

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

О. А. Степанов, Е. О. Антонова, Н. В. Рыдалина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Учебное пособие

Часть 2

Тюмень
ТИУ
2024

УДК 621.438 (075.8)
ББК 39.15я73
С 794

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент А. П. Белкин;
доктор технических наук, профессор А. Б. Шабаров

Степанов, О. А. Проектирование тепловых сетей промышленных предприятий: учебное пособие. Часть 2 / О. А. Степанов, Е. О. Антонова, Н. В. Рыдалина. – Тюмень: ТИУ, 2024. – 82 с. – Текст: непосредственный.
ISBN 978-5-9961-3083-2 (общий)
ISBN 978-5-9961-3329-1 (часть 2)

Учебное пособие содержит необходимые теоретические, методические и практические сведения, являющиеся основой для проведения лекционных, практических занятий, решения контрольных работ, организации самостоятельной работы обучающихся, написания выпускных квалификационных работ бакалавров и магистрантов.

В учебном пособии рассматривается порядок проектирования тепловых сетей промышленного предприятия. В части 2 приведена методика механического расчета тепловых сетей. Представлены типовые задачи механического расчета нагрузок на опоры и расчет компенсаторов. Кроме того, показан порядок теплового расчета изоляции теплопроводов.

С целью систематизации знаний обучающихся в конце каждой главы предложены вопросы для проверки усвоения материала. Пособие содержит задание на выполнение контрольной работы, которое может быть использовано как основа для написания ВКР.

Учебное пособие предназначено для обучающихся направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также может быть полезно обучающимся, проходящим профессиональную подготовку и переподготовку по направлению 13.03.01 «Теплотехника и теплоэнергетика» профиль «Промышленная теплоэнергетика». Кроме того, издание адресуется аспирантам, магистрантам, инженерно-техническим работникам.

УДК 621.438 (075.8)
ББК 39.15я73

ISBN 978-5-9961-3083-2 (общий)
ISBN 978-5-9961-3329-1 (часть 2)

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тюменский индустриальный
университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ	8
1.1 Теоретические основы механического расчета трубопроводов.....	8
1.2 Решение задач механического расчета теплопроводов.....	11
Задача 1.1. Определение усилий на неподвижную опору	11
Задача 1.2. Определение горизонтального и вертикального усилий на неподвижную опору	12
Задача 1.3. Определение изгибающего напряжения в трубопроводе у неподвижной опоры	14
Задача 1.4. Определение изгибающего напряжения у неподвижной опоры при равенстве плеч	15
Задача 1.5. Определение напряжения от термических деформаций в трубопроводе	16
Задача 1.6. Определение напряжения от температурных удлинений при изменении угла поворота	17
Задача 1.7. Определение размера П-образного компенсатора	18
Задача 1.8. Определение расчетных усилий и напряжений для П-образного компенсатора	21
Задача 1.9. Определение расчетных усилий и напряжений для стандартного П-образного компенсатора табличным методом	22
Задача 1.10. Определение осевого усилия и напряжения в П-образном компенсаторе при сварных отводах	24
Задача 1.11. Пример расчета сальниковых компенсаторов	25
Задача 1.12. Пример расчета сильфонных (линзовых) компенсаторов.....	26
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 1.....	29
2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ... 30	
2.1 Пример теплового расчета для бесканального способа прокладки теплопроводов. Определение эффективности тепловой изоляции.....	36
Задача 2.1.Определить эффективность тепловой изоляции для двухтрубной тепловой сети бесканальной прокладки	39
2.2 Пример теплового расчета для бесканального способа прокладки теплопроводов. Определение толщины слоя изоляции	41
Задача 2.2. Определить толщину слоя изоляции для бесканального способа прокладки теплопроводов	43
2.3 Пример определения эффективности тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах	44
Задача 2.3. Определить эффективность тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах	48
2.4 Пример определения толщины слоя тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах, по нормируемой плотности теплового потока... 50	
Задача 2.4. Определить толщину слоя тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах, по нормируемой плотности теплового потока... 50	

2.5 Пример теплового расчета теплоизоляционной конструкции при надземной прокладке теплопроводов. Определение толщины слоя тепловой изоляции ...	52
2.6 Пример теплового расчета теплоизоляционной конструкции при надземной прокладке теплопроводов. Определение эффективности тепловой изоляции	55
Задача 2.5. Определить толщину слоя и эффективность тепловой изоляции теплопроводов, проложенных надземным способом	56
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 2.....	57
3. ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ	
ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК.....	58
3.1 Пример теплового и гидравлического расчета водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по двухступенчатой последовательной схеме.....	60
Задача 3.1. Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по двухступенчатой последовательной схеме	66
3.2 Пример теплового и гидравлического расчета водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по параллельной схеме	67
Задача 3.2. Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по параллельной схеме.....	71
3.3 Пример теплового и гидравлического расчета водоподогревательной установки системы горячего водоснабжения, присоединенной по смешанной схеме	72
Задача 3.3. Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по смешанной схеме	72
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 3.....	78
4. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ (КУРСОВУЮ РАБОТУ)	79
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	81

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для самостоятельного изучения дисциплины «Тепловые сети промышленных предприятий» и выполнения контрольных и курсовых работ (проектов) по дисциплинам «Тепловые сети промышленных предприятий», «Источники и системы теплоснабжения» обучающимися направления подготовки 13.03.01 «Теплотехника и теплоэнергетика» профиля «Промышленная теплоэнергетика» всех форм подготовки. Также может быть полезно для обучающихся, проходящих профессиональную подготовку и переподготовку по направлению 13.03.01 «Теплотехника и теплоэнергетика» профиля «Промышленная теплоэнергетика». В учебном пособии приводится порядок проектирования тепловых сетей промышленного предприятия. В части 2 приведена методика механического расчета тепловых сетей. Рассмотрены типовые задачи механического расчета: нагрузок на опоры и расчет компенсаторов. Приведена методика расчета П-образного компенсатора, сильфонного (линзового) и сальникового. Кроме того, приведен порядок теплового расчета изоляции теплопроводов. Рассмотрены все способы прокладки теплопроводов: подземный в каналах, подземный бесканальный, надземный (наиболее распространен на промышленных предприятиях). Для каждого способа прокладки тепловых сетей приводится методика расчета толщины теплоизоляции и (или) определение эффективности тепловой изоляции.

Важным элементом закрытой системы теплоснабжения являются теплообменники, в которых производится нагрев водопроводной воды для системы горячего водоснабжения (ГВС). В пособии приводится методика определения схемы присоединения теплообменников (или водоподогревателей, ВПУ), и соответственно тепловой и гидравлический расчет схем присоединения ВПУ- параллельной, двухступенчатой смешанной и двухступенчатой последовательной.

С целью систематизации знаний в конце каждой главы приводятся вопросы для проверки усвоенного материала. Пособие содержит задание на выполнение курсовой работы (проекта), которое может быть использовано как основа для выполнения ВКР.

При изучении основ теории и выполнении расчета у учащихся формируются следующие компетенции, в соответствии с рабочей программой дисциплины:

ПКС-4 - способность выполнять прочностной и гидравлический расчет тепловых сетей с учетом компенсации и самокомпенсации, а также выполнять планы и профили тепловых сетей;

ПКС-9 - способность к разработке схем размещения ОПД в соответствии с технологией производства.

При изучении курса и выполнении курсовой работы (проекта, ВКР) решаются следующие задачи:

1. Описание системы теплоснабжения.
2. Определение расчетных тепловых потоков на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. Построение графиков часовых расходов теплоты на отопление, вентиляцию и ГВС, а также годовых графиков теплопотребления по продолжительности тепловой нагрузки и по месяцам.
3. Регулирование отпуска теплоты в закрытых системах.
4. Определение расчетных расходов теплоносителя.
5. Разработка расчетной схемы и конструкции тепловой сети.
6. Гидравлический расчет системы теплоснабжения.
7. Построение пьезометрического графика.
8. Подбор сетевых и подпиточных насосов.
9. Механический расчет тепловой сети. Определение нагрузок на опоры.
10. Механический расчет тепловой сети. Расчет компенсаторов.
11. Расчет теплоизоляционной конструкции.
12. Тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки.

Курсовая работа (проект) состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 30-40 страниц.

Пояснительная записка должна содержать следующие разделы:

1. Описание системы теплоснабжения.
2. Определение расчетных тепловых потоков на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. Построение графиков часовых расходов теплоты на отопление, вентиляцию и ГВС, а также годовых графиков теплопотребления по продолжительности тепловой нагрузки и по месяцам.
3. Регулирование отпуска теплоты в закрытых системах.
4. Определение расчетных расходов теплоносителя.
5. Разработка расчетной схемы и конструкции тепловой сети.
6. Гидравлический расчет системы теплоснабжения.
7. Построение пьезометрического графика.
8. Подбор сетевых и подпиточных насосов.
9. Механический расчет тепловой сети. Определение нагрузок на опоры.
10. Механический расчет тепловой сети. Расчет компенсаторов.
11. Расчет теплоизоляционной конструкции.
12. Тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки.

В записке должен быть представлен следующий графический материал:

1. график часовых расходов теплоты на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение в зависимости от температуры наружного воздуха;
2. график годового расхода теплоты по продолжительности стояния температур наружного воздуха;
3. график годового теплопотребления по месяцам;
4. график центрального регулирования отпуска теплоты;

5. расчетная схема тепловой сети;
6. пьезометрический график;
7. схема тепловой изоляции в зависимости от способа прокладки теплопровода.

Для выполнения курсовой работы (проекта) исходными данными являются:

1. генплан площадки промышленного предприятия;
2. географическое положение района расположения предприятия;
3. расчетные температуры теплоносителя в прямом и обратном теплопроводах;
4. вид системы теплоснабжения (открытая, закрытая);
5. тип прокладки тепловых сетей (канальная, бесканальная, на опорах);
6. конструкция тепловой изоляции;
7. характеристика грунта (сухой, маловлажный, влажный);
8. высота зданий предприятия.

Для заданного района расположения промпредприятия по [5] принимаем следующие климатологические данные:

- расчетную температуру наружного воздуха для проектирования отопления (как правило, это средняя температура наиболее холодной пятидневки) $t_0, ^\circ\text{C}$;
- продолжительность стояния температур наружного воздуха с интервалом в 5°C в течение отопительного периода n_0 ; среднемесячные температуры наружного воздуха;
- среднегодовую температуру грунта на глубине вероятной прокладки теплопроводов.

Задание на курсовую работу (проект) приводится в виде таблицы 4.1.

1. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДОВ

1.1 Теоретические основы механического расчета трубопроводов

К задачам механического расчёта теплопроводов относятся: определение усилий на опоры; определение напряжений, возникающих от термических деформаций; расчет компенсаторов.

В курсовых и выпускных квалификационных дипломных работах возникает необходимость определить вертикальную и горизонтальную нормативные нагрузки на одну из неподвижных опор.

При расчете горизонтальной нагрузки на неподвижную опору необходимо учитывать: силы трения в подвижных опорах трубопроводов; силы трения в сальниковых компенсаторах; неуравновешенные силы внутреннего давления при применении сальниковых компенсаторов на участках теплопроводов, имеющих запорную арматуру, переходы диаметров, повороты или заглушки; силы упругой деформации при гибких компенсаторах и при самокомпенсации; силы трения трубопроводов об оболочку или оболочки о грунт при бесканальном способе прокладки; горизонтальную ветровую нагрузку при надземной прокладке теплопроводов. Горизонтальная осевая нагрузка на промежуточную неподвижную опору определяется как сумма сил, действующих с каждой стороны. Причем меньшая сумма сил, за исключением неуравновешенных сил внутреннего давления, принимается с коэффициентом 0,7. при равенстве суммарных сил с каждой стороны в качестве расчетной принимается равнодействующая сил с одной стороны с коэффициентом 0,3.

Горизонтальная осевая нагрузка на концевую неподвижную опору определяется как равнодействующая всех горизонтальных сил на опоре. Горизонтальную осевую нагрузку на неподвижную промежуточную опору определяется как разность сил, действующих с каждой стороны опоры.

Рассмотрим определение вертикальных и горизонтальных нагрузок.

Вертикальная нормативная нагрузка на подвижную опору, F_v , Н, определяется по формуле:

$$F_v = G_h \cdot L, \quad (1.1)$$

где G_h – вес одного метра трубопровода в рабочем состоянии, включающий вес трубы, теплоизоляционной конструкции и воды, Н/м; L – пролет между подвижными опорами, м.

Величина G_h для труб с наружным диаметром D_h может быть принята по табл. 1.1.

Таблица 1.1

Вес одного метра трубопровода в рабочем состоянии

D_h , мм	38	45	57	76	89	108	133	159	194	219	273	325
G_h , Н/м	69	81	128	170	215	283	399	513	676	860	1241	1670

D _н , мм	377	426	480	530	630	720	820	920	1020	1220	1420
G _н , Н/м	2226	2482	3009	3611	4786	6230	7735	9704	11767	16177	22134

Пролеты между неподвижными опорами L в зависимости от диаметров труб и условий прокладки приводятся в табл. 1.2, 1.3.

Таблица 1.2

Пролеты между подвижными опорами на бетонных подушках при канальной прокладке

Диаметр трубы, мм	32	40	50	70	80	100	125	150	175	200	250	300	350
Пролет, м	2	2,5	3	3	3,5	4	4,5	5	6	6	7	8	8

Таблица 1.3

Пролеты между подвижными опорами при надземной прокладке,
а также в тоннелях и техподпольях

Диаметр трубы, мм	32	40	50	70	80	100	125	150	175	200	250	300	350
Пролет, м	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	11	12	14

Горизонтальные нормативные осевые нагрузки на подвижные опоры от трения F_{hx}, Н, определяются по формуле:

$$F_{hx} = \mu_x \cdot G_h \cdot L \quad (1.2)$$

где μ_x - коэффициент трения в опорах, который для скользящих опор при трении стали о сталь принимают равным 0,3 (при использовании фторопластовых прокладок μ_x - 0,1), для катковых и шариковых опор μ_x - 0,1.

На неподвижные опоры в общем случае действуют вертикальные и горизонтальные усилия. Вертикальная нагрузка равна весу одного пролёта для подвижных опор и определяется по формуле (1.1).

Горизонтальные усилия складываются из неуравновешенных сил внутреннего давления, горизонтальных реакций свободных опор, реакций компенсаторов. Эти усилия, как правило, действуют с обеих сторон от опоры.

Результирующее усилие, действующее на опору, в общем случае может быть представлено в следующем виде:

$$N = a \cdot p \cdot F_B + \mu \cdot G_h \cdot \Delta l + \Delta R \quad (1.3)$$

где a – коэффициент, зависящий от возможного действия сил внутреннего давления (может принимать значения от 0 до 1); p – внутреннее давление теплоносителя, Па; F_B – площадь внутреннего сечения трубы, м²; μ - коэффициент трения на свободных опорах; G_h – вес погонного метра теплопровода; Δl – разность расстояний от опоры до компенсатора, м; ΔR – разность реакций компенсаторов с обеих сторон опоры.

В каждом случае при определении горизонтального усилия на опору, необходимо учитывать действующие на нее с обеих сторон силы.

Рассмотрим расчет компенсаторов. При разработке монтажной схемы выбирают типы компенсаторов и места их установки, причем по возможности предусматривают участки с естественной самокомпенсацией (углы поворотов от 90^0 до 130^0 , z – образные участки и др.).

При бесканальной прокладке участки естественной самокомпенсации необходимо размещать в каналах для обеспечения поперечных смещений трубопроводов. При определении теплового удлинения за расчетную температуру окружающей среды следует принимать температуру наружного воздуха для проектирования отопления t_0 , если устанавливают размеры гибких компенсаторов или определяют расчетные напряжения в компенсаторах. Тепловое удлинение расчетного участка трубопровода Δl определяют по формуле:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

где α - средний коэффициент линейного расширения стали, для типовых расчетов можно принять $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-2}$ мм/(м·К)

Устройства, компенсирующие температурные удлинения, называются компенсаторами и размещаются между неподвижными опорами.

Различают осевые и радиальные компенсаторы. К осевым относятся сальниковые и сильфонные компенсаторы. Сальниковый компенсатор состоит из подвижных относительно друг друга подвижных корпуса и стакана, привариваемых к соединяемым трубам, которые зафиксированы в неподвижных опорах. Утечка теплоносителя между корпусом и стаканом предотвращается с помощью сальниковой набивки из резины или пропитанного графитом асбестового шнура. Односторонние сальниковые компенсаторы устанавливаются на трубопроводах диаметром 100-1400 мм и имеют компенсирующую способность 250-600 мм. Двусторонние сальниковые компенсаторы имеют компенсирующую способность в диапазоне 2×250 мм и 2×500 мм. Гидравлическое сопротивление сальниковых компенсаторов невелико, однако они нуждаются в обслуживании, которое заключается в периодическом подтягивании сальниковых уплотнений и замене изношенной набивки. Существенным недостатком компенсаторов является в их заклинивании при просадке труб.

Сильфонные (или линзовые) компенсаторы состоят из наружной гофрированной стальной оболочки (линзы или сильфона) толщиной 2,5-4 мм и внутренней трубы, которая способствует уменьшению гидравлического сопротивления компенсатора. Как правило, сильфонные компенсаторы устанавливают на трубопроводах с рабочим давлением воды не более 0,5 МПа. При более высоких давлениях необходимо использовать большую толщину стенок сильфона, что повышает жесткость компенсатора. Компенсирующая способность таких компенсаторов невелика (меньше, чем сальниковых компенсаторов), но к их преимуществам относятся герметичность и они не требуют обслуживания.

Радиальная компенсация обеспечивается за счет применения специально изготовленных гибких участков. Форма гибких участков может быть различной. Существуют П-, S-, Ω -, лирообразные компенсаторы. Наиболее распространены П-образные компенсаторы. Расчет П-образных компенсаторов рассмотрен в примерах. При применении жестких сварных отводов расчет несколько упрощается. Для увеличения компенсирующей способности П-образных компенсаторов их устанавливают с предварительной растяжкой, которую учитывают при помощи коэффициента ε к расчетному тепловому удлинению компенсируемого участка. При определении теплового удлинения за расчетную температуру окружающей среды следует принимать температуру наружного воздуха для проектирования отопления t_0 , если устанавливают размеры гибких компенсаторов или определяют расчетные напряжения в компенсаторах. При проверочных расчетах компенсаторов максимальные напряжения не должны превышать допускаемые. Для предварительной оценки можно ориентироваться на усредненные допускаемые компенсационные напряжения при температуре теплоносителя $\tau = 150^\circ\text{C}$ и рабочем давлении теплопровода $p_p = 1,6$ МПа: для гибких компенсаторов $\sigma_{\text{доп}} = 110$ МПа; для участков самокомпенсации $\sigma_{\text{доп}} = 80$ МПа. Рассмотрим примеры механического расчета теплопроводов, а также П-образных, сальниковых и сильфонных компенсаторов.

1.2 Решение задач механического расчета теплопроводов

Задача 1.1. Определение усилий на неподвижную опору

Определить результирующее усилие на неподвижную опору А (рис.1.1) при закрытой и открытой задвижках. Теплопровод диаметром $D_{\text{н} \times s} = 325 \times 8$ мм. Рабочее давление теплоносителя $p_p = 1,6$ МПа. Силы трения в сальниковых компенсаторах 1 и 2 принимаются равными, а коэффициент трения подвижных опор $\mu = 0,3$.

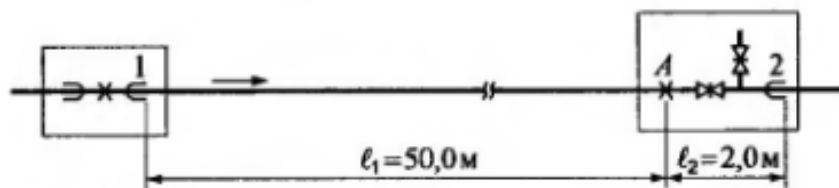


Рисунок 1.1. К задаче 1.1

Решение:

Равнодействующая сил, действующих на опору слева, складывается из неуравновешенной силы внутреннего давления (при закрытой задвижке), силы трения в сальниковом компенсаторе и силы трения в подвижных опорах на участке длиной $l_1 = 50$ м; равнодействующих сил, действующих на опору справа — из сил трения в сальниковом компенсаторе и подвижных опорах труб на участке длиной $l_2 = 2$ м.

По таблице 1.1 принимаем силу тяжести 1 м подающей трубы $G_h = 1670 \text{ Н/м}$.

Определим результирующее усилие на неподвижную опору при закрытой задвижке ($a=1$)

$$N = a \cdot P_p \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} + \mu \cdot G_h \cdot l_1 - 0,7 \cdot \mu \cdot G_h \cdot l_2 = 1 \cdot 1,6 \cdot 10^6 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,309^2}{4} + 0,3 \cdot 1670 \cdot 50 - 0,7 \cdot 0,3 \cdot 1670 \cdot 2 = 144273 \text{ Н}$$

$d_i = 325 - 2 \cdot 8 = 309 \text{ мм}$; d_i – внутренний диаметр трубы;

При открытой задвижке:

$a = 0$

$$N = \mu \cdot G_h \cdot l_1 - 0,7 \cdot \mu \cdot G_h \cdot l_2 = 0,3 \cdot 1670 \cdot 50 - 0,7 \cdot 0,3 \cdot 1670 \cdot 2 = 24389 \text{ Н}$$

Данные для самостоятельного решения выбираем из табл. 1.4.

Таблица 1.4

Исходные данные для задачи 1.1

Данные	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Параметр																			
$d_h \times s, \text{мм}$	38 × 2,5	108 × 4	175 × 5	219 × 6	273 × 7	377 × 6	377 × 10	426 × 9	426 × 6	480 × 7	529 × 7	529 × 8	630 × 7	630 × 8	720 × 7	920 × 9	720 × 8	820 × 8	159 × 4,5
$P_p, \text{МПа}$	1,1	1,5	1,3	1,2	1,4	1,5	1,6	1,3	1,1	1,2	1,2	1,4	1,4	1,5	1,3	1,4	1,5	1,1	1,1
$l_1, \text{м}$	25	35	45	50	55	60	26	38	42	39	44	53	29	31	41	56	47	36	50
$l_2, \text{м}$	2	1	2	3	6	1	2	7	6	2	1	4	3	6	5	2	3	4	6

Задача 1.2. Определение горизонтального и вертикального усилий на неподвижную опору.

Требуется найти горизонтальное осевое усилие $H_{го}$ на неподвижную опору В (рис. 1.2). Определить вертикальную нормативную нагрузку F_v на неподвижную опору. Трубопровод $d_h \times s = 159 \times 6 \text{ мм}$ проложен в техподполье. Вес одного погонного метра трубопровода с водой и изоляцией $G_h = 5,13 \text{ Н}$. Расстояние между подвижными опорами $L = 7$. Коэффициент трения в подвижных опорах $\mu = 0,4$. Реакция компенсатора $P_k = 7,85 \text{ кН}$. Сила упругой деформации угла поворота $P_x = 0,12 \text{ кН}$.

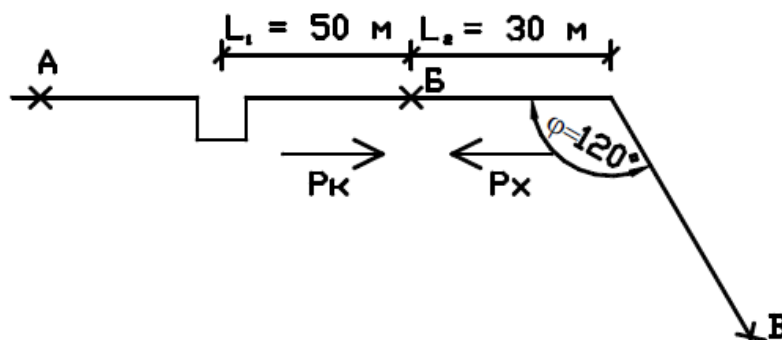


Рисунок 1.2. К задаче 1.2

Решение:

Расчёт горизонтальных усилий, действующих на опору В, для различных тепловых режимов работы трубопровода выполним по стандартным формулам:

$$H_{ГО} = P_K + \mu \cdot G_h \cdot L_1 - 0,7 \cdot \mu \cdot G_h \cdot L_2 = 7850 + 0,4 \cdot 513 \cdot 50 - 0,7 \cdot 0,4 \cdot 513 \cdot 30 = 13801 \text{ Н}$$

$$H_{ГО} = P_K + \mu \cdot G_h \cdot L_2 - 0,7 \cdot \mu \cdot G_h \cdot L_1 = 7850 + 0,4 \cdot 513 \cdot 30 - 0,7 \cdot 0,4 \cdot 513 \cdot 50 = 6824 \text{ Н}$$

$$H_{ГО} = P_X + \mu \cdot G_h \cdot L_2 - 0,7 \cdot (P_R + \mu \cdot G_h \cdot L_1) = 120 + 0,4 \cdot 513 \cdot 50 - 0,7 \cdot (7850 + 0,4 \cdot 513 \cdot 30) = 576 \text{ Н}$$

По условию прочности из рассчитанных нагрузок принимаем наибольшую. Тогда:

$$H_{ГО} = 13801 \text{ Н}; H_{ГО} = 13,891 \text{ кН.}$$

Вертикальная нормативная нагрузка на неподвижные опоры определяется по формуле, которая применяется и для расчета на неподвижные опоры.

$$F_V = G_h \cdot L \quad (1.5)$$

где G_h – вес одного метра трубопровода в рабочем состоянии, включающий вес трубы, теплоизоляционной конструкции и воды, Н/м. (определяется по табл. 1.1.; L – пролет между подвижными опорами, м. Пролеты между подвижными опорами в зависимости от диаметров труб и условий прокладки приведены в табл. 1.2 и 1.3.

Принимаем $G_h = 513 \text{ Н/м}$, $L = 7 \text{ м}$

Тогда вертикальная нагрузка будет:

$$F_V = 513 \cdot 7 = 3,591 \text{ кН}$$

Данные к задаче выбираем из таблицы вариантов 1.5. Диаметры труб для решения задачи оставляем из данных задачи 1.1.

Таблица 1.5

Варианты заданий к задаче 1.2

дан ные	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Па- ра- мет ры																				
L_1 , м	45	40	30	46	50	54	46	60	52	62	48	64	55	41	39	59	47	34	57	48
L_2 , м	32	29	33	27	35	28	31	34	30	29	27	33	32	31	29	30	34	33	26	28
P_K , кН	3,5	4,3	5,0	6,0	8,0	6,8	7,7	6,9	8,5	8,8	9,0	5,2	5,6	6,8	7,5	6,3	9,2	8,4	7,9	5,9
P_X , кН	Q1	Q15	Q12	Q14	Q13	Q11	Q15	Q13	Q14	Q13	Q1	Q14	Q11	Q13	Q12	Q15	Q14	Q12	Q13	Q11
Сп осо б про кла дки	Ка- нал ьны й	над зем ны й	То нн ель ь	тех под полье	ка- нал ьны й	Тех под полье	над зем ны й	То нн ель ь	Ка- нал ьны й	то нн ель ь	тех под полье	над зем ны й	ка- нал ьны й	над зем ны й	то нн ель ь	тех под полье	Ка- нал ьны й	тех под полье	над зем ны й	то нн ель ь

Задача 1.3. Определение изгибающего напряжения в трубопроводе у неподвижной опоры.

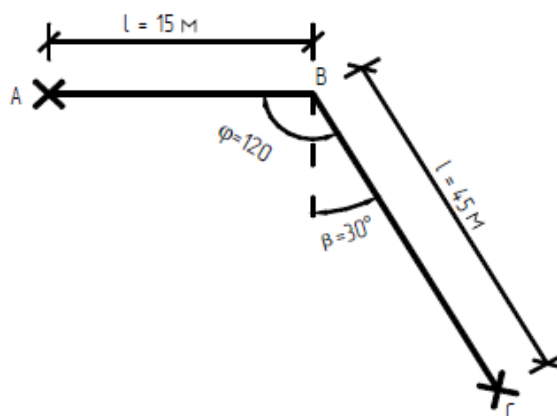


Рисунок 1.3 К задаче 1.3

Определить без учёта гибкости отвода изгибающее напряжение от термических деформаций в трубопроводе диаметром $d = 159$ мм у неподвижной опоры А (рис.1.3) при расчетной температуре теплоносителя $\tau = 150^\circ\text{C}$ и температуре окружающей среды $t_0 = -31^\circ\text{C}$. Модуль упругости стали $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент линейного расширения стали $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$. Допускаемое напряжение $[\sigma] = 80$ МПа.

Решение:

Определяем линейное удлинение Δl длинного плеча.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot (\tau - t_0) = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 45 \cdot (150 + 31) = 0,102 \text{ м}$$

Определим отношение длинного плеча к короткому

$$n = 45/15 = 3$$

тогда при $\beta = 30^\circ$ найдем изгибающее напряжение у опоры А:

$$\sigma = \frac{1,5 \cdot \Delta l \cdot E \cdot d}{l^2 \cdot \cos \beta} \cdot \left(n + 1 + \frac{n + 3}{n + 1} \cdot \sin \beta \right) = \frac{1,5 \cdot 0,102 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,159}{15^2 \cdot \cos 30} \cdot \left(3 + 1 + \frac{3 + 3}{3 + 1} \cdot \sin 30 \right) = 118,6 \text{ МПа}$$

Вывод: полученное напряжение превышает допускаемое значение 80 МПа. Следовательно, данный угол поворота не может быть использован для самокомпенсации.

Данные для решения задачи по вариантам приведены в табл.1.6.

Таблица 1.6

Варианты заданий к задаче 1.3

Варианты Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
d, мм	45	76	89	108	133	159	219	377	426	480	530	630	38	57	89	108	133	219	377
$\tau, ^\circ\text{C}$	130	150	140	132	148	127	142	136	115	124	138	111	142	150	131	140	119	121	131
$t_0, ^\circ\text{C}$	-35	-20	-44	-27	-36	-20	-41	-39	-50	-23	-47	-33	-42	-28	-33	-49	-44	-30	-36
$\varphi, ^\circ$	110	120	126	114	116	120	123	127	101	111	119	130	126	123	115	119	121	128	130
Длины плеч, м	12- -25	12- 36	10- 30	15- 40	10- 15	15- 30	15- 32	10- 26	11- 27	13- 45	12- 29	15- 42	14- 48	15- 48	11- 33	12- 39	14- 28	15- 37	13- 35

Задача 1.4. Определение изгибающего напряжения у неподвижной опоры при равенстве плеч. Решение провести по условиям задачи 1.3, когда длины плеч равны.

Определить изгибающее напряжение от термических деформаций у неподвижной опоры А по тем же исходным данным, но при условии равенства плеч. Определить также силу упругой деформации P_y .

Решение:

1. Определим длины плеч по условию равенства:

$$l_1 = \frac{15 + 45}{2} = 30 \text{ м}$$

2. Определим линейное удлинение плеча:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot (\tau - t_0) = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 30 \cdot (150 + 31) = 0,068 \text{ м}$$

3. При $\beta = 30^\circ$ и $n = 1$ находим напряжение у опоры А

$$\sigma = \frac{1,5 \cdot \Delta l \cdot E \cdot d}{l^2 \cdot \cos \beta} \cdot (n+1 + \frac{n+3}{n+1} \cdot \sin \beta) = \frac{1,5 \cdot 0,068 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,159}{30^2 \cdot 0,866} \cdot (1+1 + \frac{1+3}{1+1} \cdot 0,5) = 12,5 \text{ МПа}$$

Таким образом, полученное изгибающее напряжение не превышает допускаемого $[\sigma] = 80 \text{ МПа}$. Следовательно, данный угол поворота может быть использован для компенсации при условии равенства длин плеч.

4. Силу упругой деформации P_y определим по формуле

$$P_y = B \cdot \frac{\alpha \cdot F \cdot l \cdot \Delta t}{10^7 \cdot l^2} \quad (1.6)$$

где В – коэффициент, определяемый по номограмме или по формуле:

$$B = \frac{12 \cdot (1 + \sin \phi)}{\cos^2 \beta} = \frac{12 \cdot (1 + 0,5)}{0,866^2} = 24$$

Значение комплекса $\frac{\alpha \cdot F \cdot l}{10^7}$ определим по таблице 1.7.

Таблица 1.7

Вспомогательные величины при расчете труб без учета гибкости отвода

Наружный диаметр трубы D_n в см	Толщина стенки трубы s в мм	$\frac{\alpha E l}{10^7}$ в кгс/град
3,2	2,5	0,061
3,8	2,5	0,0106
4,5	2,5	0,0181
5,7	3,5	0,0506
7,6	3,5	0,126
8,9	3,5	0,206
10,8	4	0,425
13,3	4	0,809
15,9	4,5	1,56
19,4	5	3,18
21,9	6	5,47
27,3	7	12,4
32,5	8	24,0
	9	26,8
37,7	9	42,3
	10	46,6
42,6	10	67,9
	11	74,2

Из таблицы 1.7 находим, что при наружном диаметре трубы $d = 15,9$ см значение комплекса:

$$\frac{\alpha \cdot F \cdot l}{10^7} = 1,56 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}^2}{\text{град}}$$

Затем определим в уравнении (1) Δt -перепад температур
 $\Delta t = \tau - t_0 = 150 + 31 = 181^\circ\text{C}$

Тогда появляется возможность определить силу упругой деформации. При длине плеча $l = 30$ м сила упругой деформации составит:

$$P_y = 24 \cdot \frac{1,56 \cdot 181}{900} = 7,53 \text{ кгс} = 7,53 \text{ Н}$$

При самостоятельном решении данной задачи пользуемся данными из предыдущей задачи, т.е. данными таблицы 1.6.

Задача 1.5. Определение напряжения от термических деформаций в трубопроводе.

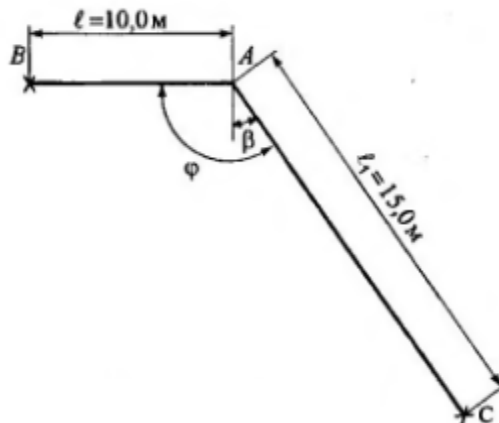


Рисунок 1.4 К задаче 1.5

Определить напряжение от термических деформаций в трубопроводе $d = 325$ мм у неподвижной опоры В (рис.1.5) при расчетной температуре теплоносителя $\tau = 150^\circ\text{C}$ и температуре окружающей среды при монтаже $t_c = 0^\circ\text{C}$. Модуль упругости стали $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент линейного удлинения принять равным $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$; допускаемые напряжения $[\sigma] = 80$ МПа.

Решение:

1. Определим удлинение плеча

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot (\tau - t_c)$$

где l – длинное плечо по схеме
 тогда

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot (150 - 0) = 0,027 \text{ м};$$

2. Находим напряжение у опоры В

$$\sigma_B = \frac{1,5 \cdot \Delta l \cdot E \cdot d}{l^2 \cdot \cos \beta} \cdot \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{n+3}{(n+1) \cdot n} \cdot \sin \beta\right)$$

Здесь l – короткое плечо, примыкающее к опоре В, $l = 10$ м; $\beta = 30^\circ$;
 $n = \frac{15}{10} = 1,5$

Тогда определим напряжение у опоры В:

$$\sigma_B = \frac{1,5 \cdot 0,027 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,325}{10^2 \cdot \cos 30} \cdot \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{1,5+3}{(1,5+1) \cdot 1,5} \cdot \sin 30\right) = 68,9 \text{ МПа} [\sigma] = 80 \text{ МПа}$$

Таким образом, расчетные напряжения ниже допускаемых. Условие прочности выполняется.

Таблица 1.8

Данные для решения задачи 1.5 определяем из таблицы вариантов 1.8

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Параметры																				
d, мм	13 3	32 5	42 6	57	76	52 9	82 0	72 0	21 9	13 3	27 3	45	19 4	72 0	48 0	38	76	89	21 9	37 7
l ₁ , м	11	15	12	14	16	20	13	17	19	18	15	11	14	14	13	15	10	20	17	19
l, м	20	30	21	29	26	25	24	31	32	22	24	27	23	29	30	22	25	32	25	28
τ, °C	13 0	14 0	15 0	13 1	14 1	15 0	13 2	14 2	15 0	12 5	12 9	13 4	11 9	12 0	12 2	14 8	13 7	15 0	11 7	12 5
t, °C	2	0	4	6	2	3	7	5	1	0	2	4	6	0	1	5	3	4	8	0

Задача 1.6. Определение напряжения от температурных удлинений при изменении угла поворота.

Для условий предыдущей задачи определить напряжение от температурных удлинений у неподвижной опоры В, если угол поворота $\varphi = 90^\circ$, угол $\beta = 0^\circ$

Решение:

1. Определим отношение длинного плеча к короткому:

$$n = \frac{15}{10} = 1,5$$

2. При $\beta = 0^\circ$ формула напряжений приобретает вид:

$$\sigma_B = \frac{1,5 \cdot \Delta l \cdot E \cdot d}{l^2} \cdot \left(1 + \frac{1}{n}\right) = \frac{1,5 \cdot 0,027 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,325}{10^2} \left(1 + \frac{1}{1,5}\right) = 43,9 \text{ МПа}$$

Расчетные напряжения меньше допускаемых, $[\sigma] = 80 \text{ МПа}$, условие прочности выполняется.

Задача 1.7. Определение размера П-образного компенсатора.

Определить размеры П-образного компенсатора и его реакцию для участка трубопровода с длиной пролёта между неподвижными опорами $L = 100$ м. Диаметр трубопровода $D_y = 150$ мм. Расчетная температура теплоносителя $\tau_1 = 150^\circ$. Расчетная температура наружного воздуха для проектирования систем отопления $t_0 = -31^\circ\text{C}$. Учесть при расчетах предварительную растяжку компенсатора. При подборе компенсатора использовать рис. 1.5, данные таблиц 1.9 и 1.10.

Решение:

1. Примем коэффициент температурных удлинений $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-2}$ мм/м $^\circ\text{C}$.

2. Тогда расчетное удлинение участка трубопровода:

$$\Delta l = \alpha \cdot L \cdot (\tau_1 - t_0) = 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot (150 + 31) = 217,2 \text{ мм.}$$

3. Принимаем к расчету $\Delta l = 218$ мм.

4. Расчетное удлинение Δl_p с учетом предварительной растяжки компенсатора составит:

$$\Delta l_p = 0,5 \cdot \Delta l = 0,5 \cdot 218 = 109 \text{ мм.}$$

5. По таблице 1.9, ориентируясь на $\Delta l_p = 109$ мм, принимаем компенсатор, имеющий компенсирующую способность $\Delta l_k = 120$ мм; вылет $H = 1,8$ м; спинку $c = 1,56$ м.

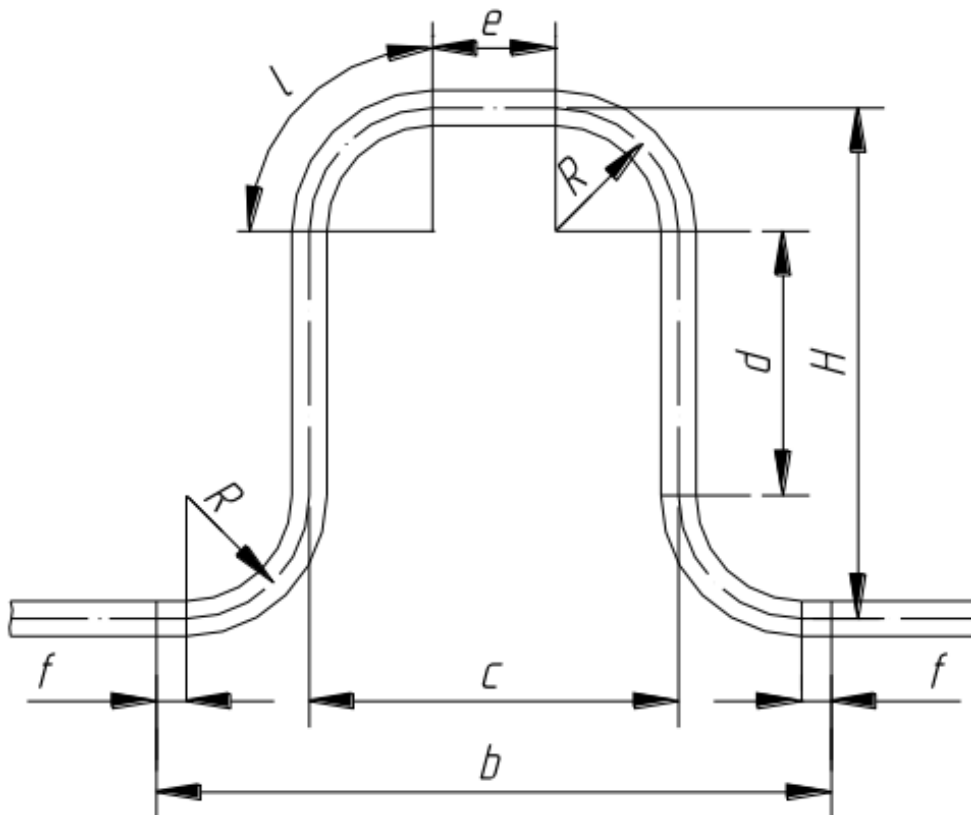


Рисунок 1.5. Схема П-образного компенсатора

Таблица 1.9

Типоразмеры П-образных компенсаторов

Диаметр		H, мм	b, мм	c, мм	d, мм	e, мм	f, мм	R, мм	l, мм	L, мм	Δl_k , мм
D_y мм	D_H мм										
30	51	0,6	1200	500	200	100	150	200	314	2,05	50
		0,8			400					2,45	70
		1,0			600					2,85	100
		1,2			800					3,25	120
100	108	1,2	2600	1100	300	200	300	450	707	4,28	100
		1,6			700					5,02	150
		2,0			1100					5,82	250
		2,4			1500					6,62	280
125	133	1,5	2970	1310	440	250	300	530	832	5,02	100
		2,0			940					6,05	180
		2,5			1410					7,05	260
		3,0			1940					8,05	310
150	159	1,8	3520	1560	510	300	350	630	989	6,03	120
		2,4			1140					7,23	220
		3,0			1740					8,43	280
		3,6			2340					9,63	350
200	219	2,4	4600	2100	700	400	400	850	1335	7,94	160
		3,2			1500					9,64	240
		4,0			2300					11,14	350
		4,8			3100					12,74	420
250	273	3,0	5500	2500	1000	500	500	1000	1571	9,78	200
		4,0			2000					11,78	310
		5,0			3000					13,78	400
		6,0			4000					15,78	600
300	325	3,6	6800	3100	1100	600	600	1250	1963	11,85	260
		4,8			2300					14,25	310
		6,0			3500					16,65	400
		7,2			4700					19,65	600
350	350	4,2	8100	3700	1200	700	700	1500	2355	13,92	320
		5,6			2600					16,72	470
		7,0			4000					19,52	640
400	427	4,8	9600	440	1200	800	800	1800	2827	16,40	300
		6,4			2800					19,30	410
		8,0			4400					22,52	600
500	529	6,0	11000	5000	2000	1000	1000	2000	3142	19,56	350
		8,0			4000					23,56	500
		10,0			6000					27,56	650

Примечание. L – выпрямленная длина компенсатора; l_k – компенсирующая способность компенсатора с учетом предварительной растяжки при монтаже на $\Delta l_k/2$.

6. По таблице 1.10 определим реакцию компенсатора.

Таблица 1.10

Осевые силы P_k , кН, для П-образных компенсаторов с гнутыми отводами при $\Delta l_k = 1$ см

Вылет компенсатора Н, м	Условный диаметр								Примечание
	80	100	150	200	250	300	400	500	
1,5	0,3	0,6	0,9	2,0	-	-	-	-	Приведенные в таблице значения величины P_k следует умножить на расчетную величину удлинения трубопровода Δl_k , см
2,0	0,18	0,3	0,6	1,8	3,0	-	-	-	
2,5	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	-	-	-	
3,0	0,08	0,12	0,25	0,6	1,2	3,0	3,0	-	
3,5		0,10	0,2	0,5	0,9	2,0	2,0	3,0	
4,0		0,08	0,15	0,3	0,7	1,0	1,8	2,2	
5,0		0,05	0,10	0,2	0,4	0,6	0,9	1,4	
6,0				0,12	0,25	0,4	0,6	0,9	
7,0				0,10	0,20	0,3	0,45	0,6	
8,0				0,08	0,15	0,2	0,35	0,5	
9,0				0,05	0,10	0,18	0,25	0,35	
10,0					0,08	0,12	0,2	0,30	

Из таблицы 1.10 можно определить, что при условном диаметре трубы 150 мм для вылета компенсатора $H = 1,5$ м осевая сила $P_k = 0,9$ кН, а для вылета $H=2,0$ м $P_k = 0,6$ м. Следовательно, для вылета компенсатора $H = 1,8$ м (согласно данным таблицы 1.9) осевую силу определяем интерполированием:

$$P_k = 0,9 + \frac{0,6 - 0,9}{5} \cdot 3 = 0,72 \text{ кН / см}$$

В соответствии с Примечаниями таблицы 1.10 появляется возможность определить осевую силу P при значении $P_k = 0,72$ кН/см и $\Delta l_p = 10,9$ см.

$$P = P_k \cdot \Delta l_p = 0,72 \cdot 10,9 = 7,85 \text{ кН}$$

Для самостоятельного решения принимаем данные таблицы 1.11.

Таблица 1.11

Данные для самостоятельного решения задачи 1.7

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Параметры															
Диаметр, D_y , мм	80	100	125	150	200	250	300	250	300	350	400	500	350	300	100
Длина участка, м	70	100	68	85	76	110	35	59	63	73	83	61	94	88	76
Температура сетевой воды, t_1 , мм	150	135	150	130	127	140	145	150	135	150	130	127	140	145	150
Температура для проектирования систем отопления, t_o , °С	-5	-8	-10	-24	-35	-40	-26	-33	-18	-43	-38	-29	-22	-15	-31

Задача 1.8. Определение расчетных усилий и напряжений для П-образного компенсатора.

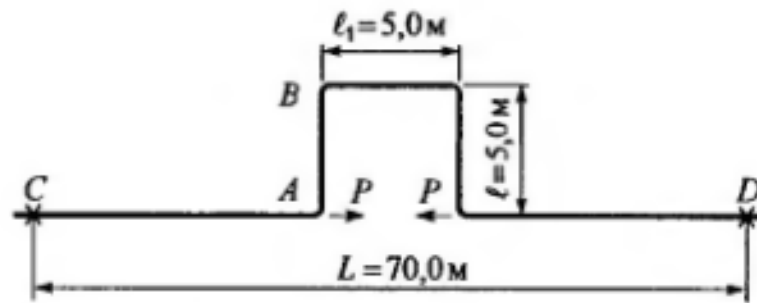


Рисунок 1.5. Схема П-образного компенсатора

Для П-образного компенсатора из трубы $d_n \times s = 325 \times 8$ мм с гнутыми отводами радиуса $R = 1$ м, вылетом $l = 5$ м (рис.1.7) определить расчетные усилия и напряжения, если температура теплоносителя $\tau = 130^\circ\text{C}$, а расчетная температура наружного воздуха для отопления $t_0 = -25^\circ$. Допускаемое компенсационное напряжение в трубопроводе $\sigma_{\text{доп}} = 110$ МПа.

Решение:

1. Примем коэффициент линейного термического расширения $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м/м}^\circ\text{C}$
2. Определим линейное удлинение компенсируемого участка теплопровода при температуре окружающей среды $t_0 = -25^\circ$.

$$\Delta l = \alpha \cdot L \cdot (\tau - t_0) = 12 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \cdot (130 + 25) = 0,13 \text{ м}$$

Приведем 1 методику расчета:

1. Находим средний радиус трубы

$$r_m = r_{CP} = \frac{d_n - \delta}{2} = \frac{325 - 8}{2} = 158,5 \text{ мм} = 0,159 \text{ м}$$

2. Находим h – геометрическую характеристику отвода:

$$h = \frac{\delta \cdot R}{r_m^2} = \frac{0,008 \cdot 1}{0,159^2} = 0,32$$

3. Определим коэффициент жесткости

$$K = \frac{h}{1,65}, \text{ если } h \leq 1$$

$$K = \frac{0,32}{1,65} = 0,19$$

4. Определим поправочный коэффициент напряжения

$$m = \frac{0,9}{h^{0,67}} = \frac{0,9}{0,32^{0,76}} = 1,93$$

5. Учитывая предварительное растяжение компенсатора:

$$\Delta l_p = \varepsilon \cdot \Delta l = 0,5 \cdot 0,13 = 0,065 \text{ м}$$

6. Определим центральный момент инерции сечения трубопровода

$$I = 0,05 \cdot (d_Y^{42} - d_{BH}^4) = 0,05 \cdot (0,325^4 - 0,309^4) = 10,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

7. Вычислим момент инерции компенсатора с учетом жесткости

$$\int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{K} = \frac{1}{K} \cdot (3,14 \cdot R \cdot l^2 - 2,28 \cdot R^2 \cdot l + 1,4 \cdot R^3) + 0,67 \cdot l^3 + l_1 \cdot l^2 - 4 \cdot R \cdot l^2 + 2 \cdot R^2 \cdot l - 1,33 \cdot R^3 =$$

$$= \frac{1}{0,19} \cdot (3,14 \cdot 1 \cdot 5^2 - 2,28 \cdot 1^2 \cdot 5 + 1,4 \cdot 1^3) + 0,67 \cdot 5^3 + 5 \cdot 5^2 - 4 \cdot 1 \cdot 5^2 + 2 \cdot 1^2 \cdot 5 - 1,33 \cdot 1^3 = 477,9 \quad \text{м}^3$$

8. Осевое усилие

$$P = \frac{\Delta l_p \cdot E \cdot J}{\int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{K}} = \frac{0,065 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 10,2 \cdot 10^{-5}}{477,9} = 2775 \text{ Н}$$

9. Максимальное напряжение в средней части спинки компенсатора
 $y = l = 5 \text{ м}$

$$\sigma_{\max} = \frac{\Delta l_p \cdot E \cdot d_y y \cdot m}{2 \cdot \int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{K}} = \frac{0,065 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 0,325 \cdot 5 \cdot 1,93}{2 \cdot 477,9} = 42,6 \cdot 10^6 \approx 43 \text{ МПа}$$

Так как максимальное расчетное напряжение не превышает допускаемое, то условие прочности выполняется.

Для самостоятельного решения данные выбираем из табл. 1.12.

Таблица 1.12

Исходные данные

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$d_{\text{ц}}, \text{мм}$	108	159	219	57	133	529	273	108	325	377	273	159	108	219	529	427	325	273	529	219
$L, \text{м}$	75	80	65	71	79	66	72	78	67	73	77	69	70	79	66	78	67	74	75	77
$\tau, ^\circ\text{C}$	133	127	115	145	119	111	150	142	134	129	118	135	140	117	123	142	138	114	122	134
$t_0, ^\circ\text{C}$	-22	-34	-23	-33	-24	-32	-25	-31	-26	-30	-36	-38	-34	-32	-30	-28	-29	-33	-39	-40
$l_1, \text{м}$	1,1	1,5	2,1	0,5	1,3	5,0	2,5	1,1	3,1	3,7	2,5	1,5	1,1	2,1	5,0	4,4	3,1	2,5	5,0	2,1
$l, \text{м}$	1,2	1,8	2,4	0,6	1,5	6,0	4,0	2,4	6,0	5,6	6,0	3,6	2,4	4,8	10,0	8,0	7,2	6,0	8,0	4,0
$R, \text{м}$	0,5	0,8	0,8	0,2	0,5	2,0	1,0	0,5	1,25	1,5	1,25	0,6	0,45	0,85	2,0	1,8	1,3	1,0	2,0	0,9

Задача 1.9. Определение расчетных усилий и напряжений для стандартного П-образного компенсатора табличным методом.

Рассмотрим методику расчета компенсатора с помощью таблиц 1.9 и 1.13.

Для решения данной задачи примем известные данные задачи 1.8.

Известно: размер трубопровода 325×8 мм, удлинение компенсируемого участка $\Delta l = 0,13 \text{ м}$; с учетом предварительной растяжки компенсатора $\Delta l_p = 0,065 \text{ м}$.

Тогда по таблице 1.9 определяем размеры стандартного компенсатора: $H = 3,6 \text{ м}$ – вылет; $c = 3,1 \text{ м}$ – спинка; радиус отвода $R = 1,25 \text{ м}$.

Таблица 1.13

Технические характеристики труб и отводов

Условный диаметр труб D_y , мм	Наружный диаметр труб, D_H , мм	Момент инерции I , см^4	Радиус гнутья гнутых отводов R , мм	Условный радиус сварных отводов R , мм	$h = \frac{\delta \cdot R}{r_{cp}^2}$		Коэффициент Кармана (жесткости) K	
					Для гнутых отводов $R=4D_y$, мм	Для сварных отводов $R=D_y$, мм	Для гнутых отводов	Для сварных отводов
50	57	18,6	230	-	0,95	-	0,57	-
100	108	177	430	150	0,64	0,18	0,39	0,15
125	133	377	530	175	0,51	0,17	0,31	0,15
150	159	652	640	200	0,48	0,15	0,29	0,13
200	219	2279	870	250	0,46	0,14	0,28	0,12
250	273	4484	1100	300	0,43	0,12	0,26	0,11
300	325	10000	1300	350	0,41	0,11	0,25	0,1
350	377	17600	1400	400	0,3	0,1	0,22	0,1
400	427	25625	1700	450	0,23	0,06	0,14	0,07
500	529	49720	2100	550	0,2	0,05	0,13	0,05

Далее по табл. 1.13 определяем стандартные параметры компенсатора:

1. Геометрическую характеристику отвода

$h = 0,41$ (для гнутых отводов)

2. Коэффициент жесткости (коэффициент Кармана)

$K = 0,25$ (для гнутых отводов)

3. Находим поправочный коэффициент напряжения

$$m = \frac{0,9}{h^{0,67}} = \frac{0,9}{0,41^{0,76}} = 1,64$$

4. По таблице 1.13 определяем центральный момент инерции сечения трубопровода

$$I = 10000 \text{ см}^4 = 10^{-4} \text{ м}^4$$

5. Вычисляем интеграл момента инерции сечения с учетом жесткости

$$\begin{aligned} \frac{y^2 \cdot ds}{K} &= \frac{1}{K} \cdot (3,14 \cdot R \cdot H^2 - 2,28 \cdot R \cdot H + 1,4 \cdot R^3) + 0,67 \cdot H^3 + c_1 \cdot H^2 - 4 \cdot R \cdot H^2 + 2 \cdot R^2 \cdot H - \\ \int_0^s -1,33 \cdot R^3 &= \frac{1}{0,25} (3,14 \cdot 1,25 \cdot 3,6^2 - 2,28 \cdot 1,25 \cdot 3,6 + 1,4 \cdot 1,25^3) + 0,67 \cdot 3,6^3 + 3,1 \cdot 3,6^2 - 4 \cdot 1,25 \cdot 3,6^2 \\ &+ 2 \cdot 1,625^2 \cdot 3,6 - 1,33 \cdot 1,25^2 = 188,7 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

6. Осевое усилие:

$$P = \frac{\Delta l_P \cdot E \cdot J}{\int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{rK}} = \frac{0,065 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-4}}{188,7} = 6889 \text{ Н}$$

7. Максимальное напряжение в средней части спинки компенсатора
 $y = H = 3,6 \text{ м}$

$$\sigma_{\max} = \frac{\Delta l_P \cdot E \cdot d_H \cdot y \cdot m}{2 \cdot \int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{K}} = \frac{0,065 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,325 \cdot 3,6 \cdot 1,64}{2 \cdot 188,7} = 66 \text{ МПа.}$$

Максимальные расчетные напряжения не превышают допускаемое $\sigma = [110]$ МПа. Следовательно, условие прочности выполняется. При этом максимальные напряжения численно больше, чем полученные по методике, представленной в задаче 8. Определим погрешность вычислений напряжений в средней части спинки компенсатора по 1(расчетной) и 2(табличной) методике:

Согласно 1 методике задачи 1.8: $\sigma_{\max} = 43$ МПа

По 2 методике задачи 1.9: $\sigma_{\max} = 66$ МПа

Погрешность вычислений максимальных напряжений по 2, упрощенной методике:

$$\delta = \frac{66 - 43}{43} \cdot 100\% = 53,5\%$$

Таким образом, для получения более точных значений напряжений необходимо применять расчетную методику. Для предварительных, прикидочных расчетов можно пользоваться 2 методикой с помощью стандартных таблиц.

Для самостоятельного решения проводим решение задачи 1.9, используя известные данные задачи 1.8: диаметр трубопровода и удлинение компенсируемого участка. Необходимые для решения данные из таблиц 1.9 и 1.13.

Задача 1.10. Определение осевого усилия и напряжения в П-образном компенсаторе при сварных отводах.

Для условий предыдущей задачи 8 определить усилие и напряжение в П-образном компенсаторе при сварных отводах.

Исходные данные:

Размеры сечения: $d_H \times s = 325 \times 8$ мм;

$l_1 = 5$ м; $l = 5$;

$[\sigma] = 110$ МПа

Решение:

1. При применении жестких сварных отводов $R = 0$; $m = 1$; $K = 1$.

2. Интеграл момента инерции определяется выражением:

$$\int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{K} = 0,67 \cdot l^3 + l_1 \cdot l^2 = 0,67 \cdot 5^3 + 5 \cdot 5^2 = 208,75 \approx 209 \text{ м}^3$$

3. Расчетное осевое усилие

$$P = \frac{\Delta l_p \cdot E \cdot J}{\int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{k}} = \frac{0,065 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10,2 \cdot 10^{-5}}{209} = 6345 \text{ Н}$$

4. Максимальные напряжения в средней части спинки компенсатора:

$$\sigma_{\max} = \frac{\Delta l_p \cdot E \cdot d_H \cdot y}{2 \cdot \int_0^s \frac{y^2 \cdot ds}{K}} = \frac{0,065 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,325 \cdot y}{2 \cdot 209} = 50,5 \approx 51 \text{ МПа}$$

Таким образом, при применении сварных отводов повышается жесткость компенсатора, а следовательно, осевое усилие и напряжения. Но условие прочности выполняется. Для самостоятельного решения принимаем данные из таблицы 1.12.

Задача 1.11. Пример расчета сальниковых компенсаторов

Для участка тепловой сети необходимо определить количество односторонних сальниковых компенсаторов, если диаметр трубопровода $d_H = 530$ мм, длина участка $L = 500$ м. Определить также реакцию компенсатора P_K при рабочем давлении $p_p = 1,5$ МПа. Расчетная температура теплоносителя $t_1 = 150^\circ\text{C}$, расчетная температура наружного воздуха $t_o = -31^\circ\text{C}$. Характеристики сальниковых компенсаторов приведены в таблице 1.14. Примем коэффициент линейного температурного удлинения:

$$\alpha = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ м / м} \cdot ^\circ\text{C}$$

Решение:

1. Определим удлинение участка трубопровода:

$$\Delta l = \alpha \cdot L \cdot (t_1 - t_o) = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 500 \cdot (150 + 31) = 1,131 \text{ м} = 1131 \text{ мм}$$

2. По таблице 1.14 определим:

- компенсирующую способность сальникового компенсатора $\Delta_K = 300$ мм;
- длину сальниковой набивки: $l_c = 130$ мм.

Таблица 1.14

Характеристики сальниковых компенсаторов

D_y , мм	D_H , мм	Длина сальниковой набивки, l_c , мм	Компенсирующая способность односторонних компенсаторов, мм	Компенсирующая способность двусторонних компенсаторов, мм
108	108	65	250	2×250
125	133	65		
150	159	75		
175	194	85		
200	219	120	200 и 400	2×200 2×400
250	273	120		
300	325	120		
350	377	120		
400	426	120	300 и 500	2×300 2×500
450	477	120		
500	530	130	300 и 500	2×300 2×500
600	630	130		
700	720	130		
800	820	130		
900	920	130	350 и 600	2×350 2×600
1000	1020	130		
1200	1220	150		
1400	1420	150		

3. Расчетная компенсирующая способность компенсатора составит:

$$\Delta_P = \Delta_K - 50 = 300 - 50 = 250 \text{ мм}$$

50 мм – запас, принимается для всех размеров компенсаторов.

4. Количество компенсаторов n на расчетном участке составит:

$$n = \frac{\Delta l}{\Delta_p} = \frac{1131}{250} = 4,52$$

Примем число компенсаторов $n = 5$.

5. Определим реакцию компенсатора R_K , приняв коэффициент салниковой набивки $\mu = 0,15$

$$P_K = 2 \cdot p_p \cdot l_c \cdot d_H \cdot \mu \cdot \pi = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 \cdot 0,130 \cdot 0,530 \cdot 0,15 \cdot 3,14 = 97,36 \text{ кН}$$

Для самостоятельного решения выбираем данные из таблицы 1.15 в соответствии с номером в списке группы.

Таблица 1.15

Параметры для самостоятельного решения

Параметр вариант	d_H , мм	L , м	p_p , МПа	τ , °C	t_o , °C	μ
1	57		1,50	150	-35	0,15
2	630		1,40	130	-37	0,11
3	76		1,30	140	-36	0,14
4	273		1,20	134	-34	0,12
5	108		1,15	144	-39	0,15
6	325		1,54	126	-33	0,16
7	89		1,24	146	-35	0,17
8	377		1,32	130	-42	0,11
9	630		1,15	120	-38	0,13
10	1220		1,22	123	-41	0,15
11	133		1,35	127	-31	0,14
12	720		1,45	133	-33	0,13
13	159		1,52	139	-31	0,11
14	1020		1,18	145	-26	0,14
15	219		1,21	140	-30	0,15
16	920		1,36	118	-34	0,11
17	89		1,43	124	-38	0,14
18	820		1,18	115	-27	0,12
19	426		1,27	126	-50	0,15
20	219		1,33	113	-28	0,16
20	720		1,42	123	-37	0,17
22	377		1,52	130	-30	0,11
23	76		1,48	138	-29	0,13
24	133		1,19	141	-33	0,15
25	89		1,50	150	-35	0,14

Задача 1.12. Пример расчета сильфонных (линзовых) компенсаторов

Определить количество сильфонных компенсаторов для участка тепловой сети $d_H = 219$ мм и длиной $L = 150$ м. Определить также реакцию компенсатора R_K при рабочем давлении $p_p = 1,5$ МПа. Расчетная температура теплоносителя $t_1 = 150^\circ\text{C}$, расчетная температура наружного воздуха $t_o = -31^\circ\text{C}$. Принять коэффициент температурного удлинения $\alpha = 1,25 \cdot 10^{-2} \text{ } 1/^\circ\text{C}$.

Решение:

1. По таблице 1.16 определяем данные:

-амплитуда осевого хода

$$\lambda = 80 \text{ мм}$$

-жесткость компенсатора

$$C_{\lambda} = 408 \text{ Н/мм}$$

-эффективная площадь

$$S_{\text{эф}} = 483 \text{ см}^2$$

-диаметр сильфона

$$D_c = 277 \text{ мм}$$

Таблица 1.16

Технические характеристики сильфонных компенсаторов СК-МК (СК.160.000.00 ТУ)

Диаметр трубы, d _т , мм	Амплитуда осевого хода, λ, мм	Жесткость компенсатора, C _λ , Н/мм	Эффективная площадь, S _{эф} , см ²	Масса, кг	Диаметр сильфона, D _с , мм
57×3,5	20	357	34	1,2	75
76×4	40	245	64	2,9	104
89×4	45	227	87	3,4	122
108×5	60	278	130	6,6	149
133×5	65	358	199	10,9	185
159×5	75	305	282	14	214
219×6	80	408	483	25	277
273×7	90	429	731	29	337
327×7	90	445	1001	39	389
377×7	90	428	1272	44	428
426×7	90	555	1573	73	469
530×8	90	608	2419	100	580
630×8	90	632	3416	118	689
720×8	90	593	4507	123	795
820×8	90	637	5822	166	902
920×10	90	577	8075	169	1008
1000×10	90	680	9017	210	1123
1220×12	90	740	12718	270	1325

2. По стандартной формуле определим максимальную длину участка, на которой может обеспечить компенсацию 1 сильфонный компенсатор:

$$L_m = \frac{0,9 \cdot 2\lambda}{\alpha \cdot (\tau_1 - t_o)} = \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 80}{1,25 \cdot 10^{-2} \cdot (150 + 31)} = 63,6 \text{ м}$$

3. Необходимое количество компенсаторов на расчетном участке составит:

$$n = \frac{L}{L_m} = \frac{150}{63,6} = 2,4$$

Примем n = 3

4. Примем одинаковые (фактические) пролеты между неподвижными опорами:

$$L_{\phi} = \frac{Ll}{n} = \frac{150}{3} = 50 \text{ м}$$

5. Определим фактическую амплитуду компенсатора λ_ϕ при длине фактической пролета:

$$\lambda_\phi = \frac{\alpha \cdot (\tau_1 - t_o) \cdot L_\phi}{0,9 \cdot 2} = \frac{1,25 \cdot 10^{-2} \cdot (150 + 31) \cdot 50}{1,8} = 62,5 \text{ мм}$$

Таким образом, сильфон может обеспечить амплитуду осевого хода.

6. Определим реакцию компенсатора по стандартной формуле, приняв одинаковые пролеты между неподвижными опорами $L_\phi = 50$ м.

$$R_{CK} = R_{Ж} + R_P$$

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

$$R_{Ж} = C_\lambda \cdot \lambda_\phi = 408 \cdot 62,5 = 25500 \text{ Н}$$

R_P – осевая реакция от внутреннего давления, определяется по формуле

$$R_P = \phi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_C^2 - d_H^2) \cdot p_p = 0,5 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot (0,277^2 - 0,219^2) \cdot 1,5 \cdot 10^6 = 16937 \text{ Н}$$

Тогда реакция компенсатора составит:

$$R_{CK} = R_{Ж} + R_P = 25500 + 16937 = 42437 \text{ Н.}$$

Для самостоятельного решения выбираем данные из таблицы 1.17. Выбор варианта производится в соответствии с номером в списке группы.

Таблица 1.17

Параметры для самостоятельного решения

Параметр вариант	d_H , мм	L , м	p_p , МПа	τ , °C	t_o , °C
1	57	150	1,50	150	-35
2	630	200	1,40	130	-37
3	76	250	1,30	140	-36
4	273	300	1,20	134	-34
56	108	350	1,15	147	-27
7	325	400	1,54	126	-39
8	89	230	1,24	146	-35
9	377	170	1,32	130	-40
10	630	280	1,15	120	-38
11	1220	330	1,22	123	-46
12	133	270	1,35	127	-31
13	720	160	1,45	133	-33
14	159	340	1,52	138	-31
15	1020	170	1,18	140	-26
16	219	210	1,21	144	-30
17	920	180	1,36	118	-30
18	89	220	1,43	124	-38
19	820	360	1,18	115	-27
20	426	330	1,27	126	-50
21	219	280	1,33	113	-28
22	720	190	1,42	123	-37
23	377	310	1,52	130	-30
24	76	260	1,48	138	-29
25	133	390	1,19	141	-33

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 1

1. Какие задачи относятся к механическому расчету?
2. Приведите уравнение определения тепловых удлинений теплопроводов.
3. Приведите численное значение коэффициента линейного термического удлинения?
4. Что применяют для компенсации тепловых удлинений?
5. В чем заключается явление самокомпенсации?
6. Какие существуют типы компенсаторов?
7. Приведите устройство сальниковых, сильфонных и П-образных компенсаторов.
8. Приведите преимущества и недостатки различных типов компенсаторов.
9. Приведите значения допускаемых компенсационных напряжений в гибких компенсаторах, а также на участках самокомпенсации.
10. Основное назначение компенсаторов.
11. Чему равна величина допускаемых напряжений, возникающих на опорах.
12. Какие компенсаторы относятся к радиальным?
13. Какие компенсаторы относятся к осевым?
- 14.. Где возникают наибольшие напряжения в П-образном компенсаторе?
15. Приведите величину допускаемых компенсационных напряжений, возникающих в спинке компенсатора.

2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

При тепловом расчете теплопроводов в системе теплоснабжения требуется определить:

1. толщину основного слоя изоляционной конструкции;
2. потери теплоты теплопроводами;
3. снижение температуры теплоносителя по длине трубопровода.

При тепловом расчете требуется: выбрать толщину основного слоя изоляционной конструкции, рассчитать потери теплоты теплопроводами, определить температуры теплоносителя по длине теплопровода и рассчитать температурное поле вокруг теплопровода.

Толщина основного слоя изоляционной конструкции выбирается на основе технико-экономического расчета или по нормам потерь теплоты.

Если задана конечная температура теплоносителя - в соответствии с перепадом температур.

Для трубопроводов, арматуры, оборудования и фланцевых соединений должна предусматриваться тепловая изоляция, обеспечивающая температуру на поверхности теплоизоляционной конструкции, расположенной в рабочей или обслуживаемой зоне помещения, для теплоносителей с температурой выше 100⁰С – не более 45⁰С, а с температурой ниже 100⁰С – не более 35⁰С (при температуре воздуха помещения 25⁰С).

Толщину основного слоя изоляционной конструкции допускается принимать по таблице 2.7.

Если расчетная толщина теплоизоляционного слоя не совпадает с номенклатурной, следует принимать более высокую ближайшую толщину теплоизоляционного материала.

Допускается принимать ближайшую более низкую толщину теплоизоляционного слоя в случае расчета по температуре на поверхности изоляции и нормам плотности теплового потока, если разница между расчетной и номенклатурной толщиной не превышает 3 мм. Толщина изоляционной конструкции может быть рассчитана исходя из норм потери теплоты по формуле (2.1).

Толщина основного слоя изоляционной конструкции определяется либо на основе технико-экономического расчета, либо по нормам потерь теплоты. Если задана конечная температура теплоносителя, то в соответствии с перепадом температур.

При расчете тепловых потерь или эффективности изоляционной конструкции толщину основного изоляционного слоя можно принимать по СНиПу «Тепловая изоляция оборудования и теплопроводов», либо определять по нормам потери теплоты:

$$\delta_{из} = \frac{e^{2\pi\lambda_{из}\sum R} - 1}{2} \cdot d_H \quad (2.1)$$

где $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности основного слоя изоляции, Вт/м К;
 ΣR – термическое сопротивление изоляционной конструкции, $м \cdot К / Вт$,
 в свою очередь определяется по формуле:

$$\Sigma R = \frac{\tau_{cp} - t_0}{q_H} \quad (2.2)$$

в которой τ_{cp} – среднегодовая расчетная температура теплоносителя, $^{\circ}C$;
 t_0 – расчетная температура окружающей среды, $^{\circ}C$; d_H – наружный диаметр теплопровода, м; q_H – норма потерь теплоты, Вт/м, принимается по таблице 2.1.

Таблица 2.1

Нормы плотности теплового потока, Вт/м, через изолированную поверхность трубопроводов двухтрубных водяных тепловых сетей при числе часов работы в год более 5000

Условный проходной диаметр труб, D, мм	Тип прокладки							
	Открытый воздух		Тоннель		Непроходной канал		Бесканальная	
	Средняя температура теплоносителя, °C							
	50	100	50	100	50	90	50	90
1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	13	25	10	22	10	23	9	20
32	14	27	10	24	11	24	10	20
40	15	29	12	26	12	25	11	22
50	17	31	13	28	13	28	12	24
65	19	36	15	32	15	34	13	29
80	21	39	16	35	16	36	14	31
100	24	43	18	39	17	41	15	35
125	27	49	21	44	18	42	16	38
150	30	54	24	49	19	44	17	42
200	37	65	29	59	22	54	19	49
250	43	75	34	68	25	64	21	54
300	49	84	39	77	28	70	24	60
350	55	93	44	85	30	75	26	64
400	61	102	48	93	33	82	28	70
450	65	109	52	101	36	93	31	79
500	71	119	57	109	38	98	32	84
600	82	136	67	125	41	109	35	93
700	92	151	74	139	43	126	37	107
800	103	167	84	155	45	140	38	119
900	113	184	93	170	54	151	43	128
1000	124	201	102	186	57	158	46	140

Примечания.

1. При расположении изолируемых поверхностей в тоннеле следует вводить коэффициент 0,85 к нормам плотности.

2. При применении в качестве теплоизоляционного слоя пенополиуретана, фенольного поропласта, полимербетона нормы плотности теплового потока, Вт/м, определяют с учетом коэффициента k_2 , значения которого приведены в таблице 2.2.

Методика теплового расчета изоляции при надземной прокладке, а также при канальной и бесканальной прокладках приведена в данном учебном пособии. Следует учитывать, что при выборе основного слоя теплоизоляционной конструкции необходимо руководствоваться следующими соображениями:

Для канальной и надземной способах прокладок теплопроводов принимают основной слой теплоизоляции с плотностью не более 400 кг/м^3 и теплопроводностью не более $0,07 \text{ Вт/(м К)}$.

Таблица 2.2

Значения коэффициента k_2

Материал теплоизоляционного слоя	Условный проходной диаметр труб, мм			
	25-65	80-150	200-300	350-500
Полимербетон	0,7	0,8	0,9	1,0
Пенополиуретан, фенольный поропласт	0,5	0,6	0,7	0,8

Если теплоизоляционная конструкция изготовлена из уплотняющихся материалов, то толщину теплоизоляционного слоя определяют с учетом коэффициента уплотнения K_c , значения которого приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Коэффициенты уплотнения K_c для различных уплотняющихся материалов и изделий

Теплоизоляционные материалы и изделия	Коэффициенты уплотнения K_c
Изделия минераловатные с гофрированной структурой при укладке на трубопроводы и оборудование условным проходом, мм:	
До 200	1,3
200-350	1,2
Свыше 350	1,1
Маты минераловатные прошивные	1,2
Маты из стеклянного штапельного волокна	1,6
Маты из супертонкого волокна, маты БЗМ, холсты из ультрасупертонких и стекломикросталлических волокон средней плотностью от $19 \text{ до } 56 \text{ кг/м}^3$ при укладке на трубопроводы и оборудование условным проходом, мм:	
$D_v < 800 \text{ мм}$ при средней плотности 19 кг/м^3	3,2
То же при средней плотности 56 кг/м^3	1,5
$D_v \geq 800 \text{ мм}$ при средней плотности 19 кг/м^3	2,0
То же при средней плотности 56 кг/м^3	1,5
Плиты минераловатные на синтетическом связующем марки:	
50,75	1,5
125,175	1,2
Плиты минераловатные на битумном связующем марки:	
75	1,5
100,150	1,2
Плиты полужесткие стекловолокнистые на синтетическом связующем	1,15
Пенопласт ПВХ-Э	1,2
Пенопласт ППУ-ЭТ	1,3

Примечание: промежуточные значения коэффициента уплотнения K_c следует определять интерполяцией.

При бесканальной прокладке коэффициент теплопроводности основного слоя теплоизоляционной конструкции λ_k , Вт/(м К), определяется уравнением:

$$\lambda_{из} = \lambda'_{из} \cdot \kappa, \quad (2.3)$$

где $\lambda'_{из}$ - Вт/м К, коэффициент теплопроводности сухого материала основного слоя, принимается по таблице 2.4; κ – коэффициент, учитывающий увеличение теплопроводности от влияния увлажнения, принимается по таблице 2.5

Таблица 2.4

Расчетные технические характеристики материалов, применяемых для теплоизоляции трубопроводов при бесканальной прокладке

Материал	Условный диаметр труб, мм	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность сухого материала $\lambda'_{из}$, Вт/(м К) при 20°C	Максимальная температура вещества, °C
Армопенобетон	150-800	350-450	0,105-0,13	150
Битумоперлит	50-400	450-550	0,11-0,13	130*
Битумокерамзит	До 500	600	0,13	130*
битумовермикулит	До 500	600	0,07	130*
Пенополимербетон	100-400	400	0,07	150
Пенополиуретан	100-400	60-80	0,05	120
Фенольный порпласт ФЛ монолитный	До 1000	100	0,05	150

Примечание: * - допускается применение до 150°C при качественном методе отпуска теплоты.

Таблица 2.5

Значения коэффициента увлажнения κ

Материал теплоизоляционного слоя	Тип грунта		
	маловлажный	влажный	Насыщенный водой
Армопенобетон	1,15	1,25	1,4
Битумоперлит	1,1	1,15	1,3
Битумокерамзит	1,1	1,15	1,3
битумовермикулит	1,1	1,15	1,25
Пенополимербетон	1,0	1,05	1,1
Пенополиуретан	1,05	1,1	1,15
Фенольный порпласт ФЛ монолитный	1,05	1,1	1,15

При определении толщины основного слоя изоляции по методике расчета потерь по нормам плотности теплового потока, а также при проведении расчета потерь теплоты трубопроводами, за расчетную температуру теплоносителя $t_{ср}$ в (2.2) принимают среднегодовую температуру воды. При этом среднегодовую температуру сетевой воды, в свою очередь, определяют по уравнению:

$$\tau_{cp} = \frac{\tau_{cp1} \cdot n_1 + \tau_{cp2} \cdot n_2 + \dots + \tau_{cp12} \cdot n_{12}}{\sum_{i=1}^{i=12} n_{ii}} \quad (2.4)$$

где $\tau_{cp1}, \tau_{cp2}, \dots, \tau_{cp12}$, - средняя температура теплоносителя по месяцам, определяется по графику центрального качественного регулирования в зависимости от среднемесячных температур воздуха; $\sum_{i=1}^{i=12} n_i$ - количество часов в году по месяцам.

Далее в уравнении (2.2) присутствует t_0 – расчетная температура окружающей среды, °С. За расчетную температуру окружающей среды t_0 принимают:

- в проходных каналах и в тоннелях $t_0 = 40$ °С;
- в помещениях 20°С;
- в неотапливаемых техподпольях 5 °С;
- при подземной прокладке - среднегодовая температура грунта, которая для большинства городов находится в пределах от +1 до +5 °С;
- при бесканальной прокладке, а также при прокладке в непроходных каналах в качестве температуры окружающей среды – среднегодовая температура грунта на глубине заложения оси трубопроводов;
- при надземной прокладке – среднегодовая температура окружающего воздуха.

В расчетах тепловой изоляции возникает необходимость определения коэффициента теплоотдачи α , Вт/(м²К). Для теплопроводов, которые проложены в каналах, а также от воздуха канала к стенке канала $\alpha = 8$ Вт/(м²К). Если теплопроводы проложены в техподпольях, закрытых помещениях и на открытом воздухе, то коэффициент теплоотдачи определяется с помощью таблицы 2.6.

Таблица 2.6

Значения коэффициентов теплоотдачи, α , Вт/(м К)

Изолированный объект	В закрытом помещении		На открытом воздухе при скорости ветра ³ , м/с		
	Покрытия с малым коэффициентом излучения ¹	Покрытия с высоким коэффициентом ²	5	10	15
Горизонтальные трубопроводы	7	10	20	26	35

Примечания:

¹ К ним относятся кожухи из оцинкованной стали, листов алюминиевых сплавов и алюминия с оксидной пленкой.

² К ним относятся штукатурки, асбоцементные покрытия, стеклопластики, различные окраски, кроме краски с алюминиевой пудрой.

³ При отсутствии сведений о скорости ветра принимают значения, соответствующие скорости 10 м/с.

Расчетную толщину теплоизоляционного слоя в конструкциях на основе волокнистых материалов и изделий (плит, холстов, матов) допускается округлять до значений, кратных 10 мм.

Если изоляционная конструкция состоит из минераловатных полуматриц, жестких ячеистых материалов, из вспененного синтетического каучука, пенополиэтилена и пенопластов, то следует принимать толщину слоя изоляции, ближайшую к расчетной толщине изделий по нормативным документам на соответствующие материалы.

Предельная толщина теплоизоляционного слоя в конструкциях тепловой изоляции оборудования и трубопроводов приведена в табл.2.7.

Таблица 2.7

Предельные толщины теплоизоляционных конструкций для оборудования и трубопроводов

Наружный диаметр, мм	Способ прокладки трубопроводов		
	надземный	в тоннеле	в непроходном канале
	Предельная толщина теплоизоляционного слоя, мм, при температуре, °С		
	20 и менее	20 и более	До 150 вкл.
32	140	100	80
45	140	100	80
57	150	120	90
76	160	140	90
89	170	160	100
108	180	160	100
133	200	160	100
159	220	160	120
219	230	180	120
273	230	200	120
325	240	200	120
377	240	200	120
426	250	220	140
476	250	220	140
530	260	220	140
630	280	240	140
720	280	240	140
820	300	240	140
920	300	260	140
1020 и более	320	260	140

Примечание. Если расчетная толщина изоляции больше предельной, следует принимать более эффективный теплоизоляционный материал и ограничиться предельной толщиной тепловой изоляции, если это допустимо по условиям технологического процесса.

Рассмотрим примеры тепловых расчетов теплоизоляционной конструкции.

2.1 Пример теплового расчета для бесканального способа прокладки теплопроводов. Определение эффективности тепловой изоляции

Определить эффективность тепловой изоляции из пенополиуретана для двухтрубной тепловой сети бесканальной прокладки. Диаметр теплопроводов $d_H = 426$ мм. Среднегодовая температура теплоносителя $\tau_{cp1} = 90^\circ\text{C}$, $\tau_{cp2} = 50^\circ\text{C}$. Глубина заложения оси трубопроводов $h = 1,2$ м. Тип грунтов – пески и супеси, плотностью 1600 кг/м^3 , влажность 24 % (влажные грунта), среднегодовая температура грунта на глубине заложения $t_0 = +3^\circ\text{C}$. Покровный слой теплоизоляции – бризол в 2 слоя, толщиной $\delta_{nc} = 8$ мм.

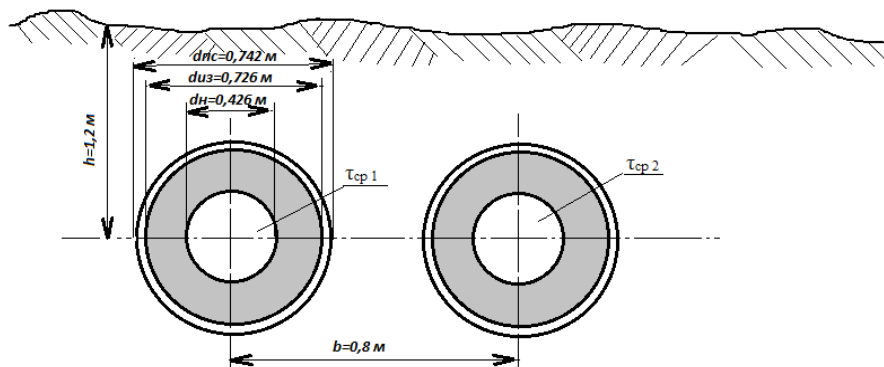


Рисунок 2.1 Схема прокладки двухтрубной теплотрассы при бесканальной прокладке

Решение:

1. Примем толщину слоя изоляции $\delta_{из} = 0,15$ м. Тогда наружный диаметр слоя изоляции:

$$d_{из} = d_H + 2 \cdot \delta_{из} = 0,426 + 2 \cdot 0,15 = 0,726 \text{ м}$$

2. Диаметр трубопровода с изоляционным и покровным слоем:

$$d_{нс} = d_{из} + 2 \cdot \delta_{нс} = 0,726 + 2 \cdot 0,008 = 0,742 \text{ м}$$

3. Примем по табл.2.4 коэффициент теплопроводности пенополиуретана $\lambda'_{из} = 0,05 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. С учетом коэффициента увлажнения $\kappa = 1,05$ (табл.2.5), коэффициент теплопроводности пенополиуретана будет равен:

$$\lambda_{bp} = \lambda'_{из} \cdot \kappa = 0,05 \cdot 1,05 = 0,053 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

4. Определим термическое сопротивление слоя изоляции.

$$R_{из} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_{из}}{d_H} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,053} \cdot \ln \frac{0,726}{0,426} = 1,602 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

5. Определим термическое сопротивление покровного слоя.

Примем коэффициент теплопроводности бризола $\lambda_{nc} = 0,175 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$, тогда

$$R_{nc} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{nc}} \cdot \ln \frac{d_{nc}}{d_{из}} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,175} \cdot \ln \frac{0,742}{0,726} = 0,0198 \approx 0,020 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

6. Т.к. отношение $h/d_H = 1,2/0,426 = 2,8 > 2$, то термическое сопротивление грунта определяем по выражению:

$$R_{ep} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ep}} \cdot \ln \frac{4h}{d_{ПС}}, \text{ где } \lambda_{гр} - \text{коэффициент теплопроводности грунта,}$$

определяется по таблице 2.8.

Таблица 2.8

Теплопроводность грунтов различной структуры и влажности

Характеристика грунтов				Теплопроводность влажных грунтов $\lambda_{вл}$					
Плотность сухого грунта $\rho_{сух}$, кг/м ³				при массовой влажности W_m , %					
Пористость, Р				W_m , %		$\lambda_{вл}$		W_m , %	
Теплопроводность сухого грунта, $\lambda_{сух}$, Вт/(м К)				$\lambda_{вл}$		W_m , %		$\lambda_{вл}$	
Пески и супеси	1200	0,54	0,20	12	0,94	24	1,31	36	1,55
	1600	0,38	0,31	16	1,24	32	1,76	48	2,15
	2000	0,23	0,56	20	2,03	40	3,08	-	-
	1600	-	-	8	1,10	22	1,92	38	2,44
	2000	-	-	10	2,03	23	3,31	-	-
Песок для строительных работ	1600	-	0,35	2	0,58	-	-	-	-
Глины и суглинки	800	0,68	0,12	8	0,45	16	0,64	24	0,74
	1200	0,54	0,20	12	0,62	24	0,86	36	1,00
	1600	0,38	0,33	16	0,96	32	1,33	48	1,63
	2000	0,23	0,58	20	2,00	40	2,60	-	-
	1600	-	-	8	0,87	32	1,74	38	1,86
	2000	-	-	10	1,74	20	2,56	23	2,67
Гравий, щебень, дресва	2000	-	-	10	2,03	16	2,73	23	3,37
Известняк	1400	-	0,49	3	0,58	-	-	-	-
	1600	-	0,58	3	0,81	-	-	-	-
	1800	-	0,70	3	1,05	-	-	-	-
	2000	-	0,93	3	1,28	-	-	-	-
Мрамор	2800	-	2,91	-	-	-	-	-	-
Гранит, гнейс, базальт	2800	-	3,49	-	-	-	-	-	-

Из табл. 2.8 коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{гр} = 1,76$ Вт/(м К).

Вычислим термическое сопротивление грунта:

$$R_{ep} = \frac{1}{6,28 \cdot 1,76} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,2}{0,742} = 0,169 \frac{м \cdot К}{Вт}$$

7. Термическое сопротивление каждого теплопровода.

$$R_1 = R_2 = R_{ИЗ} + R_{GC} + R_{ГР} = 1,602 + 0,020 + 0,169 = 1,791 \frac{м \cdot К}{Вт}$$

8. Термическое сопротивление, учитывающее взаимное влияние тепловых потоков теплопроводов, определим выражением:

$$R_{1,2} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{\Gamma p}} \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2h}{b}\right)^2 + 1}, \text{ где } b - \text{расстояние между осями трубопроводов, принимается по табл.2.9 в зависимости от диаметра условного прохода труб.}$$

Таблица 2.9

Расстояние между осями трубопроводов

Расстояние	Диаметр условного прохода труб, мм										
	50-80	100	125-150	200	250	300	350	400	450	500	600
b, мм	350	400	500	550	600	650	700	800	900	1000	1300

Из табл. 2.9 принимаем $b = 0,8$ м. Тогда можно определить термическое сопротивление:

$$R_{1,2} = \frac{1}{6,28 \cdot 1,76} \cdot \ln \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 1,2}{0,8}\right)^2 + 1} = 0,208 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

9. Определим удельные потери тепла прямым и обратным теплопроводами по формулам:

$$q_1 = \frac{\Delta \tau_1 \cdot R_2 - \Delta \tau_2 \cdot R_{1,2}}{R_1 \cdot R_2 - R_{1,2}^2}$$

$$q_2 = \frac{\Delta \tau_2 \cdot R_1 - \Delta \tau_1 \cdot R_{1,2}}{R_1 \cdot R_2 - R_{1,2}^2}$$

Находим разности температур сетевой воды и грунта для прямого и обратного трубопроводов:

$$\Delta \tau_1 = \tau_{CP1} - t_o = 90 - 3 = 87^\circ \text{C}$$

$$\Delta \tau_2 = \tau_{CP2} - t_o = 50 - 3 = 47^\circ \text{C}$$

Тогда удельные потери тепла будут соответственно равны:

$$q_1 = \frac{87 \cdot 1,791 - 47 \cdot 0,208}{1,791^2 - 0,208^2} = 46,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$q_2 = \frac{47 \cdot 1,791 - 87 \cdot 0,208}{1,791^2 - 0,208^2} = 20,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

10. Суммарные удельные тепловые потери обоими теплопроводами:

$$q_{из} = q_1 + q_2 = 46,2 + 20,9 = 67,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Далее по таблице 2.1 определим нормируемые плотности тепловых потоков:

$$q_1'_{норм} = 70 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

$$q_2'_{норм} = 28 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Тогда определим нормы плотности тепловых потоков с учетом коэффициента k_2 по табл.2.2

$$q_1^{норм} = k_2 \cdot q_1'_{норм} = 0,8 \cdot 70 = 56 \frac{Вт}{м}$$

$$q_2 = k_2 \cdot q_2'_{норм} = 0,8 \cdot 28 = 22,4 \frac{Вт}{м}$$

11. Затем рассчитаем теплотери трубопроводами при условии отсутствия тепловой изоляции.

Для этого определим термическое сопротивление грунта при прокладке неизолированных теплопроводов:

$$R_{гп} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{гп}} \cdot \ln \frac{2h}{d_H} = \frac{1}{6,28 \cdot 1,76} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,2}{0,426} = 0,219 \frac{м \cdot К}{Вт}$$

Тогда термическое сопротивление каждого теплопровода при условии отсутствия изоляции будет равно термическому сопротивлению грунта.

$$\text{Следовательно, } R_1^{НЕИЗ} = R_2^{НЕИЗ} = R_{гп} = 0,219 \frac{м \cdot К}{Вт}.$$

12. Определим теплотери неизолированных прямого и обратного теплопроводов.

$$q_1^{НЕИЗ} = \frac{\Delta \tau_1 \cdot R_2 - \Delta \tau_2 \cdot R_{1;2}}{R_1 \cdot R_2 - R_{1;2}^2} = \frac{87 \cdot 0,219 - 47 \cdot 0,208}{0,219^2 - 0,208^2} = 1975 \frac{Вт}{м}$$

$$q_2^{НЕИЗ} = \frac{\Delta \tau_2 \cdot R_1 - \Delta \tau_1 \cdot R_{1;2}}{R_1 \cdot R_2 - R_{1;2}^2} = \frac{47 \cdot 0,219 - 87 \cdot 0,208}{0,219^2 - 0,208^2} = -1661 \frac{Вт}{м}$$

Знак «-» означает, что при отсутствии изоляции возникает обратный тепловой поток от грунта в обратный теплопровод.

13. Суммарные потери тепла.

В данном примере суммарные потери тепла неизолированными теплопроводами будут равны потерям тепла подающего (прямого) теплопровода.

$$q^{НЕИЗ} = q_1^{НЕИЗ} = 1975 \frac{Вт}{м}$$

14.Эффективность тепловой изоляции.

$$\eta = \frac{q^{НЕИЗ} - q^{ИЗ}}{q^{НЕИЗ}} = \frac{1975 - 67,1}{1975} = 0,97$$

Задача 2.1. Определить эффективность тепловой изоляции для двухтрубной тепловой сети бесканальной прокладки

(для самостоятельного решения задачи 2.1 по примеру 2.1)

Решить задачу по определению эффективности тепловой изоляции. Самостоятельно принять изоляционный материал по данным табл.2.4. Для решения принимаем данные из таблицы 2.10. Таблица составлена по вариантам. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы.

Таблица 2.10

Варианты значений для решения задачи

Параметр	Диаметр тепло- проводов d_H , мм	Среднегодовая температура теплоносителя		Глубина заложения оси теплопроводов h , м	Грунты	Среднегодовая температура грунта t_0 , °C	Толщина покровного слоя, $\delta_{пс}$, мм
		$t_{ср 1}$, °C	$t_{ср 2}$, °C				
1	89	90	50	1,0	Пески и супеси, маловлажные	+1	5
2	113	90	50	1,1	Мрамор	+4	6
3	89	90	50	1,2	Гнейс	+3	7
4	159	90	50	1,3	Песок для строительных работ	+1	8
5	133	90	50	1,6	Щебень	+5	5
6	219	90	50	1,1	Глины и суглинки, маловлажные	+2	6
7	194	90	50	1,4	Гравий	+1	7
8	325	90	50	1,6	Известняк	+4	8
9	273	90	50	1,0	Пески и супеси, влажные	+3	5
10	377	90	50	0,9	Известняк	+1	6
11	480	90	50	1,0	Глины и суглинки, влажные	+5	7
12	426	90	50	1,1	Пески и супеси, насыщенные	+2	8
13	529	90	50	1,2	Мрамор	+1	5
14	480	90	50	1,3	Гнейс	+4	6
15	630	90	50	1,6	Песок для строительных работ	+3	7
16	820	90	50	1,1	Щебень	+1	8
17	720	90	50	1,4	Глины и суглинки, насыщенные	+5	5
18	920	90	50	1,6	Гравий	+2	6
19	1020	90	50	1,0	Известняк	+1	7
20	325	90	50	0,9	Пески и супеси, влажные	+4	8
21	273	90	50	1,0	Известняк	+3	5
22	159	90	50	1,1	Глины и суглинки, влажные	+1	6
23	45	90	50	1,2	Пески и супеси, маловлажные	+5	7
24	89	90	50	1,3	Мрамор	+2	8
25	76	90	50	1,6	Гнейс	+1	5

2.2 Пример теплового расчета для бесканального способа прокладки теплопроводов. Определение толщины слоя изоляции

По нормируемой плотности теплового потока определить толщину слоя изоляции из фенольного поропласта ФЛ для двухтрубной прокладки теплопроводов диаметрами $d_H = 219$ мм при бесканальной прокладке в маловлажных грунтах. Тип грунта – суглинки, плотностью 1200 кг/м^3 при массовой влажности 12%. Среднегодовая температура грунта на глубине заложения оси теплопровода $t_0 = +3^\circ\text{C}$. Глубина заложения оси теплопровода $h = 1,1$ м. Покровный слой из бризола в 2 слоя толщиной $\delta_{nc} = 6$ мм.

Решение:

1. Примем предварительно толщину слоя изоляции на подающем теплопроводе $\delta_{из1} = 0,04$ м и обратном $\delta_{из2} = 0,03$ м.

Тогда определим наружные диаметры подающего и обратного теплопроводов $d_{ни1}$ и $d_{ни2}$ с учетом толщины слоя изоляции и покровного слоя.

$$d_{ни1} = d_H + 2 \cdot \delta_{из1} + 2 \cdot \delta_{nc} = 0,219 + 2 \cdot 0,04 + 2 \cdot 0,006 = 0,311 \text{ м}$$

$$d_{ни2} = d_H + 2 \cdot \delta_{из2} + 2 \cdot \delta_{nc} = 0,219 + 2 \cdot 0,003 + 2 \cdot 0,006 = 0,291 \text{ м}$$

2. Термическое сопротивление грунта для подающего и обратного теплопроводов $R_{гр1}$ и $R_{гр2}$ определяем по уравнениям:

$$R_{гр1} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{гр}} \cdot \ln \left[\frac{2h}{d_{ни1}} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_{ни1}^2} - 1} \right]$$

$$R_{гр2} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{гр}} \ln \left[\frac{2h}{d_{ни2}} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_{ни2}^2} - 1} \right]$$

Коэффициент теплопроводности грунта определяем по табл. 9.8. Из табл. 9.8 $\lambda_{гр} = 0,62 \text{ Вт/(м К)}$.

Тогда определим термические сопротивления грунта:

$$R_{гр1} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,62} \ln \left[\frac{2 \cdot 1,1}{0,311} + \sqrt{\frac{4 \cdot 1,1^2}{0,311^2} - 1} \right] = 0,679 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{гр2} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,62} \ln \left[\frac{2 \cdot 1,1}{0,291} + \sqrt{\frac{4 \cdot 1,1^2}{0,291^2} - 1} \right] = 0,696 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

3. Определим нормируемые плотности теплового потока q_1 и q_2 для прямого и обратного теплопроводов.

Из табл. 2.1 определяем величины нормируемой плотности теплового потока.

$$q_1 = 49 \text{ Вт/м}^2$$

$$q_2 = 19 \text{ Вт/м}^2$$

4. Определим коэффициенты взаимного влияния температурных полей ψ_1 и ψ_2 .

Для прямого и обратного теплопроводов соответственно:

$$\psi_1 = \frac{q_2}{q_1} = \frac{19}{49} = 0,388$$

$$\psi_2 = \frac{q_1}{q_2} = \frac{49}{19} = 2,579$$

5. Определим добавочные термосопротивления, учитывающие взаимное влияние теплопроводов R_{o1} и R_{o2} , соответственно для прямого и обратного теплопроводов.

$$R_{o1} = \psi_1 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{\Gamma p}} \cdot \ln \sqrt{\frac{4h^2}{b^2} + 1}$$

$$R_{o2} = \psi_2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{\Gamma p}} \cdot \ln \sqrt{\frac{4h^2}{b^2} + 1}$$

Здесь b – расстояние между осями теплопроводов, определяется по табл.2.9.

По данным табл. 2.9 $b = 0,5$ м.

Тогда вычислим добавочные термические сопротивления, учитывающие взаимное влияние теплопроводов:

$$R_{o1} = 0,388 \cdot \frac{1}{6,28 \cdot 0,62} \cdot \ln \sqrt{\frac{4 \cdot 1,1^2}{0,5^2} + 1} = 0,150 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

$$R_{o2} = 2,579 \cdot \frac{1}{6,28 \cdot 0,62} \cdot \ln \sqrt{\frac{4 \cdot 1,1^2}{0,5^2} + 1} = 0,998 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

6. Определим суммарные термические сопротивления для прямого и обратного трубопроводов по выражениям:

$$R_{\Sigma 1} = \frac{(\tau_1 - t_o)}{q_1 \cdot K_1}$$

$$R_{\Sigma 2} = \frac{(\tau_2 - t_o)}{q_2 \cdot K_2}$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий изменение стоимости теплоты в зависимости от района строительства и способа прокладки трубопровода. Определяется по таблице.2.11.

Таблица 2.11

Коэффициент K_1 , учитывающий изменение стоимости теплоты в зависимости от района строительства и способа прокладки трубопровода (места установки оборудования)

Район строительства	Способ прокладки трубопроводов и месторасположение оборудования			
	На открытом воздухе	в помещении, в тоннель	в непроходном канале	бесканальный
Европейские районы	1,0	1,0	1,0	1,0
Урал	0,98	0,98	0,95	0,94
Западная Сибирь	0,98	0,98	0,95	0,94
Восточная Сибирь	0,98	0,98	0,95	0,94
Дальний Восток	0,96	0,96	0,92	0,9
Районы Крайнего Севера и приравненные к ним	0,96	0,96	0,92	0,9

Из табл.2.11 определяем, что значение коэффициента $K_1 = 0,94$.

Тогда вычислим суммарные термические сопротивления:

$$R_{\Sigma 1} = \frac{(90 - 5)}{49 \cdot 0,94} = 1,845 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

$$R_{\Sigma 2} = \frac{(50 - 5)}{19 \cdot 0,94} = 2,520 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

7. Определим R_1 и R_2 - требуемые термические сопротивления слоёв изоляции.

$$R_1 = R_{\Sigma 1} - R_{\Gamma p1} - R_{O1} = 1,845 - 0,679 - 0,150 = 0,869 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

$$R_2 = R_{\Sigma 2} - R_{\Gamma p2} - R_{O2} = 2,520 - 0,696 - 0,998 = 0,826 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

8. Определим толщину слоя изоляции для прямого и обратного теплопроводов.

$$\delta_{из1} = \frac{d_H \cdot (e^{2\pi \cdot \lambda_{из} \cdot R_1} - 1)}{2}$$

$$\delta_{из2} = \frac{d_H \cdot (e^{2\pi \cdot \lambda_{из} \cdot R_2} - 1)}{2}$$

Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{из}$ определим из табл. 2.4 и табл. 2.5.

Из табл.2.4 для фенольного поропласта коэффициент теплопроводности сухого материала $\lambda'_{из} = 0,05$ Вт/(м К); из табл. 2.5 определяем коэффициент увлажнения $\kappa = 1,05$.

Тогда для фенольного поропласта коэффициент теплопроводности определим по (8.3):

$$\lambda_{из} = \lambda'_{из} \cdot \kappa = 0,05 \cdot 1,05 = 0,0525 \frac{Вт}{м \cdot K}$$

Вычислим толщину слоя изоляции для прямого и обратного трубопроводов:

$$\delta_{из1} = \frac{0,219 \cdot (e^{6,28 \cdot 0,0525 \cdot 0,869} - 1)}{2} = 0,036 м$$

$$\delta_{из2} = \frac{0,219 \cdot (e^{6,28 \cdot 0,0525 \cdot 0,826} - 1)}{2} = 0,034 м$$

Таким образом, принимаем толщину слоя изоляции одинаковой для прямого и обратного теплопроводов и равной $\delta_{из1} = \delta_{из2} = 0,04$ и или 40 мм.

Задача 2.2. Определить толщину слоя изоляции для бесканального способа прокладки теплопроводов

(для самостоятельного решения задачи 2.2 по примеру 2.2)

Для самостоятельного решения задачи на определение толщины слоя изоляции при бесканальной прокладке принимаем данные из табл. 2.12

Выбор варианта задания соответствует номеру студента в списке группы.

Изоляционный материал принять самостоятельно по данным табл. 2.4.

Таблица 2.12

Варианты значений для решения задачи

Параметры					
Вариант	Диаметр трубопровода, d_n , мм	Тип грунта	Среднегодовая температура грунта на глубине заложения оси трубопровода, t_0 , °C	Глубина заложения оси трубопровода, h , м	Толщина покровного слоя из бризола, $\delta_{пс}$, мм
1	219	Пески и супеси, влажные	+1	1,1	8
2	325	Глины и суглинки, маловлажные	+5	1,2	5
3	133	Известняк	+2	1,6	7
4	194	Щебень	+4	1,4	6
5	89	Гравий	+3	1,3	8
6	109	Гнейс		1,0	7
7	159	Пески и супеси	+1	1,2	6
8	377	Глины влажные	+5	1,1	5
9	920	Суглинки влажные	+2	1,4	8
10	1000	Супеси маловлажные	+4	1,5	5
11	426	Пески насыщенные	+3	1,1	7
12	529	Известняк		1,2	6
13	480	Гравий	+1	1,6	8
14	273	Щебень	+5	1,4	7
15	820	Гнейс	+2	1,3	6
16	630	базальт	+4	1,0	5
17	720	Гравий	+3	1,2	8
18	89	Гнейс		1,1	5
19	109	Пески и супеси насыщенные	+1	1,4	7
20	159	Глины насыщенные	+5	1,5	6
21	377	Суглинки маловлажные	+2	1,1	8
22	920	Супеси влажные	+4	1,2	7
23	1000	Пески маловлажные	+3	1,6	6
24	426	Гравий	+2	1,4	5
25	529	Гнейс	+1	1,3	8

2.3 Пример определения эффективности тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах

Определить эффективность тепловой изоляции 2-х трубной тепловой сети с диаметром теплопроводов $d_n = 426$ мм, проложенных в каналах КЛс 210×120. Среднегодовая температура сетевой воды в подающем трубопроводе $t_{ср1} = 86^{\circ}\text{C}$; в обратном $t_{ср2} = 46^{\circ}\text{C}$. Глубина заложения оси теплопроводов $h = 1,2$ м.

Грунты – суглинки, плотностью 1200 кг/м^3 при массовой влажности 12 %. Температура грунта $t_0 = 3^{\circ}\text{C}$. Изоляция – маты из стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем МС-50, толщиной $\delta_{из}=0,1$ м (с учетом уплотнения), покровный слой из бризола в два слоя; $\delta_{п.с.}= 0,008$ м.

Решение:

1. Из таблицы 2.13 приводим уравнение коэффициента теплопроводности основного слоя изоляции:

$$\lambda = 0,042 + 0,00028 \cdot t_{CP}$$

$$\text{где } t_{CP1} = \frac{\tau_{CP1} + 40}{2} = \frac{86 + 40}{2} = 63^{\circ}C \quad \text{для подающей трубы;}$$

$$t_{CP2} = \frac{\tau_{CP2} + 40}{2} + \frac{46 + 40}{2} = 43^{\circ}C \quad \text{-для обратной трубы}$$

2. Тогда вычислим коэффициенты теплопроводности:

$$\lambda_{из1} = 0,042 + 0,00028 \cdot 63 = 0,06 \frac{Вт}{м \cdot K}$$

$$\lambda_{из2} = 0,042 + 0,00028 \cdot 43 = 0,054 \frac{Вт}{м \cdot K}$$

Таблица 2.13

Расчетные характеристики теплоизоляционных материалов изделий

Материал, изделие	Средняя плотность в конструкции, кг/м³	Теплопроводность теплоизоляционного материала в конструкции $\lambda_{из}$, Вт/м°C для поверхностей с температурой °C		Температура применения, °C
		20 и выше	19 и ниже	
Маты минераловатные прошивные	120 150	0,045+0,00021 t_m 0,049+0,0002 t_m	0,044+0,035 0,048-0,037	От минус 180 до 450 для матов
Маты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем	65 95 120 180	0,04+0,00029 t_m 0,043+0,00022 t_m 0,044+0,0002 t_m 0,052+0,0002 t_m	0,039-0,03 0,042-0,031 0,043-0,032 0,051-0,038	От минус 60 до 400 От минус 180 до 400
Теплоизоляционные изделия из вспененного этиленполипропиленового каучука «Аэрофлекс»	60	0,034+0,0002 t_m	0,033	От минус 57 до 125
Полуцилиндры и цилиндры минераловатные	50 80 100 150 200	0,04+0,00003 t_m 0,044+0,00022 t_m 0,049+0,00021 t_m 0,05+0,0002 t_m 0,053+0,00019 t_m	0,030-0,029 0,043-0,032 0,048-0,036 0,049-0,035 0,052-0,038	От минус 180 до 400
Шнур теплоизоляционный из минеральной ваты	200	0,056+0,0001 t_m	0,055-0,04	От минус 180 до 600
Маты из стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем	50 70	0,04+0,0003 t_m 0,042+0,00028 t_m	0,039-0,029 0,041-0,03	От минус 60 до 180
Маты и вата из супертонкого базальтового волокна без связующего	80	0,032+0,00019 t_m	0,031-0,024	От минус 180 до 600
Маты и вата из супертонкого стеклянного волокна без связующего	70	0,033+0,00014 t_m	0,03200,024	От минус 180 до 400
Песок перлитовый, вспученный, мелкий	100 150 225	0,052+0,00012 t_m 0,055+0,00012 t_m 0,058+0,00012 t_m	0,051-0,038 0,054-0,04 0,057-0,042	От минус 180 до 875
Теплоизоляционные изделия из пенополистирола	30 50 100	0,033+0,00018 t_m 0,036+0,00018 t_m 0,041+0,00018 t_m	0,032-0,024 0,031-0,025 0,04-0,03	От минус 180 до 70
Теплоизоляционные изделия из пенополиуретана	40 50 70	0,030+0,00015 t_m 0,032+0,00015 t_m 0,047+0,00015 t_m	0,020-0,024 0,031-0,025 0,036-0,027	От минус 40 до 130
Теплоизоляционные изделия «Кайманфлекс»	60-80	0,036	0,034	От минус до 105
Теплоизоляционные изделия из пенополиэтилена	50	0,035+0,00018 t_m	0,033	От минус 70 до 70

3.Термическое сопротивление основного слоя изоляции для каждой трубы

$$R_{из1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_{из}}{d_H} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,06} \cdot \ln \frac{0,626}{0,426} = 1,02 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

$$d_{из} = 42,6 + 2 \cdot 10 + 62,6 мм = 0,626 м$$

$$R_{из2} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,054} \cdot \ln \frac{0,626}{0,426} = 1,14 \frac{Вт}{м \cdot K}$$

4.Термическое сопротивление покровного слоя для каждой трубы

$$R_{пс} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{пс}} \cdot \ln \frac{d_{пс}}{d_{из}}$$

где коэффициент теплопроводности бризола (покровный слой выполнен из бризола) $\lambda_{пс} = 0,175$ Вт/мК

диаметр трубы с учетом покровного слоя определяется выражением:

$$d_{пс} = d_{из} + 2 \cdot \delta = 626 + 2 \cdot 8 = 642 мм$$

$$\lambda_{пс} = 0,175 \frac{Вт}{м \cdot K}$$

$$R_{пс} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,175} \cdot \ln \frac{0,642}{0,626} = 0,023 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

5.Термическое сопротивление на поверхности покрытия для каждого трубопровода

$$R_{п} = \frac{1}{\pi \cdot d_{пс} \cdot \alpha} = \frac{1}{3,14 \cdot 0,642 \cdot 8} = 0,06 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

где коэффициент теплоотдачи на поверхности покрытия $\alpha = 8$ Вт/м² К

6.Термическое сопротивление каждого теплопровода

$$R_1 = R_{из1} + R_{пс} + R_{п} = 1,02 + 0,023 + 0,06 = 1,103 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

$$R_2 = R_{из2} + R_{пс} + R_{п} = 1,14 + 0,023 + 0,06 = 1,223 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

7.Эквивалентные внутренний и наружный диаметры каналов:

Размеры каналов приведены в таблице 2.14

Таблица 2.14

Основные типы сборных железобетонных каналов КЛ (КЛп) и КЛс для тепловых сетей

Условный диаметр трубопровода $D_y, мм$	Обозначение (марка канала)	Размеры канала, мм			
		Внутренние номинальные		Наружные	
		Ширина А	Высота Н	Ширина А	Высота Н
25-50 70-80	КЛ(КЛп)60-30	600	300	850	440
	КЛ(КЛп)60-45		450		600
100=150	КЛ(КЛп)90-45	900	450	1150	630
	КЛ(КЛп)60-60	600	600	850	750
175-200 250-300	КЛ(КЛп)90-60	90	600	1150	780
	КЛ(КЛп)120-60	1200		1450	
350-400	КЛ(КЛп)150-60	900		1800	850
	КЛ(КЛп)210-60	1200		2400	890
450-500	КЛс90-90	900	900	1060	1070
	КЛс120-90	1200		1400	
	КЛс150-90	1500		1740	
600-700	КЛс120-120	1200	1200	1400	1370
	КЛс150-120	1500		1740	1470
	КЛс210-120	2100		2380	1470

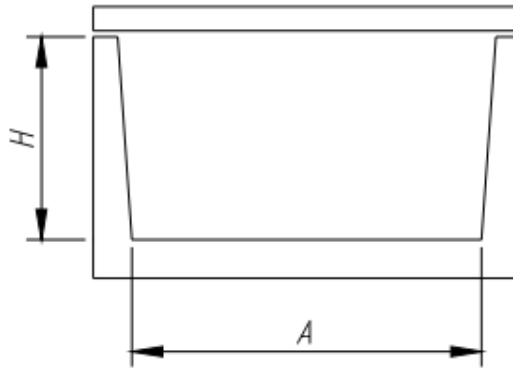


Рисунок 2.2 Сборный канал для тепловых сетей

$$d_{BЭ} = \frac{4 \cdot F_B}{P_B} = \frac{4 \cdot 2,1 \cdot 1,2}{2 \cdot (2,1 + 1,2)} = 1,53 \text{ м}$$

$$d_{HЭ} = \frac{4 \cdot F_H}{P_H} = \frac{4 \cdot 2,38 \cdot 1,47}{2 \cdot (2,38 + 1,47)} = 1,82 \text{ м}$$

Размеры каналов определены согласно данным таблицы 2.14.

8. Определим термическое сопротивление на внутренней поверхности канала

Примем коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности канала $\alpha = 8 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Тогда

$$R_{ПК} \frac{1}{\pi \cdot d_{BЭ} \cdot \alpha} = \frac{1}{3,14 \cdot 1,53 \cdot 8} = 0,026 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

9. Термическое сопротивление стенок канала при коэффициенте теплопроводности стенки канала $\lambda_k = 1,6 \text{ Вт/м К}$

$$R_K = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_K} \cdot \ln \frac{d_{HЭ}}{d_{BЭ}} = \frac{1}{6,28 \cdot 1,6} \cdot \ln \frac{1,82}{1,53} = 0,017 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

10. Термическое сопротивление грунта

Предварительно определим отношение

$$\frac{h}{d_H} = \frac{1,2}{0,426} = 2,8 \geq 2$$

Так как отношение глубины заложения оси трубопровода к наружному диаметру трубопровода больше 2, то воспользуемся уравнением:

$$R_{ГР} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{ГР}} \ln \frac{4h}{d_{HЭ}}$$

При этом коэффициент теплопроводности грунта находим по табл. 2.8

$\lambda_{ГР} = 0,62 \text{ Вт/м К}$

тогда термическое сопротивление грунта

$$R_{ГР} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,62} \ln \frac{4 \cdot 1,2}{1,82} = 0,249 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

11. Суммарное термическое сопротивление потоку тепла от воздуха в канале в грунт:

$$R_O = R_{ПК} + R_K + R_{ГР} = 0,026 + 0,017 + 0,249 = 0,292 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

12. Температуру воздуха в канале определяем по уравнению:

$$t_K = \frac{\frac{\tau_{CP1}}{R_1} + \frac{\tau_{CP2}}{R_2} + \frac{t_0}{R_0}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_0}} = \frac{\frac{86}{1,103} + \frac{46}{1,223} + \frac{3}{0,292}}{\frac{1}{1,103} + \frac{1}{1,223} + \frac{1}{0,292}} = 24,4^\circ C$$

13. Удельные потери теплоты подающим и обратным изолированными теплопроводами

$$q_1 = \frac{\tau_{CP1} - t_K}{R_1} = \frac{86 - 24,4}{1,103} = 55,8 \frac{Bm}{m}$$

$$q_2 = \frac{\tau_{CP2} - t_K}{R_2} = \frac{46 - 24,4}{1,223} = 17,7 \frac{Bm}{m}$$

14. Суммарные удельные потери тепла:

$$q_{из} = q_1 + q_2 = 55,8 + 17,7 \frac{Bm}{m}$$

15. При условии неизолрированных теплопроводов суммарное термическое сопротивление будет равно термическому сопротивлению на поверхности теплопровода:

$$R_{\Pi}^{HEIZ} = \frac{1}{\pi \cdot d_H \cdot \alpha} = \frac{1}{3,14 \cdot 0,426 \cdot 8} = 0,093 \frac{m \cdot K}{Bm}$$

16. Температура воздуха в канале при неизолрированных теплопроводах:

$$t_K = \frac{\frac{86}{0,093} + \frac{46}{0,093} + \frac{3}{0,093}}{\frac{1}{0,093} + \frac{1}{0,093} + \frac{1}{0,093}} = 57,3^\circ C$$

17. Удельные потери тепла неизолрированными теплопроводами:

$$q'_1 = \frac{\tau_{CP1} - t'_K}{R_{\Pi}^{HEIZ}} = \frac{86 - 57,3}{0,093} = 308,6 \frac{Bm}{m}$$

$$q'_2 = \frac{\tau_{CP2} - t'_K}{R_{\Pi}^{HEIZ}} = \frac{46 - 57,3}{0,093} = -121,5 \frac{Bm}{m}$$

Знак «минус» означает, что при отсутствии изоляции имеет место обратный тепловой поток от воздуха в канале к обратному теплопроводу

18. Суммарные потери тепла неизолрированными теплопроводами будут равны потерям тепла подающего теплопровода:

$$q_{HEIZ} = q'_1 = 308,6 \frac{Bm}{m}$$

19. Эффективность тепловой изоляции:

$$\eta = \frac{q_{HEIZ} - q_{из}}{q_{HEIZ}} = \frac{308,6 - 73,5}{308,6} = 0,762$$

Задача 2.3. Определить эффективность тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах.

Для самостоятельного решения из таблицы вариантов 2.15 принимаем исходные данные. Номер варианта соответствует номеру в списке группы.

Таблица 2.15

Исходные данные

номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
d _н , мм	59	159	219	277	325	377	426	480	529	630	720	89	108	125	159	194	219	273	325	377
τ _{ср} , °C	80	78	75	88	84	82	90	72	76	77	85	81	74	83	86	73	82	79	76	82
τ _{ср2} , °C	40	38	43	42	44	39	40	41	36	44	38	42	43	45	37	36	45	39	40	42
h, м	1,1	1,3	1,2	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2
Тип ка-нала	КЛ 60-30	КЛ 90-150	КЛ 90-160	КЛ 120-160	КЛ 120-160	КЛ 150-160	КЛ 210-60	КЛ 120-90	КЛ 150-90	КЛ 150-90	КЛ 210-120	КЛ 60-45	КЛ 90-45	КЛ 60-60	КЛ 60-60	КЛ 90-60	КЛ 90-60	КЛ 120-60	КЛ 120-60	КЛ 150-60
t ₀ , °C	3	5	2	1	2	1	5	4	2	1	3	5	2	4	1	2	3	4	5	1
Тип изо-ля-ции	По-лу-ци-лин-дры ми-нера-ло-ват-ные про-шив-ват-ные	Маты ми-нера-ло-ват-ные про-шив-ные	Пе-но-по-ли-уре-тан	Пе-но-по-ли-сти-рол	Пе-но-по-ли-эти-лен	Пе-сок пер-лито-вый	Ба-заль-товое во-лок-но	Шну р ми-неро-ват-ный	Кау-чук «азро флекс»	Ци-лин-дры ми-неро-ват-ные	Пено-поли-уре-тан	Пе-но-по-ли-сти-рол	Пер-лит	Ба-заль-товое во-лок-но	Пе-но-по-ли-уре-тан	Шну р из ми-нера-лова-ты	Сте-лян-ное шта-пель-ное во-лок-но на сит-тети-че-ском свя-зую-щем	Пе-но-по-ли-сти-рол	Пе-но-по-ли-уре-тан	

2.4 Пример определения толщины слоя тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах, по нормируемой плотности теплового потока

Задача 2.4. По данным задачи 2.1 определить требуемую толщину тепловой изоляции по нормируемой плотности теплового потока через изолированную поверхность теплопровода. Определить эффективность принятой изоляции.

Приведем исходные данные примера 2.4.

Определить требуемую толщину слоя тепловой изоляции 2-х трубной тепловой сети с диаметром теплопроводов $d_H = 426$ мм, проложенных в каналах КЛс 210×120. Среднегодовая температура сетевой воды в подающем трубопроводе $\tau_{cp1} = 86^\circ\text{C}$; в обратном $\tau_{cp2} = 46^\circ\text{C}$. Глубина заложения оси теплопроводов $h = 1,2$ м.

Грунты – суглинки, плотностью 1200 кг/м^3 при массовой влажности 12 %. Температура грунта $t_0 = 30^\circ\text{C}$. Изоляция – маты из стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем МС-50, предварительно толщина $\delta_{из} = 0,1$ м (с учетом уплотнения), покровный слой из бризола в два слоя; $\delta \text{ п.с.} = 0,008$ м.

Решение:

1. Предварительно определим нормируемую плотность теплового потока.

По таблице 1.1 для трубопровода $D_y = 400$ мм по условиям прокладки принимаем норму плотности теплового потока:

$$q_1^{\text{норм}} = 82 \text{ Вт/м}; q_2^{\text{норм}} = 33 \text{ Вт/м}$$

2. Определим суммарные термические сопротивления прямого R_1 и обратного R_2 теплопроводов:

$$\Sigma R_1 = \frac{\tau_{cp1} - t_0}{q_1^{\text{норм}}} = \frac{86 - 3}{82} = 1,012 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

$$\Sigma R_2 = \frac{\tau_{cp2} - t_0}{q_2^{\text{норм}}} = \frac{46 - 3}{33} = 1,303 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

3. Толщина основного слоя изоляции определяется по общей формуле

$$\delta_{из} = \frac{d_H}{2} \cdot (B - 1)$$

$$B = e^{2\pi\lambda R}$$

Для расчета принимаем предварительно толщину слоя изоляции 0,1 м.

4. Вычислим величину B для подающего трубопровода.

$$\ln B = 2\pi \cdot \lambda_{из1} \cdot \left[\Sigma R_1 - \frac{1}{\pi \cdot \alpha \cdot (d_H + 0,1)} \right] = 6,28 \cdot 0,06 \cdot \left[1,012 - \frac{1}{3,14 \cdot 8 \cdot (0,426 + 0,1)} \right] = 0,353$$

5. Вычислим величину B для обратного теплопровода

$$\ln B = 2\pi \cdot \lambda_{из2} \cdot \left[\Sigma R_2 - \frac{1}{\pi \cdot \alpha \cdot (d_H + 0,1)} \right] = 6,28 \cdot 0,054 \cdot \left[1,303 - \frac{1}{3,14 \cdot 8 \cdot (0,426 + 0,1)} \right] = 0,42$$

Тогда $B = 1,52$

6. Вычислим толщину слоя изоляции для подающего трубопровода:

$$\delta_{из1} = \frac{d_H}{2} \cdot (B-1) = \frac{0,426}{2} \cdot (1,42-1) = 0,09 м$$

Для обратного трубопровода

$$\delta_{из2} = \frac{d_H}{2} \cdot (B-1) = \frac{0,426}{2} \cdot (1,52-1) = 0,11 м$$

Принимаем толщину основного слоя изоляции для обоих теплопроводов

$$\delta_{из1} = \delta_{из2} = 0,11 м$$

$$d_{из1} = d_{из2} = 0,426 + 2 \cdot 0,11 = 0,646 м$$

7. Термическое сопротивление основного слоя изоляции для труб:

Прямого теплопровода

$$R_{из1} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из1}} \cdot \ln \frac{d_{из}}{d_H} = 1,105 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

Обратного теплопровода:

$$R_{из2} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda_{из2}} \cdot \ln \frac{d_{из}}{d_H} = \frac{1}{6,28 \cdot 0,175} \cdot \ln \frac{0,646}{0,426} = 1,228 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

8. Термическое сопротивление покровного слоя для обеих труб.

При расчете примем установленный выше диаметр покровного слоя

$$d_{пс} = 0,646 + 2 \cdot 0,008 = 0,662 м$$

9. Термическое сопротивление на поверхности покровного слоя для обеих труб:

$$R_{п} = \frac{1}{\alpha \cdot \pi \cdot d_{пс}} = \frac{1}{8 \cdot 6,28 \cdot 0,662} = 0,06 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

10. Термическое сопротивление теплопроводов:

Прямого:

$$R_1 = R_{из1} + R_{пс} + R_{п} = 1,105 + 0,022 + 0,06 = 1,187 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

Обратного:

$$R_2 = 1,228 + 0,022 + 0,06 = 1,310 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

11. Из предыдущего расчета (пример 2.3) принимаем термические сопротивления:

На внутренней поверхности канала:

$$R_{пк} = 0,026 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

Стенок канала:

$$R_K = 0,017 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

Грунта:

$$R_{гп} = 0,249 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

Тогда суммарное термическое сопротивление канала:

$$R_0 = 0,026 + 0,017 + 0,249 = 0,292 \frac{м \cdot K}{Вт}$$

12. Определим температуру воздуха в канале:

$$t_K = \frac{\frac{\tau_{CP1}}{R_1} + \frac{\tau_{CP2}}{R_2} + \frac{t_0}{R_0}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_0}} = \frac{\frac{86}{1,187} + \frac{46}{1,310} + \frac{3}{0,292}}{\frac{1}{1,187} + \frac{1}{1,310} + \frac{1}{0,292}} = \frac{117,8}{5,030} = 23,4^\circ C$$

13. Удельные потери тепла подающим и обратным теплопроводами:

$$q_1 = \frac{\tau_{CP1} - t_K}{R_1} = \frac{86 - 23,4}{1,187} = 52,7 \frac{Bm}{m}$$

$$q_2 = \frac{\tau_{CP2} - t_K}{R_2} = \frac{46 - 23,4}{1,31} = 17,3 \frac{Bm}{m}$$

14. Суммарные удельные потери тепла изолированного теплопровода:

$$q_{из} = q_1 + q_2 = 52,7 + 17,3 = 70 \frac{Bm}{m}$$

15. Тепловые потери при отсутствии изоляции:

При условии отсутствия изоляции удельные тепловые потери будут такими же, как и в предыдущем расчете

$$q_{НЕИЗ} = q'_1 = 308,6 \frac{Bm}{m}$$

16. Эффективность тепловой изоляции:

$$\eta = \frac{q_{НЕИЗ} - q_{из}}{q_{НЕИЗ}} = \frac{308,6 - 70}{308,6} = 0,773 = 77,3\%$$

Задача 2.4. Определить толщину слоя тепловой изоляции теплопроводов, проложенных в каналах, по нормируемой плотности теплового потока.

Для самостоятельного решения задачи принимаем исходные данные по таблице 2.15. Номер варианта соответствует номеру студента в списке группы.

2.5 Пример теплового расчета теплоизоляционной конструкции при надземной прокладке теплопроводов. Определение толщины слоя тепловой изоляции

Надземную прокладку тепловых сетей применяют на территориях промышленных предприятий, на площадках, свободных от застроек, вне пределов города или в местах, где она не влияет на архитектурное оформление и не мешает движению транспорта. Надземная прокладка имеет ряд преимуществ: доступность для осмотра и удобство эксплуатации; возможность в кратчайшие сроки обнаружить и ликвидировать аварию в теплопроводах; отсутствие электрокоррозии от блуждающих токов и коррозии от агрессивных грунтовых вод; меньшая стоимость сооружения по сравнению со стоимостью подземных прокладок тепловых сетей. Надземную прокладку тепловых сетей осуществляют: на отдельно стоящих опорах (мачтах); на эстакадах с пролетным строением в виде прогонов, ферм или подвесных (вантовых) конструкций; по стенам зданий.

Низкие опоры применяют в основном для надземной прокладки тепловых сетей на свободных от застроек площадках. При прокладке на низких опорах расстояние в свету от поверхности земли до низа тепловой изоляции теплопроводов должно быть не менее 0,35 м. Высокие отдельно стоящие опоры подразделяют на жесткие, гибкие и качающиеся. Жесткие опоры представляют собой отдельные колонны или рамы. Гибкие опоры — это стальные стойки, жесткозаделанные в фундамент с трубопроводом и при температурном удлинении последнего перемещается совместно с трубой. Перемещение верхушки происходит за счет упругого изгиба стойки. Качающиеся высокие опоры состоят из стальной или железобетонной стойки, шарнирно соединенной с фундаментом. Верхушка стоек шарнирно соединяется с опирающимся трубопроводом и за счет поворота стойки вокруг нижнего шарнира может свободно перемещаться в горизонтальном направлении при перемещении трубопроводов вследствие изменения температуры.

В качестве примера рассмотрим расчет на промышленной площадке НПС «Невская» с примером оформления.

Стальные трубы незаменимы при прокладке трубопроводов в системе теплоснабжения, но такие трубы могут выдерживать большой перепад температур, благодаря теплоизоляции, которую используют при всех способах прокладки трубопроводов и на арматуре тепловой сети, а именно на фланцевых соединениях, компенсаторах и опорах.

Конструкция тепловой изоляции состоит из основного теплоизоляционного слоя, наружного защитного покрытия и креплений. Если сравнивать неизолированный и, соответственно, изолированный трубопроводы, то тепловые потери у первого будут в 5 – 10 раз выше.

Основной теплоизоляционный слой защищает поверхность коллектора от потери тепла. Наружное защитное покрытие предохраняет основной теплоизоляционный слой от механических повреждений, влаги и воздействия окружающей среды. Оно должно быть прочным, монолитным и без трещин. В зависимости от способа и места прокладки тепловых сетей наружное защитное покрытие выполняют из различных материалов.

На НПС «Невская» изоляция трубопроводов выполнена из пенополиуретана (ППУ), который представляет собой разновидность газонаполненных пластмасс (пенопластов), структура которых является ячейками, наполненными углекислым газом. Многообразный диапазон рабочих температур разрешает применение изоляции из ППУ при экстремально низких температурах, а именно до -190°C в промышленности, а также выдерживать интенсивный нагрев до $+150^{\circ}\text{C}$.

Выполним расчет изоляции с использованием теплоизоляционного материала – вспененного ППУ.

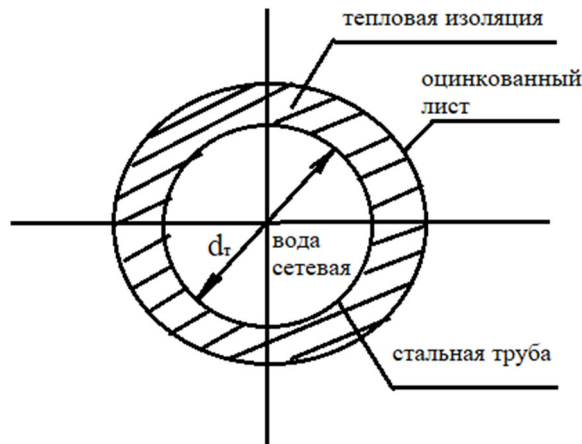


Рисунок 2.3 Изолированный трубопровод

Исходные данные для определения толщины слоя изоляции:

Диаметр трубопровода $d_H = 108$ мм, покровный слой из оцинкованной стали толщиной $\delta = 0,0005$ м. Изоляция – пенополиуретан. Среднегодовая температура сетевой воды в подающем трубопроводе $\tau_{cp1} = 68,8^\circ\text{C}$, в обратном $\tau_{cp2} = 53,4^\circ\text{C}$. Расчетная температура окружающей среды для надземной прокладки принимается равной среднегодовой температуре, определяется по СНиП или СП «Строительная климатология». Для условий НПС «Невская» $t_o = 5,4^\circ\text{C}$.

Тогда нормируемые плотности тепловых потоков для трубопроводов $d_H = 108$ мм при заданных среднегодовых температурах теплоносителя определяем по табл.2.1

$$q_1^{\text{норм}} = 43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}, q_2^{\text{норм}} = 24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Коэффициент теплоотдачи определяем по табл.2.6. При надземной прокладке для скорости ветра 10 м/с принимаем коэффициент теплоотдачи $\alpha = 26 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$

Определяем термические сопротивления теплопроводов

Для прямого теплопровода

$$\Sigma R_1 = \frac{\tau_{cp1} - t_o}{q_1^{\text{норм}}} = \frac{68,8 - 5,4}{43} = 1,474 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}$$

Для обратного теплопровода

$$\Sigma R_2 = \frac{\tau_{cp2} - t_o}{q_2^{\text{норм}}} = \frac{53,4 - 5,4}{24} = 2,0 \frac{\text{мК}}{\text{Вт}}$$

Толщину основного слоя изоляции определяем по формуле

$$\delta_{\text{из}} = \frac{d_H}{2} (B - 1)$$

где B – определяется из уравнения

$$\ln B = 2\pi\lambda_{\text{из}} \left[\Sigma R - \frac{1}{\alpha\pi(d_H + 0,1)} \right]$$

Проведем расчет для подающего теплопровода

$$\ln B = 2\pi\lambda_{\text{из}} \left[\Sigma R_1 - \frac{1}{\alpha\pi(d_H + 0,1)} \right] =$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 0,029 \cdot \left[1,474 - \frac{1}{26 \cdot 3,14 \cdot (0,108 + 0,1)} \right] = 0,2495$$

Проведем расчет для обратного теплопровода

$$\ln B = 2\pi\lambda_{\text{из}} \left[\sum R_2 - \frac{1}{\alpha\pi(d_H + 0,1)} \right]$$

$$= 2 \cdot 3,14 \cdot 0,029 \left[2,0 - \frac{1}{26 \cdot 3,14 \cdot (0,108 + 0,1)} \right] = 0,3535$$

Определим величину В

Для подающего теплопровода

$$B = e^{0,2495} = 1,2833$$

Для обратного

$$B = e^{0,3535} = 1,424$$

Тогда определяем толщину слоя изоляции

Для подающего теплопровода

$$\delta_{\text{из1}} = \frac{d_H}{2} \cdot (B - 1) = \frac{0,108}{2} \cdot (1,2833 - 1) = 0,015 \text{ м}$$

Для обратного теплопровода

$$\delta_{\text{из2}} = \frac{d_H}{2} \cdot (B - 1) = \frac{0,108}{2} \cdot (1,424 - 1) = 0,022 \text{ м}$$

Принимаем толщину основного слоя изоляции для обоих теплопроводов одинаковой и равной $\delta_{\text{из}} = 0,03 \text{ м}$.

2.6 Пример теплового расчета теплоизоляционной конструкции при надземной прокладке теплопроводов.

Определение эффективности тепловой изоляции

По условиям предыдущего примера 2.5 необходимо определить эффективность тепловой изоляции надземных теплопроводов. Диаметр трубопровода $d_H = 108 \text{ мм}$, покровный слой из оцинкованной стали толщиной $\delta = 0,0005 \text{ м}$. Изоляция – пенополиуретан. Среднегодовая температура сетевой воды в подающем трубопроводе $t_{\text{ср1}} = 68,80^\circ\text{С}$, в обратном $t_{\text{ср2}} = 53,40^\circ\text{С}$. Расчетная температура окружающей среды для надземной прокладки принимается равной среднегодовой температуре, определяется по СНиП или СП «Строительная климатология». Для условий НПС «Невская» $t_o = 5,4^\circ\text{С}$.

Величины нормируемой плотности тепловых потоков для неизолируемых трубопроводов $d_H = 108 \text{ мм}$ при заданных среднегодовых температурах теплоносителя определены в примере и составляют:

$$q_1^{\text{неиз}} = 43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \quad q_2^{\text{неиз}} = 24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

При условии неизолируемых теплопроводов суммарное термическое сопротивление будет равно термическому сопротивлению на поверхности теплопровода

$$R_{\text{п}}^{\text{неиз}} = \frac{1}{\pi \cdot d_H \cdot \alpha} = \frac{1}{3,14 \cdot 0,108 \cdot 26} = 0,113 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

Учтем, что вычисленная величина будет одинаковой для подающего и обратного теплопроводов.

Определим удельные потери тепла неизолрованными теплопроводами

$$q_1^* = \frac{\tau_{ср1} - t_0}{R_{п}^{неиз}} = \frac{68,8 - 5,4}{0,113} = 561,1 \text{ Вт/м}$$

$$q_2^* = \frac{\tau_{ср2} - t_0}{R_{п}^{неиз}} = \frac{53,4 - 5,4}{0,113} = 424,8 \text{ Вт/м}$$

Суммарные потери тепла неизолрованными теплопроводами будут равны потерям тепла подающим теплопроводом

$$q_{неиз} = 561,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Эффективность тепловой изоляции

$$\eta = \frac{q_{неиз} - q_1^{неиз}}{q_1^{неиз}} = \frac{561,1 - 43}{43} = 0,92$$

Задача 2.5. Определить толщину слоя и эффективность тепловой изоляции теплопроводов, проложенных надземным способом. Покровный слой - сталь толщиной 0,0005 мм. Изоляционный материал и коэффициент теплопроводности принимаем самостоятельно по табл. 2.13.

Для самостоятельного решения выбираем данные из таблицы 2.16

Таблица 2.16

Исходные данные для решения задачи 5

Парамеры Номер п/п	Диаметр трубопровода, d _н , мм	Среднегодовая температура сетевой воды в подающем теплопроводе τ _{ср1}	Среднегодовая температура сетевой воды в обратном теплопроводе τ _{ср1}	Среднегодовая температура воздуха t ₀
1	25	76,6	64,3	1,6
2	32	64,4	54,5	1,0
34	40	67,3	58,3	2,5
5	50	59,4	48,3	-0,5
6	65	63,8	52,5	-4,1
7	80	57,6	47,2	3,1
8	100	66,6	54,5	1,9
9	125	73,3	60,9	-9,8
10	150	66,8	54,8	-14,7
11	200	65,2	55,1	6,1
12	250	59,5	48,8	10,8
13	300	71,8	60,1	3,2
14	350	60,2	51,2	-12,9
15	400	73,1	62,6	-2,6
16	450	74,6	62,9	5,1
17	500	63,4	54,0	14,1
18	600	65,7	54,7	-10,7
19	700	60,3	49,2	2,2
20	800	71,2	60,3	1,5

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. Назовите основные виды задач при тепловом расчете теплоизоляционной конструкции.
2. Как выбрать толщину основного слоя изоляционной конструкции?
3. Как рассчитать потери теплоты теплопроводами?
4. Приведите порядок теплового расчета изоляции при канальной прокладке?
5. Приведите порядок теплового расчета изоляции при бесканальной прокладке?
6. Какой материал следует выбирать при канальной прокладке?
7. Какой материал следует принимать при надземной прокладке?
8. Какую температуру окружающей среды принимают за расчетную?

3. ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В системе теплоснабжения для подготовки горячей воды на ГВС в закрытой системе устанавливаются водопогреватели (ВПУ). Для них проводят тепловой и гидравлический расчеты, в ходе которых определяется поверхность нагрева, затем выбираются номер и количество секций, а также гидравлические потери давления по греющей и нагреваемой среде. Расчет ВПУ системы горячего водоснабжения проводят для самого неблагоприятного режима, который соответствует точке излома температурного графика регулирования отпуска теплоты. Если излом графика отсутствует, то расчет проводят по минимальной температуре сетевой воды.

В системе теплоснабжения широко применяются секционные скоростные водопогреватели, подключаемые по противоточной схеме движения теплоносителей. Греющая вода из тепловой сети (сетевая вода) движется в межтрубном пространстве, нагреваемая водопроводная вода – в латунных трубках в противоток сетевой воде. Подогреватели набираются из необходимого числа секций, соединяемых последовательно по сетевой и по нагреваемой водопроводной воде. Каждая секция представляет собой одноходовой трубчатый теплообменник поверхностного типа. Латунные трубки диаметром 14/16 мм заделаны в трубные доски. Применяются секции с длиной трубок 2 и 4 м и диаметром от 57 до 530 мм. Технические характеристики ВПУ приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Технические характеристики водо-водяных подогревателей по отраслевым стандартам

Обозначение	Наружный и внутренний диаметр корпуса $D_H/D_{ВН}$, мм	Длина подогревателя с калачами L, мм	Число трубок n	Площадь поверхности нагрева, F, м ²	Площадь живого сечения, м ²	
					Трубок $l_{ТР}$	Межтрубного пространства $l_{МТР}$
1	2	2	4	5	6	7
01 ОСТ 34-558-68 02 ОСТ 34-558-68	57/50	2220 4220	4 4	0,37 0,75	0,00062	0,00116
03 ОСТ 34-558-68 04 ОСТ 34-558-68	76/69	2300 4300	7 7	0,65 1,31	0,00108	0,00233
05 ОСТ 34-558-68 06 ОСТ 34-558-68	89/82	2340 4340	12 12	1,11 2,24	0,00185	0,00287
07 ОСТ 34-558-68 08 ОСТ 34-558-68	114/106	2424 4424	19 19	1,76 3,54	0,00293	0,005
09 ОСТ 34-558-68 10 ОСТ 34-558-68	168/158	2620 4620	37 37	3,4 6,9	0,0057	0,0122
11 ОСТ 34-558-68 12 ОСТ 34-558-68	219/207	2832 4832	64 64	5,89 12,0	0,00985	0,02079

1	2	3	4	5	6	7
13 OCT 34-558-68 14 OCT 34-558-68	273/259	3032 5032	109 109	10,0 20,3	0,01670	0,03077
15 OCT 34-558-68 16 OCT 34-558-68	325/309	3232 5232	151 151	13,8 28,0	0,02325	0,04464
17 OCT 34-558-68 18 OCT 34-558-68	377/359	3430 5430	216 216	19,8 40,1	0,03325	0,05781
19 OCT 34-558-68 20 OCT 34-558-68	426/408	3624 5624	283 283	25,8 52,5	0,04356	0,07191
21 OCT 34-558-68 22 OCT 34-558-68	530/512	3552 5552	450 450	41,0 83,4	0,06927	0,11544
26 OCT 34-558-8 27 OCT 34-558-8	57/50	2220 4220	4 4	0,36 0,74	0,00062	0,00116
28 OCT 34-558-68 29 OCT 34-558-68	76/69	2300 4300	7 7	0,64 1,30	0,00108	0,00233
30 OCT 34-558-68 31 OCT 34-558-68	89/82	2340 4340	12 12	1,1 1,22	0,00185	0,00287
32 OCT 34-558-68 33 OCT 34-558-68	114/106	2424 4424	19 19	1,74 3,52	0,00293	0,005
34 OCT 34-558-68 35 OCT 34-558-68	168/158	2620 4620	37 37	3,39 6,88	0,0057	0,0122
36 OCT 34-558-68 37 OCT 34-558-68	219/207	2832 4832	64 64	5,85 11,9	0,00985	0,02079

Следует отметить, что аналогичные водо-водяные подогреватели применяются для приготовления горячей воды, используемой в приборах отопления, подключаемых к тепловой сети по независимой схеме.

Тепловой расчет водоподогревателей сводится к определению коэффициентов теплопередачи, площади поверхности нагрева и потерь давления в них греющей и нагреваемой среды. При проведении расчета необходимо проверять величину скорости движения воды: в трубках скорость движения нагреваемой воды должна находиться в пределах 1,0-2,5 м/с, в межтрубном пространстве не более 2 м/с.

Кроме скоростных водоподогревателей, в системе теплоснабжения могут применяться пластинчатые.

Присоединяются водоподогреватели системы горячего водоснабжения по параллельной или двухступенчатой схемам. Выбор схемы присоединения ВПУ зависит от соотношения максимальных тепловых нагрузок на отопление и ГВС. Если отношение $\frac{Q_{hmax}}{Q_{omax}} = 0,2 - 1,0$, то подогреватели подключаются по двухступенчатой схеме. При остальных значениях – по параллельной схеме. Следует отметить, что в некоторых источниках выбор двухступенчатой схемы уточняется следующим образом: если отношение тепловых нагрузок $\frac{Q_{hmax}}{Q_{omax}} \leq 0,6$, то применяется двухступенчатая последовательная схема, при значениях $0,6 < \frac{Q_{hmax}}{Q_{omax}} \leq 1,0$ – двухступенчатая смешанная схема.

Параллельная схема присоединения теплообменников ГВС к тепловой сети является неэффективной, так как вода после системы отопления, имеющая температуру от 40 до 70 °С, не используется для подогрева холодной водопроводной воды, температура которой в зимний период приблизительно равна 5°С. Вследствие этого увеличиваются затраты теплоты на приготовление горячей воды, особенно при наибольшем водоразборе. Следует отметить, что тепловая сеть должна быть рассчитана при этом на пропуск увеличенных расходов воды. Это означает, что при использовании параллельной схемы возрастают капитальные затраты на сооружение сети.

В двухступенчатой смешанной схеме I (нижняя) ступень подогревателя включается последовательно с системой отопления, тогда как II (верхняя) ступень - параллельно системе отопления. Это намного экономичнее по сравнению с параллельной схемой.

Двухступенчатая последовательная схема также эффективна, но недостатком является усложнение схемы регулирования ЦТП и ИТП. Необходимость регулирования связана с изменением расхода сетевой воды у потребителей с нагрузкой на ГВС, которая отличается от типовой, по которой проводится расчет центрального регулирования. Но следует отметить следующее преимущество: выравнивание суточного тепловой нагрузки и более рациональное использование теплоносителя.

3.1 Пример теплового и гидравлического расчета водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по двухступенчатой последовательной схеме

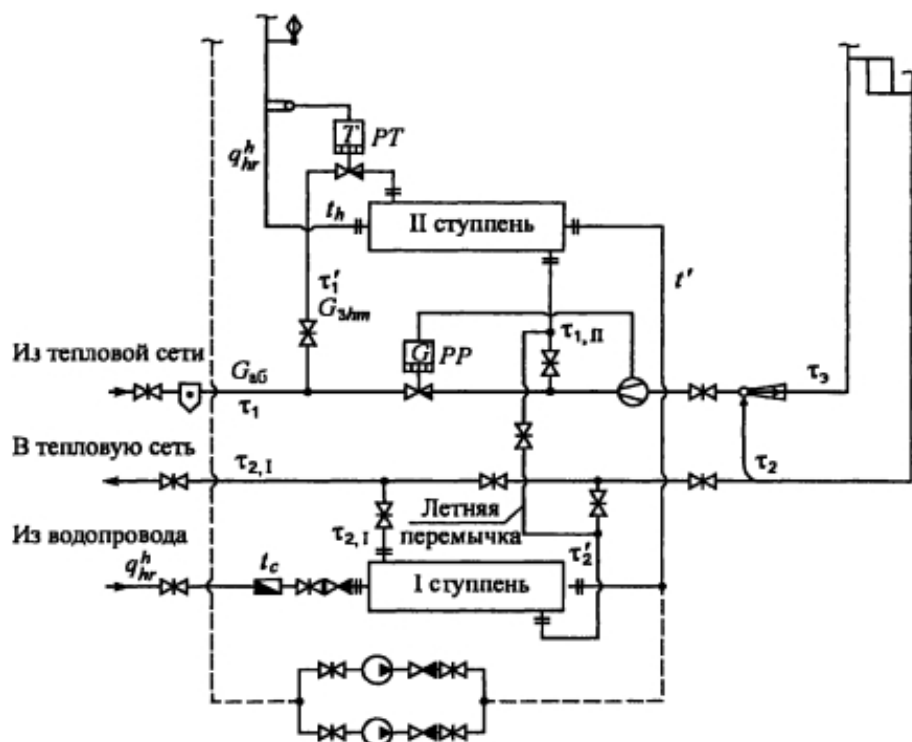


Рисунок 3.1 Двухступенчатая последовательная схема водоподогревательной установки горячего водоснабжения

Расчет водоподогревательной установке проводим по данным для НПС «Невская». Данные по тепловым нагрузкам приведены в части 1. Также были построены графики регулирования отпуска теплоты (примеры 4.1, 4.2, 4.3 часть 1). Балансовая нагрузка технологические нужды $Q_{hm}^6 = 35,04$ кВт. Принимаем: температуру горячей воды $t_h = 60^\circ\text{C}$, холодной $t_c = 5^\circ\text{C}$, воды, поступающей в систему отопления при температуре точки излома графика регулирования $t'_H: \tau'_3 = 66^\circ\text{C}$.

Решение:

Расчет водоподогревательной установки (ВПУ) производим при минимальной температуре сетевой воды в прямом теплопроводе, соответствующей t'_H . Из примера, рассмотренного в пп 4.1-4.3 части 1, находим, что при $t'_H = -8^\circ\text{C}$, температура сетевой воды в прямом теплопроводе по рис. 4.2 (часть 1) $\tau_{II} = 93,9^\circ\text{C}$, повышенного графика регулирования $\tau'_{II} = 70,7^\circ\text{C}$, после системы отопления по отопительному графику $\tau'_2 = 54,05^\circ\text{C}$; при $t_o = -24^\circ\text{C}$ расчетные температуры сетевой воды $\tau_1 = 95^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 70^\circ\text{C}$.

Задаёмся недогревом водопроводной воды до температуры греющей воды в нижней (первой) ступени подогревателя $\Delta t_H = 5^\circ\text{C}$, находим температуру нагреваемой воды на выходе из подогревателя

$$t' = \tau'_2 - \Delta t_H = 54,05 - 5 = 49,05^\circ\text{C}$$

Балансовая нагрузка на горячее водоснабжение (технологические нужды)

$$Q_m^6 = 35,04 \text{ кВт}$$

Тепловые нагрузки подогревателей обеих ступеней при балансовой нагрузке на горячее водоснабжение (технологические нужды) составляют

$$Q_{\text{технII}}^6 = \frac{Q_{hm}^6 \cdot (t_h - t_c)}{t_h - t_c} = \frac{35,04 \cdot (60 - 49,05)}{60 - 5} = 6,976 \text{ кВт}$$

$$Q_{\text{технI}}^6 = Q_m^6 - Q_{\text{технII}}^6 = 35,04 - 6,976 = 28,064 \text{ кВт}$$

Максимальный часовой расход теплоты на горячее водоснабжение (технологические нужды)

$$Q_{hmax} = 2,4 \cdot Q_{hm} = 2,4 \cdot Q_{\text{техн}} = 2,4 \cdot 29,2 = 70,08 \text{ кВт} \dots$$

Расчетные расходы нагреваемой (местной) воды при балансовой и максимальной тепловой нагрузке на горячее водоснабжение (или на технологические нужды):

При балансовой нагрузке

$$q_{hm}^6 = \frac{Q_{hm}^6}{c \cdot (t_h - t_c)} = \frac{35,04 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (60 - 5)} = 0,152 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 546,3 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

При максимальной нагрузке

$$q_{hr}^h = \frac{Q_{hmax}^h}{c \cdot (t_h - t_c)} = \frac{70,08 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (60 - 5)} = 0,304 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 1,093 \frac{\text{т}}{\text{ч}}$$

Расход сетевой воды на абонентский ввод при Q_{hm}^6

$$G'_{аб} = G_{отmax} + G'_{zhm} = \frac{Q_{отmax}}{c \cdot (\tau_1 - \tau_2)} + \frac{Q_{hm}^6}{c \cdot (\tau'_{1п} - \tau'_2)} \cdot \left(\frac{t_h - t'}{t_h - t_c} + 0,2 \right)$$

$$= \frac{129,9 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (95 - 70)} + \frac{35,04 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (93,9 - 54,05)} \cdot \left(\frac{60 - 49,05}{60 - 5} + 0,2 \right) = 1,238 + 0,086 = 1,324 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 4766,4 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Максимальный часовой расход сетевой воды на абонентский ввод при установке регулятора расхода

$$G_{абmax} = 1,1 \cdot G'_{аб} = 1,1 \cdot 4766,4 = 5243,04 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 1,456 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Определим температуру сетевой воды на выходе из подогревателя первой ступени при Q_{hm}^6

$$\tau_{2,1}^6 = \tau'_2 - \frac{Q_{hl}^6}{c \cdot G'_{аб}} = 54,05 - \frac{28,064 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot 1,324} = 36,4^\circ\text{C}$$

Среднелогарифмическая разность температур греющего и нагреваемого теплоносителей в подогревателе первой ступени при Q_{hm}^6

$$\Delta t_{ml}^6 = \frac{(\tau_{2,1}^6 - t_c) - (\tau_2^3 - t')}{\ln \frac{\tau_{2,1}^6 - t_c}{\tau'_2 - t'}} = \frac{(36,4 - 5) - (54,05 - 49,04)}{\ln \frac{36,4 - 5}{54,05 - 49,05}} = 14,4^\circ\text{C}$$

Безразмерный параметр подогревателя первой ступени

$$\Phi_I = \frac{Q_{hl}^6}{\Delta t_{ml}^6 \cdot c \cdot \sqrt{G'_{аб} \cdot q_{hm}^6}} = \frac{28,064 \cdot 10^3}{14,4 \cdot 4,198 \cdot \sqrt{1,324 \cdot 0,152}} = 1,04.$$

Безразмерная удельная тепловая производительность подогревателя первой ступени при максимальной тепловой нагрузке на горячее водоснабжение (технологические нужды)

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\left[0,65 + 0,35 \cdot \frac{q_{hr}^6}{G_{абmax}} + \frac{1}{\Phi_I} \cdot \sqrt{\frac{q_{hr}^6}{G_{абmax}}} \right]}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{0,65 + 0,35 \cdot \frac{0,304}{1,456} + \frac{1}{1,04} \cdot \sqrt{\frac{0,304}{1,456}}} = 0,860$$

Принимая расчетную температуру воды, поступающего в местную отопительную установку, $\tau_3 = 90^\circ\text{C}$, определяем коэффициент смешения элеватора

$$u = \frac{\tau_1 - \tau_3}{\tau_3 - \tau_2} - \frac{95 - 90}{90 - 70} = 0,25$$

Тогда расчетный коэффициент

$$u^* = \frac{(1 + u) \cdot G_{omax}}{G'_{аб}} - 1 = \frac{(1 + 0,25) \cdot 1,24}{1,324} - 1 = 0,17$$

Средняя температура воды в нагреваемом приборе при $t'_{н}$

$$\tau'_{пп} = 0,5 \cdot (\tau'_2 + \tau'_2) = 0,5 \cdot (66 + 54,05) = 60,0.$$

Безразмерная характеристика отопительной системы при максимальной тепловой нагрузке на горячее водоснабжение (технологические нужды)

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\frac{0,5 + u^*}{1 + u^*} + \frac{\tau'_{пп} - t_i}{\tau'_{пп} - \tau'_2} \cdot \frac{G_{абmax}}{G_{omax}}} = \frac{1}{\frac{0,5 + 0,17}{1 + 0,17} + \frac{60,0 - 18}{70 - 54,05} \cdot \frac{1,456}{1,24}} = 0,273$$

Суммарный перепад температур сетевой воды в первой и второй ступенях при максимальной тепловой нагрузке на горячее водоснабжение или технологические нужды (согласно заданию)

$$\delta\tau_{max} = \frac{Q_{hmax}}{c \cdot G_{абmax}} = \frac{70,08 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot 1,456} = 11,5^\circ\text{C}$$

Температура сетевой воды после отопительной установки при Q_{hmax}
Уравнение

$$\tau_{2max} = \frac{\left(\tau'_{2п} - \delta\tau_{max} - \varepsilon_1 \cdot t_c \cdot \frac{q_{hr}^6}{G_{абmax}} \right) \cdot (1 - \varepsilon_0) + t_i \cdot \varepsilon_0}{1 - \left[\varepsilon_1 \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot \frac{q_{hr}^6}{G_{абmax}} \right]}$$

Расчет уравнения

$$\tau_{2max} = \frac{\left(70,7 - 11,5 - 0,860 \cdot 5 \cdot \frac{0,304}{1,456} \right) \cdot (1 - 0,273) + 18 \cdot 0,273}{1 - \left[0,860 \cdot (1 - 0,273) \cdot \frac{0,304}{1,456} \right]} = 47,3^\circ\text{C}$$

Таким образом, $\tau_{2max} = 47,3^\circ\text{C}$

Тепловая производительность подогревателей первой и второй ступеней при Q_{hmax}

$$Q_{hmax}^I = Q_{hmax} \cdot \frac{(\tau_{2max} - t_c) \cdot \varepsilon_1}{t_h - t_c} = 70,08 \cdot \frac{(47,3 - 5) \cdot 0,860}{60 - 5} = 46,4 \text{ кВт}$$

$$Q_{hmax}^{II} = Q_{hmax} - Q_{hmax}^I = 70,08 - 46,4 = 23,68 \text{ кВт} \dots \dots \dots$$

Температура сетевой воды на выходе из подогревателя первой ступени при Q_{hmax}

$$\tau_{I\max}^{II} = \tau'_{1п} - \frac{Q_{hmax}^{II}}{c \cdot G_{абmax}} = 70,7 - \frac{23,68 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot 1,456} = 66,83^\circ\text{C}$$

Температура сетевой воды на выходе из подогревателя второй ступени при $Q_{h\max}$

$$\tau_{2max}^I = \tau_{2max} - \frac{Q_{hmax}^I}{c \cdot G_{абmax}} = 47,3 - \frac{46,4 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot 1,456} = 39,7^\circ\text{C}$$

Температура нагреваемой воды на выходе из подогревателя первой ступени при $Q_{g\max}$

$$t'_{\max} = t_c + \frac{Q_{h\max}^I}{c \cdot q_{hr}^6} = 5 + \frac{46,4 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot 0,304} = 41,4^\circ\text{C}$$

Среднелогарифмическая разность температур греющего и нагреваемого теплоносителей в подогревателях при $Q_{h\max}$

$$\Delta t_{m\max}^{II} = \frac{(\tau_{I\max}^{II} - t'_{\max}) - (\tau'_{1п} - t_h)}{\ln[(\tau_{I\max}^{II} - t'_{\max})/(\tau'_{1п} - t_h)]} = \frac{(66,83 - 41,4) - (70,7 - 60)}{\ln[(66,83 - 41,4)/(70,7 - 60)]} = 17,0^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{m\max}^I = \frac{(\tau_{2\max}^I - t_c) - (\tau_{2\max} - t'_{\max})}{\ln \frac{(\tau_{2\max}^I - t_c)}{(\tau_{2\max} - t'_{\max})}} = \frac{(39,7 - 5) - (47,3 - 41,4)}{\ln \frac{(39,7 - 5)}{(47,3 - 41,4)}} = 24,5^\circ\text{C}$$

Средняя температура греющего и нагреваемого теплоносителей в подогревателях первой и второй ступеней при максимальной тепловой нагрузке на горячее водоснабжение (или на технологические нужды)

$$\tau_{m,I} = 0,5 \cdot (\tau_{2\max} + \tau_{2\max}^I) = 0,5 \cdot (47,3 + 39,7) = 43,5^\circ\text{C}$$

$$t_{m,I} = 0,5 \cdot (t_c + t'_{\max}) = 0,5 \cdot (5 + 41,4) = 23,2^\circ\text{C}$$

$$\tau_{m,II} = 0,5 \cdot (\tau'_{1п} + \tau_{I\max}^{II}) = 0,5 \cdot (70,7 + 66,83) = 68,8$$

$$t_{m,II} = 0,5 \cdot (t'_{\max} + t_h) = 0,5 \cdot (41,4 + 60) = 50,7^\circ\text{C}$$

Задаемся скоростью движения нагреваемой воды $v_{тр} = 1$ м/с; тогда определяем требуемую площадь живого сечения трубного пространства подогревателя первой ступени

К установке принимаем по табл. 3.1 водо-водяной подогреватель О1ОСТ 34-558-86 со следующими техническими данными: внутренний диаметр трубок $d_i = 14$ мм, число трубок 4, площадь поверхности нагрева одной секции $F = 0,37$ м²; площадь живого трубок $f_{тр} = 0,00062$ м²; площадь межтрубного пространства $f_{мтр} = 0,00116$ м²; длина трубок 2 м.

Затем необходимо уточнить действительную скорость движения воды в трубном $v_{тр}$ и межтрубном пространстве подогревателей $v_{мтр}$

$$v_{тр} = \frac{q_{hr}^6}{f_{тр} \cdot \rho_v} = \frac{0,304}{0,00062 \cdot 1000} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_{мтр} = \frac{G_{аб\max}}{f_{мтр} \cdot \rho_v} = \frac{1,456}{0,00116 \cdot 1000} = 1,25 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определим коэффициенты теплоотдачи от сетевой воды к стенкам трубок в подогревателях первой и второй ступеней

$$\alpha_{мтр}^I = (1630 + 21 \cdot \tau_{m,1} - 0,041 \cdot \tau_{m,1}^2) \cdot \frac{v_{мтр}^{0,8}}{d_{ee}^{0,2}} \dots \dots \dots$$

где d_{ee} - эквивалентный диаметр межтрубного пространства.

Определим эквивалентный диаметр межтрубного пространства по уравнению:

$$d_{ee} = \frac{\omega}{\chi},$$

где ω – площадь живого сечения, χ – смоченный периметр.

Тогда эквивалентный диаметр определяется уравнением

$$d_{ee} = \frac{D_i^2 - n \cdot d_e^2}{D_i + n \cdot d_e}$$

где D_i – внутренний диаметр корпуса, по справочным размерам: $D_i = 50$ мм, количество трубок $n = 4$; d_e – наружный диаметр трубок, $d_e = 16$ мм.

Определим эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_{ee} = \frac{50^2 - 4 \cdot 16^2}{50 + 4 \cdot 16} = 12 \text{ мм}$$

Так как эквивалентный диаметр трубок определен, вычислим коэффициент теплоотдачи от сетевой воды к стенкам трубок в подогревателях первой и второй ступенях:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{мтр}}^I &= (1630 + 21 \cdot \tau_{m,1} - 0,041 \cdot \tau_{m,1}^2) \cdot \frac{v_{\text{мтр}}^{0,8}}{d_{ee}^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 43,5 - 0,041 \cdot 43,5^2) \cdot \frac{1,25^{0,8}}{0,012^{0,2}} = 7135 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{мтр}}^{II} &= (1630 + 21 \cdot \tau_{m,II} - 0,041 \cdot \tau_{m,II}^2) \cdot \frac{v_{\text{мтр}}^{0,8}}{d_3^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 68,8 - 0,041 \cdot 68,8^2) \cdot \frac{1,25^2}{0,012^2} = 8335,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

Коэффициенты теплоотдачи от стенок трубок к нагреваемой воде в первой и второй ступенях

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{тр}}^I &= (1630 + 21 \cdot t_{m,I} - 0,041 \cdot t_{m,I}^2) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 23,2 - 0,041 \cdot 23,2^2) \cdot \frac{0,5^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 2825,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

где d_i – внутренний диаметр трубки, $d_i = d_e - 2\delta = 16 - 2 \cdot 1 = 14$ мм

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{тр}}^{II} &= (1630 + 21 \cdot t_{m,II} - 0,041 \cdot t_{m,II}^2) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 50,7 - 0,041 \cdot 50,7^2) \cdot \frac{0,5^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 3492,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \end{aligned}$$

Коэффициенты теплопередачи подогревателей первой и второй ступеней

$$K_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{тр}}^I} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{мтр}}^I}} = \frac{1}{\frac{1}{2825,8} + 1,1 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{7135}} = 1980,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

где $\frac{\delta}{\lambda} = 1,1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ – термическое сопротивление медных трубок теплообменника.

$$K_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{тр}}^{II}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{мтр}}^{II}}} = \frac{1}{\frac{1}{3492,3} + 1,1 \cdot 10^{-5} + \frac{1}{8335,3}} = 2396,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \dots \dots \dots$$

Требуемая поверхность нагрева подогревателей первой и второй ступеней

$$F_I = \frac{Q_{h\max}^I}{K_I \cdot \mu} = \frac{46,4 \cdot 10^3}{1980 \cdot 0,8} = 1,196 \text{ м}^2 \dots \dots \dots$$

$$F_{II} = \frac{Q_{h\max}^{II} \cdot 10^3}{K_{II} \cdot \Delta t_{\text{тmax}}^{II}} = \frac{23,68 \cdot 10^3}{2396,3 \cdot 17 \cdot 0,8} = 0,727 \text{ м}^2 \dots \dots$$

Количество секций в подогревателях первой и второй ступеней

$$n_I = \frac{F_I}{F_{\text{сек}}} = \frac{1,196}{0,37} = 3,23$$

$$n_{II} = \frac{F_{II}}{F_{\text{сек}}} = \frac{0,727}{0,37} = 1,96$$

К установке принимаем соответственно 4 секции I ступени и 2 секции II ступени.

Определим потери давления в трубном и межтрубном пространстве подогревателей первой и второй ступеней

$$\Delta p_{\text{мтр}}^I = 11 \cdot v_{\text{мтр}}^2 \cdot n = 11 \cdot 1,25^2 \cdot 4 = 68,8 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр}}^I = 5,3 \cdot v_{\text{тр}}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 0,5^2 \cdot 4 = 5,3 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{мтр}}^{II} = 11 \cdot v_{\text{мтр}}^2 \cdot n = 11 \cdot 1,25 \cdot 2 = 34,4 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{\text{тр}}^{II} = 5,3 \cdot v_{\text{тр}}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 0,5^2 \cdot 2 = 2,65 \text{ кПа}$$

Задача 3.1. Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по двухступенчатой последовательной схеме.

На основании рассмотренного примера 3.1 провести расчет ВПУ по данным таблицы 3.2. Аналогично примеру 3.1 принимаем температуру горячей воды $t_h = 60^\circ\text{C}$, холодной $t_c = 5^\circ\text{C}$, температура в системе отопления после элеватора для всех вариантов $t_3 = 90^\circ\text{C}$. Для расчета ВПУ предварительно строим график регулирования отпуска теплоты (часть 1, 4.1-4.3). Для построения графика из таблицы 3.2 принимаем температуры сетевой воды t_1, t_2 , а также температуру наружного воздуха для проектирования систем отопления t_o .

Таблица 3.2

Данные для расчета ВПУ, подключенного по двухступенчатой последовательной схеме

N п/п	Тепловая нагрузка на отопление $Q_{отmax}$, кВт	Тепловая нагрузка на ГВС (или технологические нужды) Q_{hm} , кВт	Температуры сетевой воды $\tau_1 - \tau_2$, °C	Температура наружного воздуха для проектирования системы отопления t_o , °C
1	100	20	150-70	-40
2	120	30	125-65	-25
3	140	25	140-70	-19
4	160	30	120-67	-16
5	180	40	115-70	-10
6	200	36	145-65	-39
7	110	25	140-67	-36
8	130	34	134-66	-35
9	150	33	142-68	-36
10	170	40	147-67	-38
11	190	38	124-70	-28
12	105	26	123-65	-32
13	115	28	130-66	-28
14	125	30	128-66	-24
15	135	60	150-65	-42
16	145	50	143-70	-34
17	155	55	128-70	-23
18	165	31	125-65	-30
19	174	33	127-70	-26
20	185	35	118-65	-21

3.2 Пример теплового и гидравлического расчета водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по параллельной схеме

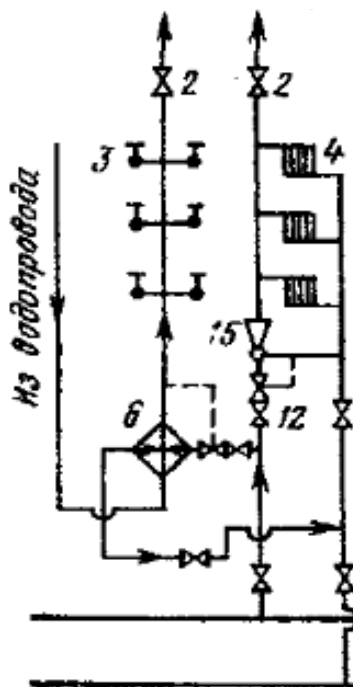


Рисунок 3.2. Закрытая двухтрубная водяная система теплоснабжения с параллельной схемой подключения

Проведем расчет параллельной схемы подключения системы ГВС к тепловой сети и подбор водоподогревательной установки (ВПУ) по исходным данным:

1. Температура сетевой воды в подающем теплопроводе в точке излома графика центрального качественного регулирования:

$$\tau'_1 = 70^\circ\text{C}$$

2. Температура сетевой воды в обратном теплопроводе после подогревателя принимаем $\tau'_3 = 30^\circ\text{C}$

3. Максимальный тепловой поток на горячее водоснабжение квартала

$$Q_{hmax} = 19,54 \text{ МВт}$$

$$Q_{hm} = 8,14 \text{ МВт}$$

4. Температура холодной воды

$$t_c = 5^\circ\text{C}$$

5. Температура горячей воды на выходе из ВПУ

$$t^h = 65^\circ\text{C}$$

Расчет ВПУ:

1. Максимальный расход горячей воды при параллельной схеме присоединения водоподогревателей

$$G_{2hmax} = \frac{Q_{hmax}}{c \cdot (\tau'_1 - \tau'_3)} = \frac{19,54 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (70 - 30)} = 116,4 \text{ кг/с}$$

$$= 418914 \text{ кг/ч}$$

2. Определим среднелогарифмическую разность температур между греющим и нагреваемым теплоносителем

$$\Delta t_m = \frac{(\tau'_3 - t^c) - (\tau'_1 - t^h)}{\ln \frac{\tau'_3 - t^c}{\tau'_1 - t^h}} = \frac{(30 - 5) - (70 - 65)}{\ln \frac{30 - 5}{70 - 65}} = \frac{20}{\ln 5} = 12,43^\circ\text{C}$$

Площадь живого

3. Средние температуры сетевой нагреваемой воды

$$\tau_m = \frac{\tau'_1 + \tau'_3}{2} = \frac{70 + 30}{2} = 50^\circ\text{C}.$$

$$t_m = \frac{t^c + t^h}{2} = \frac{5 + 65}{2} = 35^\circ\text{C}$$

4. Задаемся скоростью нагреваемой воды $v_{TP} = 1 \text{ м/с}$ и определяем требуемую площадь живого сечения трубок подогревателя

$$f_{TP} = \frac{q_{hr}}{v_{TP} \cdot \rho},$$

где q_{hr} – расчетный расход сетевой воды на ГВС, при параллельной схеме присоединения ВПУ определяется по формуле

$$q_{hr} = \frac{Q_{hm}}{c \cdot (\tau'_1 - \tau'_3)} = \frac{8,14 \cdot 10^6}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (70 - 30)} = 48,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 174600 \text{ кг/ч}$$

Тогда площадь живого сечения трубок подогревателя будет равна

$$f_{TP} = \frac{48,5}{1 \cdot 1000} = 0,0485 \text{ м}^2$$

Согласно таблице 3.1 принимаем скоростной водоподогреватель 17ОСТ 34-558-68 со следующими техническими данными:

Длина секции $l=5000$ мм (5430)

Внутренний диаметр корпуса $D_i = 359$ мм

Количество трубок $n = 216$

Диаметр трубок $d_e/d_i = 16/14$ мм

Площадь поверхности нагрева одной секции $F_{сек} = 40,1$ м²

Площадь живого сечения трубок $f_{TP} = 0,03325$ м²

Площадь межтрубного пространства $f_{MTP} = 0,05781$ м²

Продолжаем расчет по техническим данным%

1. эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_э = \frac{D_i^2 - n \cdot d_e^2}{D_i + n \cdot d_e} = \frac{359^2 - 216 \cdot 16^2}{359 + 216 \cdot 16^2} = 19,3 \text{ мм} = 0,0193 \text{ м}$$

2. действительная скорость нагреваемой воды в трубках

$$v_{TP} = \frac{q_{hr}}{f_{TP} \cdot \rho} = \frac{48,5}{0,03325 \cdot 1000} = 1,46 \text{ м/с}$$

3. скорость сетевой воды в межтрубном пространстве

$$v_{MTP} = \frac{G_{2h,max}}{f_{MTP} \cdot \rho} = \frac{116,4}{0,05781 \cdot 1000} = 2,0 \text{ м/с}$$

4. коэффициент теплоотдачи от сетевой воды к стенкам трубок

$$\begin{aligned} \alpha_{MTP} &= (1630 + 21 \cdot \tau_m - 0,041 \cdot \tau_m^2) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_э^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 50 - 0,041 \cdot 50^2) \cdot \frac{2^{0,8}}{0,0193^{0,2}} \\ &= 9884 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

5. коэффициент теплоотдачи от стенок трубок к нагреваемой воде

$$\begin{aligned} \alpha_{TP} &= (1630 + 21 \cdot t_m - 0,041 \cdot t_m^2) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 35 - 0,041 \cdot 35^2) \cdot \frac{1,46^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 7358 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

6. коэффициент теплоотдачи подогревателя

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{MTP}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{TP}}} = \frac{1}{\frac{1}{9884} + 0,00001 + \frac{1}{7358}} = 4047 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

где $\delta = 1$ мм, толщина трубки, $\lambda = 90-100$ Вт/м²К – коэффициент теплопроводности латуни.

7. требуемая площадь поверхности нагрева подогревателя

$$F = \frac{Q_{h,max}}{K \cdot \Delta t_m \cdot \mu} = \frac{19,54 \cdot 10^6}{4047 \cdot 12,43 \cdot 0,8} = 485,55 \text{ м}^2$$

где $\mu = 0,8$: коэффициент, учитывающий ухудшение теплообмена вследствие накипеобразования на поверхности нагрева

8. количество секций в подогревателе

$$n = \frac{F}{F_{\text{сек}}} = \frac{485,55}{40,1} = 12,1$$

Принимаем к установке 12 секций

9. определим потери давления

В межтрубном пространстве

$$\Delta p_{\text{мтр}} = 11 \cdot v_{\text{МТР}}^2 \cdot n = 11 \cdot 2^2 \cdot 12 = 528 \text{ кПа}$$

В трубках

$$\Delta p_{\text{тр}} = 5,3 \cdot v_{\text{ТР}}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 1,46^2 \cdot 12 = 135,6 \text{ кПа}$$

Отмечаем большие потери напора. Следовательно, необходимо выбрать по табл.3.1 другой подогреватель и провести перерасчет. Принимаем подогреватель 20 ОСТ 34-558-68 со следующими техническими данными:

Длина секции $l = 5624 \text{ мм}$

Внутренний диаметр корпуса $D_i = 408 \text{ мм}$

Количество трубок $n = 283$

Площадь поверхности нагрева одной секции $F_{\text{сек}} = 52,5 \text{ м}^2$

Площадь живого сечения трубок $f_{\text{ТР}} = 0,04356 \text{ м}^2$

Площадь межтрубного пространства $f_{\text{мтр}} = 0,07191 \text{ м}^2$

Проведем расчет принятого подогревателя

1. эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_э = \frac{D_i^2 - n \cdot d_e^2}{D_i + n \cdot d_e} = \frac{408^2 - 283 \cdot 16^2}{408 + 283 \cdot 16^2} = 19,04 \text{ мм} = 0,01904 \text{ м}$$

2. действительная скорость нагреваемой воды в трубках

$$v_{\text{ТР}} = \frac{q_{hr}}{f_{\text{ТР}} \cdot \rho} = \frac{48,5}{0,04356 \cdot 1000} = 1,13 \text{ м/с}$$

3. скорость сетевой воды в межтрубном пространстве

$$v_{\text{МТР}} = \frac{G_{2h,max}}{f_{\text{МТР}} \cdot \rho} = \frac{116,4}{0,07191 \cdot 1000} = 1,62 \text{ м/с}$$

4. коэффициент теплоотдачи от сетевой воды к стенкам трубок

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{мтр}} &= (1630 + 21 \cdot \tau_m - 0,041 \cdot \tau_m^2) \cdot \frac{v_{\text{ТР}}^{0,8}}{d_э^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 50 - 0,041 \cdot 50^2) \cdot \frac{1,62^{0,8}}{0,01904^{0,2}} \\ &= 8373 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

5. коэффициент теплоотдачи от стенок трубок к нагреваемой воде

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{тр}} &= (1630 + 21 \cdot t_m - 0,041 \cdot t_m^2) \cdot \frac{v_{\text{ТР}}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 35 - 0,041 \cdot 35^2) \cdot \frac{1,13^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 5995 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

6. коэффициент теплоотдачи подогревателя

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{мтр}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{тр}}}} = \frac{1}{\frac{1}{8373} + 0,00001 + \frac{1}{5995}} = 3376 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

7. требуемая площадь поверхности нагрева подогревателя

$$F = \frac{Q_{h,\text{max}}}{K \cdot \Delta t_m \cdot \mu} = \frac{19,54 \cdot 10^6}{3376 \cdot 12,43 \cdot 0,8} = 582 \text{ м}^2$$

8. количество секций в подогревателе

$$n = \frac{F}{F_{\text{сек}}} = \frac{582}{52,5} = 11,08$$

Принимаем к установке $n = 11$ секций

9. определим потери давления

В межтрубном пространстве

$$\Delta p_{\text{мтр}} = 11 \cdot v_{\text{МТР}}^2 \cdot n = 11 \cdot 1,62^2 \cdot 11 = 317,5 \text{ кПа}$$

В трубках

$$\Delta p_{\text{тр}} = 5,3 \cdot v_{\text{ТР}}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 1,13^2 \cdot 11 = 74,4 \text{ кПа}$$

Задача 3.2. Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по параллельной схеме.

При проведении расчета принимаем температуру горячей воды $t_h = 60^\circ\text{C}$, холодной $t_c = 5^\circ\text{C}$ для всех вариантов. Остальные данные принимаем из таблицы 3.3. При проведении расчета учитываем, что максимальный расход теплоты на ГВС связан со среднечасовым расходом теплоты на ГВС уравнением: $Q_{h\text{max}} = 2,4 \cdot Q_{hm}$

Таблица 3.3

Данные для расчета ВПУ, подключенного по параллельной схеме

N п/п	Среднечасовой расход воды на ГВС Q_{hm} , МВТ	Температура сетевой в подающем теплопроводе в точке излома графика регулирования τ'_1 , °C	Температура сетевой в обратном теплопроводе после подогревателя τ'_{32} , °C
1	8,15	70	30
2	6,5	65	35
3	10,4	68	32
4	9,3	66	31
5	8,6	69	34
6	7,2	67	32
7	11,4	70	33
8	7,16	65	31
9	9,3	68	30
10	5,6	66	35
11	8,7	69	32
12	7,3	67	31
13	6,4	70	34
14	9,1	65	32
15	7,4	68	33
16	10,7	66	31
17	5,1	69	30
18	4,6	67	35
19	8,5	70	32
20	5,4	65	31

3.3 Пример теплового и гидравлического расчета водоподогревательной установки системы горячего водоснабжения, присоединенной по смешанной схеме

Задача 3.3. Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки, присоединенной по двухступенчатой смешанной схеме.

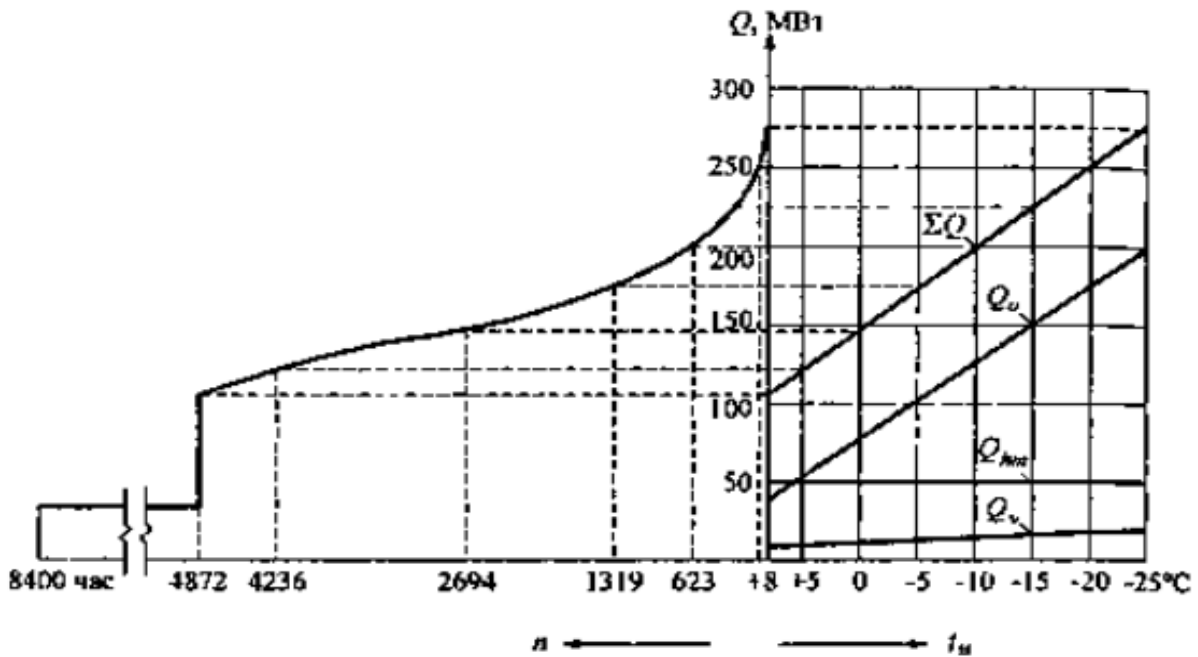


Рисунок 3.3 График часового и годового расходов теплоты

Исходные данные:

Тепловая нагрузка на отопление $Q_{отmax} = 400$ кВт, на горячее водоснабжение $Q_{гвmax} = 260$ кВт. Температура сетевой воды, соответствующая точке излома графика $\tau'_1 = 70^\circ\text{C}$, $\tau'_2 = 43^\circ\text{C}$. Температура холодной и горячей воды соответственно равны $t_c = 5^\circ\text{C}$, $t_h = 60^\circ\text{C}$. Расчетная температура сетевой воды по температурному графику в прямом и обратном теплопроводах $\tau_1 = 150^\circ\text{C}$, $\tau_2 = 70^\circ\text{C}$.

Последовательность расчета смешанной схемы:

1. Определим расход сетевой воды в зимнее время (в отопительный период)

На отопление

$$G_{отmax} = \frac{Q_{отmax}}{c \cdot (\tau_1 - \tau_2)} = \frac{400 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (150 - 70)} = 1,191 \text{ кг/с} \\ = 4287,8 \text{ кг/ч}$$

На горячее водоснабжения

$$G_{гвmax} = \frac{0,55 \cdot Q_{гвmax}}{c \cdot (\tau'_1 - \tau'_2)} = \frac{0,55 \cdot 260 \cdot 10^3}{4,198 \cdot (70 - 43)} = 1,219 \text{ кг/с} = 4387,99 \\ = 4388 \text{ кг/ч}$$

2. Расчетный расход на абонентский ввод

$$G_{dmax} = G_{omax} + G_{zhmax} = 1,191 + 1,219 = 2,41 \text{ кг/с} = 8675,8 \text{ кг/ч}$$

3. Расход нагреваемой воды для системы ГВС

$$q_{hr}^h = \frac{Q_{hmax}}{c \cdot (t_h - t_c)} = \frac{400 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (60 - 5)} = 1,732 \text{ кг/с} = 6236,7 \text{ кг/ч} \dots$$

4. Определим температуру нагреваемой воды на выходе из подогревателя первой ступени, приняв величину недогрева 5°C (можно принимать в пределах $5-10^\circ\text{C}$).

$$t' = \tau'_2 - 5 = 43 - 5 = 38^\circ\text{C}$$

5. Теплопроизводительность подогревателя второй и первой ступеней

$$Q_{hmax}^{II} = Q_{hmax} \cdot \frac{t_h - t'}{t_h - t_c} = 400 \cdot \frac{60 - 38}{60 - 5} = 160 \text{ кВт}$$

$$Q_{hmax}^I - Q_{hmax}^{II} = 400 - 160 = 240 \text{ кВт}$$

6. Температура сетевой воды на выходе из подогревателя первой ступени

$$\tau'_{2,1} = \tau'_2 - \frac{Q_{hmax}^I}{c \cdot G_{dmax}} = 43 - \frac{260 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot 8675,8} = 17,3^\circ\text{C}$$

7. Среднелогарифмические разности температур между греющей средой и нагреваемой в подогревателях первой и второй ступеней

$$\Delta t_{m,I} = \frac{(\tau'_{2,1} - t_c) - (\tau'_2 - t')}{\ln \frac{(\tau'_{2,1} - t_c)}{(\tau'_2 - t')}} = \frac{(17,3 - 5) - (43 - 38)}{\ln \frac{17 - 5}{43 - 38}} = 8,1^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{m,II} = \frac{(\tau'_1 - t_h) - (\tau'_2 - t')}{\ln \frac{(\tau'_1 - t_h)}{(\tau'_2 - t')}} = \frac{((70 - 60) - (43 - 38))}{\ln \frac{70 - 60}{43 - 38}} = 7,2$$

8. Средние температуры сетевой и нагреваемой воды в подогревателях первой и второй ступеней

$$\tau_{m,I} = 0,5 \cdot (\tau'_2 + \tau'_{2,1}) = 0,5 \cdot (43 + 17,3) = 30,15^\circ\text{C}$$

$$t_{m,1} = 0,5 \cdot (t' + t_c) = 0,5 \cdot (38 + 5) = 21,5^\circ\text{C}$$

$$\tau_{m,II} = 0,5 \cdot (\tau'_1 + \tau'_2) = 0,5 \cdot (70 + 43) = 56,5^\circ\text{C}$$

$$t_{m,II} = 0,5 \cdot (t_h + t') = 0,5 \cdot (60 + 38) = 49^\circ\text{C}$$

Задаемся скоростью нагреваемой воды $v = 1 \text{ м/с}$ и определяем площадь живого сечения трубного пространства подогревателя

$$f_{TP} = \frac{q_{hr}^h}{v_{TP} \cdot \rho} = \frac{1,732}{1 \cdot 10^3} = 1,731 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 0,001732 \text{ м}^2$$

К установке принимаем по табл.3.1 скоростной водоподогреватель типа 05 ОСТ 34-558-68 со следующими техническими данными:

Длина секции 2000 мм, внутренний диаметр корпуса $D_i = 82 \text{ мм}$, площадь поверхности нагрева одной секции $F_{сек} = 1,11 \text{ м}^2$, диаметр трубок $d_e/d_i = 16/14 \text{ мм}$, количество трубок $n = 12$, площадь живого сечения

межтрубного пространства $f_{MTP} = 0,00287 \text{ м}^2$, трубного пространства $f_{TP} = 0,00185 \text{ м}^2$.

9. Определим эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_{ee} = \frac{D_i^2 - n \cdot d_e^2}{D_i + n \cdot d_e} = \frac{82^2 - 12 \cdot 16^2}{82 + 12 \cdot 16} = 13,3 \text{ мм} = 0,0133 \text{ м}$$

10. Тогда действительная скорость нагреваемой воды в трубках подогревателя

$$v_{TP} = \frac{q_{hr}^h}{f_{TP} \cdot \rho} = \frac{1,731}{0,00185 \cdot 10^3} = 0,936 \text{ м/с}$$

11. Скорость сетевой воды в межтрубном пространстве водоподогревателей первой и второй ступеней

$$v_{MTP}^I = \frac{G_{dmax}}{f_{MTP} \cdot \rho} = \frac{2,41}{0,00287 \cdot 10^3} = 0,830 \text{ м/с}$$

$$v_{MTP}^{II} = \frac{G_{3h}}{f_{MTP} \cdot \rho} = \frac{1,219}{0,00287 \cdot 10^3} = 0,423 \text{ м/с}$$

12. Коэффициенты теплоотдачи от сетевой воды к стенкам трубок в подогревателях первой и второй ступеней

$$\begin{aligned} \alpha_{MTP}^I &= (1630 + 21 \cdot \tau_{m,I} - 0,041 \cdot \tau_{m,I}^2) \cdot \frac{v_{MTP}^{0,8}}{d_{ee}^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 30,15 - 0,041 \cdot 30,15^2) \cdot \frac{0,839^{0,8}}{0,0133^{0,2}} \\ &= 4594,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{MTP}^{II} &= (1630 + 21 \cdot \tau_{m,II} - 0,041 \cdot \tau_{m,II}^2) \cdot \frac{v_{MTP}^{0,8}}{d_{ee}^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 56,5 - 0,041 \cdot 56,5^2) \cdot \frac{0,423^{0,8}}{0,0133^{0,2}} \\ &= 3201,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

13. Коэффициенты теплоотдачи от стенок трубок к нагреваемой воде в подогревателях первой и второй ступеней

$$\begin{aligned} \alpha_{TP}^I &= (1630 + 21 \cdot t_{m,I} - 0,041 \cdot t_{m,I}^2) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 21,5 - 0,041 \cdot 21,5^2) \cdot \frac{0,936^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 4592,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \\ \alpha_{TP}^{II} &= (1630 + 21 \cdot t_{m,II} - 0,041 \cdot t_{m,II}^2) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_i^{0,2}} \\ &= (1630 + 21 \cdot 49 - 0,041 \cdot 49^2) \cdot \frac{0,936^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 5701,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

14. Определим теплопередачи для подогревателей первой и второй ступеней

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TP}^I} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{MTP}^I}} = \frac{1}{\frac{1}{4592,3} + 0,000013 + \frac{1}{4594,5}} = 2229,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TP}^{II}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{MTP}^{II}}} = \frac{1}{\frac{1}{5701,2} + 0,000013 + \frac{1}{3201,8}} = 1997,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$$

15. Требуемая площадь нагрева подогревателей первой и второй ступеней

$$F_I = \frac{Q_{hmax}^I}{K \cdot \Delta t_{m,I} \cdot \mu} = \frac{240 \cdot 10^3}{2229,7 \cdot 8,11 \cdot 0,8} = 16,6 \text{ м}^2$$

$$F_{II} = \frac{Q_{hmax}^{II}}{K \cdot \Delta t_{m,II} \cdot \mu} = \frac{160 \cdot 10^3}{1997,1 \cdot 8,11 \cdot 0,8} = 13,9 \text{ м}^2$$

16. Определим количество секций в подогревателях первой и второй ступенях

$$n_I = \frac{F_I}{F_{сек}} = \frac{16,6}{1,11} = 14,9 \approx 15 \text{ секций}$$

$$n_{II} = \frac{F_{II}}{F_{сек}} = \frac{13,9}{1,11} = 12,5 \approx 13 \text{ секций}$$

17. Потери давления в трубном и межтрубном пространстве подогревателей первой и второй ступени

$$\Delta p_{мтр}^I = 11 \cdot v_{мтр}^2 \cdot n = 11 \cdot 0,839^2 \cdot 15 = 116,14 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{тр}^I = 5,3 \cdot v_{тр}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 0,936^2 \cdot 15 = 69,5 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{мтр}^{II} = 11 \cdot v_{мтр}^2 \cdot n = 11 \cdot 0,423^2 \cdot 13 = 25,6 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{тр}^{II} = 5,3 \cdot v_{тр}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 0,936^2 \cdot 13 = 60,3 \text{ кПа}$$

Расчет подогревателей, подключенных по смешанной схеме, имеет следующую особенность: необходимо провести дополнительно расчет для летнего (неотопительного) периода.

В летний период расчетные параметры сетевой воды составляют:

$$\tau'_1 = 70^\circ\text{С}, \tau'_3 = 30^\circ\text{С}; \text{ температура холодной воды } t_c^s = 15^\circ\text{С}$$

1. Определим расход теплоты для горячего водоснабжения

$$Q_{hmax}^s = \frac{\beta \cdot Q_{hmax} \cdot (t_h - t_c^s)}{t_h - t_c} = \frac{0,8 \cdot 260 \cdot 10^3 \cdot (60 - 15)}{60 - 5} = 170,2 \text{ кВт}$$

2. Расход нагреваемой воды

$$q_{hr}^{sh} = \frac{Q_{hmax}^s}{c \cdot (t_h - t_c^s)} = \frac{170,2 \cdot 10^3}{4,198 \cdot 10^3 \cdot (60 - 15)} = 0,9 \text{ кг/с} = 3243,1 \text{ кг/ч}$$

3. Расход сетевой воды

$$G_{3hmax}^s = \frac{Q_{hmax}^s}{c \cdot (\tau'_1 - \tau'_3)} = \frac{170,2 \cdot 10^3}{4,198 \cdot (70 - 30)} = 1,014 \text{ кг/с} = 3648,9 \text{ кг/ч}$$

4. Среднелогарифмическая разность температур теплоносителей

$$\Delta t_m^s = \frac{(\tau_3' - t_c^s) - (\tau_1' - t_h)}{\ln \frac{(\tau_3' - t_c^s)}{(\tau_1' - t_h)}} = \frac{(30 - 15) - (70 - 60)}{\ln \frac{30 - 15}{70 - 60}} = 12,3^\circ\text{C}$$

5. Средние температуры нагреваемой и сетевой воды в подогревателе

$$\tau_m^s = 0,5 \cdot (\tau_1' + \tau_3') = 0,5 \cdot (70 + 30) = 50^\circ\text{C}$$

$$t_h^s = 0,5 \cdot (t_h + t_c^s) = 0,5 \cdot (60 + 15) = 37,5^\circ\text{C}$$

6. Скорость сетевой и нагреваемой воды в подогревателе

$$v_{TP} = \frac{q_{hr}^{hs}}{f_{TP} \cdot \rho} = \frac{0,9}{0,00185 \cdot 10^3} = 0,486 \text{ м/с}$$

$$v_{MTP} = \frac{G_{3hmax}^s}{f_{MTP} \cdot \rho} = \frac{1,014}{0,00287 \cdot 10^3} = 0,535 \text{ м/с}$$

7. Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{TP}^s = (1630 + 21 \cdot t_h^s - 0,041 \cdot t_h^{s2}) \cdot \frac{v_{TP}^{0,8}}{d_i^{0,2}}$$

$$= (1630 + 21 \cdot 37,5 - 0,041 \cdot 37,5^2) \cdot \frac{0,486^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 3111,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\alpha_{MTP}^s = (1630 + 21 \cdot \tau_m^s - 0,041 \cdot \tau_m^{s2}) \cdot \frac{v_{MTP}^{0,8}}{d_i^{0,2}}$$

$$= (1630 + 21 \cdot 50 - 0,041 \cdot 50^2) \cdot \frac{0,486^{0,8}}{0,014^{0,2}} = 2631,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

8. Коэффициент теплопередачи

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TP}^s} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{MTP}^s}} = \frac{1}{\frac{1}{3111,5} + 0,000013 + \frac{1}{2631,4}} = 1399,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

9. Поверхность нагрева подогревателя в летний период

$$F^s = \frac{Q_{hmax}^s}{K_L \cdot \Delta t_m^s \cdot \mu} = \frac{170,2 \cdot 10^3}{1399,6 \cdot 12,33 \cdot 0,8} = 12,33 \text{ м}^2$$

10. Количество секций подогревателя

$$n_I = \frac{F^s}{F_{сек}} = \frac{12,33}{1,11} = 11,1 \approx 12 \text{ секций}$$

Таким образом, в летний период включается только один подогреватель, при этом к его 11 секциям добавляется еще одна.

11. Потери давления в летнее время

$$\Delta p_{TP}^s = 5,3 \cdot v_{MTP}^2 \cdot n = 5,3 \cdot 0,483^2 \cdot 12 = 14,83,5 \text{ кПа}$$

$$\Delta p_{MTP}^s = 11 \cdot v_{MTP}^2 \cdot n = 11 \cdot 0,353^2 \cdot 12 = 16,4 \text{ кПа}$$

Задача 3.3 Провести тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки системы горячего теплоснабжения, присоединенной по смешанной схеме.

В соответствии с примером расчета 3.3 проводим расчет смешенной схемы подключения ВПУ. Данные для расчета принимаем по табл.3.4

Температура холодной и горячей воды соответственно равны $t_c = 5^{\circ}\text{C}$, $t_h = 60^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3.4

Данные для расчета ВПУ, подключенного по смешанной схеме

Параметр	Тепловая нагрузка на отопление $Q_{от}$ кВт	Тепловая нагрузка на ГВС $Q_{гвс}$ кВт	Температура сетевой воды, соответствующая точке излома графика $\tau'_1, ^{\circ}\text{C}$, .	Температура сетевой воды, соответствующая точке излома графика $\tau'_2, ^{\circ}\text{C}$.	Температуры сетевой воды температурного графика, $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4	5	6
1	800	720	65	34	125-65
2	600	500	67	35	130-67
3	500	380	66	36	128-66
4	400	350	70	38	132-70
5	450	400	70	40	129-70
6	350	300	70	33	115-70
7	300	260	67	41	118-67
8	420	400	69	39	122-69
9	690	650	68	33	135-68
10	710	700	70	38	150-70
11	315	290	70	40	140-70
12	560	510	68	42	145-68
13	490	440	66	34	128-66
14	720	700	70	40	132-70
15	550	500	70	40	129-70
16	410	380	70	32	115-70
17	360	320	67	39	118-67
18	330	300	69	40	122-69
19	680	650	66	38	128-66
20	340	290	70	42	132-70

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 3

1. В какой системе теплоснабжения (открытой или закрытой), устанавливаются водо-водяные подогреватели?
2. Для чего предназначены водоподогревательные установки (ВПУ)?
3. Какие параметры определяются при проведении теплового и гидравлического расчета ВПУ?
4. Для какого режима работы тепловой сети производится расчет ВПУ?
5. По какой схеме движутся потоки теплоносителей в скоростных секционных водоподогревателях?
6. По какой схеме подключаются водоподогреватели к тепловым сетям?
7. Как осуществляется выбор схемы подключения ВПУ?
8. Какие параметры определяются при проведении теплового расчета ВПУ?
9. В каких пределах находится величина скорости воды в трубках и межтрубном пространстве?
10. Назовите преимущества и недостатки схем подключения теплообменников ГВС.

4. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРЕКТ (КУРСОВУЮ РАБОТУ)

Расчет закрытой системы теплоснабжения

В таблице 4.1 приведены данные для выполнения курсового проекта (курсовой работы) на тему Расчет закрытой системы теплоснабжения. В соответствии с номером в списке группы обучающийся выбирает из таблицы 4.1 параметры для расчета.

Таблица 4.1

Задание на курсовой проект (курсовую работу)

Параметр	Географическое положение города	Расчетные температуры теплоносителя в прямом и обратном теплопроводах	Тип компенсатора	Тип прокладки тепловых сетей	Расход теплоты на отопление, $Q_{\text{отоп}}$, кВт	Расход теплоты на вентиляцию, $Q_{\text{вент}}$, кВт	Расход теплоты на ГВС (техн. нужды) $Q_{\text{гвс}}$, кВт
Вариант							
1	Курск	130-70	линзовый	К	210	300	50
2	Сочи	127-67	сальниковый	Б/к	105	260	34
3	Волгоград	140-70	П-образный	Н/земный	116	80	60
4	Астрахань	130-67	линзовый	К	78	110	12
5	Ростов-на-Дону	145-70	сальниковый	К	114	120	34
6	Салехард	140-70	сальниковый	Б/к	59	30	50
7	Тобольск	125-67	П-образный	Н/земный	67	80	42
8	Омск	117-70	сальниковый	Б/к	117	200	38
9	Москва	130-70	линзовый	Б/к	124	60	45
10	Иркутск	125-70	сальниковый	К	115	210	70
11	Брянск	127-67	П-образный	Н/земный	69	45	30
12	Ялта	115-70	линзовый	К	73	100	52
13	Ставрополь	113-67	линзовый	Б/к	114	120	60
14	Якутск	140-70	П-образный	Н/земный	55	79	30
15	Донецк	125-70	линзовый	Б/к	102	79	45
16	Владивосток	130-70	линзовый	К	140	100	40
17	Петрозаводск	140-70	сальниковый	К	123	90	39
18	Санкт-Петербург	125-70	П-образный	Н/земный	89	115	15
19	Краснодар	130-70	сальниковый	К	213	200	40
20	Калининград	150-70	линзовый	Б/к	302	320	60
21	Новосибирск	137-70	сальниковый	Б/к	189	150	59
22	Самара	137-67	П-образный	Н/земный	250	200	70
23	Ульяновск	130-70	сальниковый	К	340	150	60
24	Казань	140-70	линзовый	К	215	300	50
25	Ярославль	145-70	П-образный	Н/земный	140	100	35

Примечание: тип прокладки – К – канальный; Б/к – бесканальный, Н/земный – надземный
Тип изоляционного материала подобрать самостоятельно, если тип материала не указан в задании.

Содержание курсового проекта (курсовой работы)

1. Описание системы теплоснабжения
2. Определение расчетных тепловых потоков на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. Построение графиков часовых расходов теплоты на отопление, вентиляцию и ГВС, а также годовых графиков теплотопотребления по продолжительности тепловой нагрузки и по месяцам.
3. Регулирование отпуска теплоты в закрытых системах.
4. Определение расчетных расходов теплоносителя
5. Разработка расчетной схемы и конструкции тепловой сети
6. Гидравлический расчет системы теплоснабжения
7. Построение пьезометрического графика
8. Подбор сетевых и подпиточных насосов
9. Механический расчет тепловой сети. Определение нагрузок на опоры
10. Механический расчет тепловой сети. Расчет компенсаторов.
11. Расчет теплоизоляционной конструкции
12. Тепловой и гидравлический расчет водоподогревательной установки

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров А. К. Теплоснабжение района города : учебное пособие / А. К. Тихомиров. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. Ун-та, 2006. – 135 с. – Текст : непосредственный.
2. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое проектирование / под редакцией профессора Б. М. Хрусталева. – Москва : АСВ. – 784 с. – Текст : непосредственный.
3. Антонова Е. О. Источники и системы теплоснабжения в примерах и задачах.: Учебное пособие /О.А. Степанов, Е. О. Антонова, Н.В. Рыдалина ; Тюменский индустриальный университет. – Тюмень : Издательский центр БИК ТИУ, 2021. – 89 с. – Текст : непосредственный.
4. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей : справочник / В. И. Манюк, Я. И. Каплинский, Э. Б. Хиж [и др.]. – 3-е изд. перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1988. – 432 с. – Текст : непосредственный.
5. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети : [утверждены и введены в действие постановлением Госстроя России от 24.06.2003. № 210 : введены с 2003.09.01]. – Санкт-Петербург : Полиграфия, 2004. – 74 с. – (Строительные нормы и правила РФ) – Текст : непосредственный.
6. СНиП 23-01-99. Строительная климатология : [приняты и введены в действие постановлением Госстроя России от 11.06.99 № 45]. – Москва : ГУП ЦПП, 2000. – 57 с. – Текст : непосредственный.

Учебное издание

Степанов Олег Андреевич
Антонова Елена Олеговна
Рыдалина Наталья Владимировна

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Часть 2

В авторской редакции

Подписано в печать 05.09.2024. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 5,13.
Тираж 500 экз. Заказ № 2863.

Библиотечно-издательский комплекс
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тюменский индустриальный университет».
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38.

Типография библиотечно-издательского комплекса.
625039, Тюмень, ул. Киевская, 52.