28 | | 79 | 44 | 34 |
| 700 | | | | 40 | 30 | 25 | | 71 | 37 | 27 |

Номинальные допускаемые напряжения [σ] для стали 10Х9МФБ, МПа

| t, °C | Расчетный ресурс, ч | | |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| | 1·10 ⁴ | 1·10 ⁵ | 2·10 ⁵ |
| От 20 до 150 | 167 | 167 | 167 |
| 250 | 160 | 160 | 160 |
| 300 | 157 | 157 | 157 |
| 350 | 154 | 154 | 154 |
| 400 | 151 | 151 | 151 |
| 450 | 148 | 148 | 148 |
| 470 | 147 | 147 | 147 |
| 480 | 146 | 146 | 143 |
| 490 | 145 | 138 | 132 |
| 500 | 145 | 127 | 122 |
| 520 | 127 | 108 | 102 |
| 540 | 109 | 90 | 83 |
| 550 | 100 | | |

Номинальные допускаемые напряжения [σ] для стали 2 1/4 Cr1Mo (10CrMo910), МПа

| t, °C | [σ], МПа |
|--------|----------|
| 20-100 | 180 |
| 200 | 163 |
| 250 | 160 |
| 300 | 153 |
| 350 | 146 |
| 400 | 140 |
| 450 | 133 |
| 480 | 123 |
| 500 | 96 |
| 520 | 73 |
| 540 | 53 |
| 560 | 38 |
| 580 | 28 |

Компенсаторы по Николаеву / Компенсаторы по Соколову / РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 / Объемы земляных работ / Гидравлика / Труф

Готово

Screenshot of Microsoft Word showing a document with a table and a list of work items.

Document text:

Разработчик программы
Волосатов Павел Анатольевич
инженер-проектировщик 2 категории
ПК "Головной проектный институт ЧЕЛЯБИНСКГРАЖДАНПРОЕКТ"
e-mail: doberman_sod@74.ru

| Характеристика | на группу зд. | на дом |
|--------------------------------------|---------------|--------|
| Длина трассы, м: | | |
| -под дорогой | 23 | 26 |
| -при пересечениях | 4 | 0 |
| -разработка вручную | 3 | 4 |
| -общая | 64 | 43,5 |
| Отношение высоты откоса к его залож. | 2 | 1 |
| Диаметр наружн., мм | 219 | 108 |
| Высота канала, м | 0,79 | 0,64 |
| Ширина канала, м | 1,48 | 1,16 |
| Глубина траншеи, м | 2,75 | 1,7 |
| Ширина траншеи по низу, м | 1,7 | 1,4 |
| Ширина траншеи по верху, м | 4,45 | 4,8 |

| № п/п | НАИМЕНОВАНИЕ РАБОТ | Ед. измерения | Количество на | |
|-------|---|----------------|---------------|--------|
| | | | на группу зд. | на дом |
| 1 | Разработка грунта экскаватором с отвозкой | м ³ | 515,8 | 208,2 |
| 2 | Разработка грунта вручную с отвозкой | м ³ | 59,2 | 21,1 |
| 3 | Подчистка дна траншеи вручную | м ³ | 11,2 | 6,5 |
| 4 | Устройство песчаного основания | м ³ | 11,2 | 6,5 |
| 5 | Засыпка траншеи малосжимаемым грунтом вручную | м ³ | 53,9 | 45,0 |
| 6 | Засыпка траншеи малосжимаемым грунтом бульдозером | м ³ | 169,6 | 88,1 |
| 7 | Засыпка траншеи обычным грунтом вручную | м ³ | 67,9 | 23,4 |
| 8 | Засыпка траншеи обычным грунтом бульдозером | м ³ | 213,6 | 45,7 |
| 9 | Объем грунта, вытесненного каналом | м ³ | 74,8 | 32,3 |
| 10 | | | | |
| 11 | | | | |
| 12 | | | | |
| 13 | | | | |

Taskbar: Готово | Компенсаторы по Николаеву | Компенсаторы по Соколову | РД 10-249-98 таблицы 2.1-2.5 | Объем

Учебное издание

Злобин Владимир Германович

Системы теплоснабжения

Расчет трубопроводов на прочность и на компенсацию температурных удлинений

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова

Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.stud.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
-Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 01.04.2024 г. Рег. № 5145/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.