

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 14.09.2023 16:47:59

Уникальный программный ключ:


9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
Образовательное учреждение высшего образования
«Юго–Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)
Кафедра теплогазоснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной
работе


О.Г. Локтионова
«12» 09 2023 г.



РАСЧЕТНО-ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРОДСКИХ И ПОСЕЛКОВЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Методические указания для курсового проектирования,
практических занятий и самостоятельной работы магистров
направления подготовки 08.04.01 - Строительство, 13.04.01 -
Теплоэнергетика и теплотехника

Курск 2023

УДК 697.2(07)

Составители: Е.В. Умеренков , Э.В. Умеренкова

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
теплогазоводоснабжения Т.В. Поливанова

Расчетно-оптимизационные задачи проектирования городских и поселковых систем теплоснабжения: методические указания для практических занятий, курсового проектирования и самостоятельной работы магистров направления подготовки 08.04.01 - Строительство, 13.04.01 - Теплоэнергетика и теплотехника /Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Е.В. Умеренков , Э.В. Умеренкова. Курск, 2023. 60 с.: ил.19, табл.5. Библиогр.: с. 60 .

Содержатся краткие теоретические сведения и методики выполнения тепловых и гидравлических расчетов оптимизационных задач проектирования городских и поселковых систем теплоснабжения.

Предназначено для магистров направления подготовки 08.04.01 - Строительство, 13.04.01 - Теплоэнергетика и теплотехника, а также может быть полезно работникам научных и проектных организаций, занимающихся централизованным теплоснабжением.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл.печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 3,16 Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно. 195

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Оглавление

Введение	4
1. Общие положения.....	5
2. Краткие теоретические сведения	6
3. Расчетно-оптимизационные задачи теплоснабжения.....	9
3.1 Регулирование отпуска теплоты и присоединение потребителей к тепловым сетям.....	9
3.2. Расчет графиков температур сетевой воды.....	11
3.3. Постановка задачи гидравлического расчета	12
3.4. Подбор оптимальных располагаемых напоров	19
3.5. Подбор диаметров труб на участках сети	30
3.6. Алгоритм гидравлического расчета.....	34
4. Примеры решения задач.....	38
Библиографический список	60

Введение

В настоящих рекомендациях излагаются методические материалы по решению оптимизационных расчетов тепловой сети и расчетов ее надежности.

На сегодняшний день не вызывает сомнений необходимость учёта при проектировании систем теплоснабжения технико-экономических критериев и уровня надежности. Разработаны достаточно глубокие научные основы, алгоритмы и программные средства, обеспечивающие возможность такого учёта. Более того, соответствующие требования закреплены в действующих нормативных документах.

Однако в практике реального проектирования указанные вопросы, как правило, решаются "по старинке", на основе интуиции и опыта проектировщиков и также принятых в каждой конкретной организации нормативов. Объясняется это, во-первых, отсутствием у специалистов соответствующей подготовки, во-вторых, сложностью разработанных на сегодняшний день алгоритмов, самостоятельное освоение которых весьма затруднительно.

Настоящие рекомендации дают возможность магистрам и специалистам в области теплоснабжения познакомиться с возможными подходами к решению указанных задач с учётом современных требований. Предлагаемый в настоящем пособии подход, не требует знания стоимостных характеристик и позволяет выбор оптимального варианта сети без их перебора.

1. Общие положения

Одним из важнейших этапов проектирования системы теплоснабжения является выбор трассы тепловой сети. Поскольку в задании на проектирование отсутствуют какие-либо сведения о естественных препятствиях (водоемы, овраги, заболоченные места и т.д.) и существующих и ранее запроектированных инженерных коммуникациях (водопровод, канализация, электрические и телефонные кабели и т.д.), при выборе конфигурации трассы следует руководствоваться:

- экономичностью (наименьшая длина и количество инженерных сооружений сети, камеры, ниши и т.п.);
- надежностью эксплуатации;
- равномерным распределением тепловой нагрузки;
- отсутствие участков с обратным ходом теплоносителя;
- максимально возможным использованием углов поворота трассы для самокомпенсации температурных удлинений трубопроводов (от 90 до 130°).

Следующим важным моментом проектирования системы теплоснабжения является выбор способа прокладки тепловой сети. В населенных пунктах преимущественно используется подземная прокладка. Причем, при диаметре труб до 400 мм согласно [4] следует отдавать предпочтение бесканальной прокладке, например с использованием предизолированных труб (технология АВВ). Однако, учитывая отсутствие промышленной базы по нанесению изоляции трубопроводов в заводских условиях, а также наличие комбинатов по изготовлению железобетонных изделий, в данном случае принимаем подземную прокладку в непроходных каналах из лотковых элементов.

Другой вопрос, требующий решения на предварительном этапе – выбор способа компенсации температурных удлинений на прямолинейных участках трассы. В настоящее время разработано достаточно большое количество компенсационных устройств с невысокой металлоемкостью и малым гидравлическим сопротивлением (сильфонные, сальниковые, манжетные и др.). Однако использование в них дорогостоящих материалов и

изделий, например, нержавеющей стали, а также необходимость обслуживания при эксплуатации и сложность монтажа не позволяют рассчитывать на их широкое практическое применение. До сегодняшнего дня наиболее распространены гнутые, в частности П-образные компенсаторы, не требующие надзора и обслуживания. В связи со сказанным принимаем компенсаторы данного типа.

В системах теплоснабжения закрытого типа, как правило, предусматривается сооружение центральных тепловых пунктов (ЦТП), каждый из которых обеспечивает теплоснабжение одного или нескольких жилых кварталов района в зависимости от суммарной тепловой нагрузки (строительство ЦТП при нагрузках не превышающих 7 МВт нецелесообразно).

2. Краткие теоретические сведения

Для проектирования системы теплоснабжения необходимо определить расчетные потоки теплоты на отдельные виды теплопотребления жилых и общественных зданий района застройки (отопление, вентиляция, горячее водоснабжение), а также суммарную тепловую нагрузку. Речь идет о максимальных потоках теплоты на отопление Q_{0max} и вентиляцию Q_{vmax} , среднем (за отопительный период) Q_{hm} и максимальном Q_{hmax} потоках теплоты на горячее водоснабжение.

Расчет выполняется методом укрупненных показателей, регламентированным [4].

Максимальный поток теплоты на отопление жилых и общественных зданий:

$$Q_{0max} = q_0 \cdot (1+k_1) \cdot A,$$

где q_0 – укрупненный показатель максимального теплового потока на отопление жилых зданий, согласно [4], Вт/м²;

k_1 – коэффициент, учитывающий тепловой поток на отопление общественных зданий; $k_1=0,25$.

Максимальный тепловой поток теплоты на вентиляцию жилых и общественных зданий:

$$Q_{v\max} = q_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot A,$$

где k_2 – коэффициент, учитывающий тепловой поток на вентиляцию общественных зданий; $k_2 = 0,6$.

Средний тепловой поток на горячее водоснабжение рассчитывают, как:

$$Q_{hm} = q_{\text{h}}^m \cdot m,$$

где q_{h}^m - укрупненный показатель среднего теплового потока на горячее водоснабжение; при суточной норме водопотребления $a = 105$ л/чел [4] с учетом общественных зданий.

Максимальный тепловой поток на горячее водоснабжение определяем по формуле

$$Q_{h\max} = k \cdot Q_{hm},$$

где k – коэффициент неравномерности, равный 2,4.

Полагая, что баки-аккумуляторы горячей воды в районах теплоснабжения не устанавливаются, суммарные потоки теплоты Q находят как

$$Q = Q_{o\max} + Q_{v\max} + Q_{h\max}.$$

Для выполнения гидравлического расчета системы теплоснабжения необходимо знание расходов сетевой воды, которые в распределительных сетях складываются из составляющих, обусловленных соответствующими видами потребления. Суммарные расходы G_d , кг/с, при регулировании отпуска теплоты по совместной нагрузке отопления и горячего водоснабжения (повышенный график температур сетевой воды), определяются по формуле [4]:

$$G_d = G_{o\max} + G_{v\max},$$

где $G_{o\max}$ и $G_{v\max}$ – расчетные расходы воды на отопление и вентиляцию соответственно, кг/с.

Значения $G_{o\max}$ и $G_{v\max}$ для каждого квартала рассчитываются по формуле:

$$G_{o(v)\max} = Q_{o(v)\max} / [c(\tau_{1\max} - \tau_{20\max})]$$

где c – теплоемкость воды, принимаемая в расчетах равной 4187 Дж/(кг°С). Индексы “о” и “v” относятся к расходам на отопление и вентиляцию соответственно.

Знание суммарного расхода теплоносителя $G_d = \sum G_{di}$ позволяет выбрать сетевой насос системы теплоснабжения. Его подбор (типа СЭ или СД для воды с температурой до 180°С, см. прлож.9) выполняют по характеристикам [9] таким образом, чтобы требуемый расход воды соответствовал рабочей части характеристики. При возможности использования различных типоразмеров предпочтение следует отдавать насосу с умеренными (до 100 м в.ст.) напорами.

3. Расчетно-оптимизационные задачи теплоснабжения

3.1. Регулирование отпуска теплоты и присоединение потребителей к тепловым сетям

Вопросы выбора способа центрального регулирования отпуска теплоты и присоединения потребителей к тепловой сети в определенной степени взаимосвязаны, поэтому их целесообразно рассматривать совместно.

Согласно [4] для водяных тепловых сетей следует, как правило, принимать качественное регулирование отпуска теплоты путем изменения (на источнике) температуры сетевой воды в зависимости от температуры наружного воздуха. При этом, в случае преобладающей жилищно-коммунальной тепловой нагрузки (более 65%) качественное регулирование должно осуществляться по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения (повышенный график температур) не зависимо от типа системы теплоснабжения.

Что касается присоединения потребителей к тепловой сети, то при его выборе необходимо учитывать особенности, обусловленные типом системы теплоснабжения.

Закрытая система теплоснабжения. В настоящее время в микрорайонах, как правило, предусматривается сооружение центральных тепловых пунктов (ЦТП), в которых устанавливаются подогреватели горячего водоснабжения.

Согласно [8] присоединение водоподогревателей к тепловой сети при соотношении максимальных тепловых потоков на горячее водоснабжение и на отопление $Q_{hmax} / Q_{omax} = 0,2...1,0$ следует принимать по двухступенчатой схеме, при прочих соотношениях – по одноступенчатой параллельной. Последнее характерно лишь для отдельных потребителей с очень малой или, наоборот, очень большой нагрузкой горячего водоснабжения. Поэтому в типовых ЦТП жилых районов используется, в основном, двухступенчатое присоединение подогревателей [10].

Решение вопроса о типе двухступенчатой схемы – смешанная или последовательная, неоднозначно.

Однако в ряде источников [8, 9, 15] оно прямо увязывается со способом центрального качественного регулирования отпуска теплоты, а именно - при регулировании по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения рекомендуется принимать двухступенчатую последовательную схему присоединения подогревателей горячего водоснабжения к тепловой сети. При этом должна быть предусмотрена возможность ее переключения на двухступенчатую смешанную.

Помимо водоподогревателей в ЦТП размещаются также: циркуляционно-повысительные насосы сети ГВС, корректирующие насосы сети отопления, оборудование для обработки исходной водопроводной воды. Кроме того устанавливают запорную, регулирующую и предохранительную арматуру, контрольно-измерительный приборы и элементы автоматизации.

В курсовом проекте следует обосновать выбор схемы ЦТП и привести в расчетно-пояснительной записке ее достаточно подробное изображение с расшифровкой условных обозначений . При этом необходимо предусмотреть (помимо обычно указываемых элементов) регулятор расхода сетевой воды на отопление, летнюю перемычку, оборудование для умягчения и деаэрации (упрощенно), а также бак-аккумулятор нагреваемой воды.

При непосредственном водоразборе, (открытая система теплоснабжения), из тепловой сети устройство ЦТП также возможно (в частности, при независимом присоединении систем отопления), однако на практике распространено мало. Поэтому в случае открытой системы следует привести схему местного теплового пункта (МТП) [8]. Следует иметь в виду, что при регулировании отпуска теплоты по совместной нагрузке (см. выше) регулятор расхода сетевой воды на абонентском вводе устанавливается перед ответвлением на горячее водоснабжение [7].

Согласно [8] независимо от наличия ЦТП в каждом здании должно предусматриваться устройство индивидуального теплового пункта (ИТП).

При этом в ИТП реализуются те функции, которые необходимы для присоединения систем потребления теплоты данного здания и не предусмотрены в ЦТП, например, понижение температуры сетевой воды до 105 – 95 °С при поступлении ее из тепловой сети в системы

отопления. Кроме того, в ИТП устанавливают запорную арматуру, контрольно-измерительные приборы, и приборы учета потребления теплоты и горячей воды. В некоторых случаях с учетом особенностей гидравлического режима на вводе тепловой сети в зданиях предусматривается защита местных систем от повышенного (пониженного) давления теплоносителя тепловой сети путем установки регуляторов давления.

3.2. Расчет графиков температур сетевой воды

Для расчета повышенного графика температур сначала рассчитываем отопительно-бытовой график. При этом наружная температура воздуха в точке излома t_{ex} определяется численно. Температуру обратной воды после систем отопления в диапазоне $t_{ex} < t < 8$ условно считаем постоянной и изображаем на графике горизонтальной прямой, проходящей на уровне τ_{20min} , значение которой рассчитываем при $t = t_{ex}$.

Расчетные температуры сетевой воды τ_{1max} и τ_{20max} принимаем в соответствии с заданием $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; максимальную температуру воды перед системами отопления τ_{10max} согласно [6] – $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, а минимальную температуру воды в подающем трубопроводе τ_{1min} $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. В соответствии с [7] расчет температуры сетевой воды в подающем трубопроводе τ_1 и после систем отопления τ_{20} в зависимости от наружной t выполняем по формулам:

$$\tau_1 = t_i + (\delta\tau_{omax} - 0,5 \cdot \Theta_{omax}) \cdot \frac{t_i - t}{t_i - t_o} + \Delta t_{omax} \cdot \left[\frac{t_i - t}{t_i - t_o} \right]^{0,8}$$

$$\tau_{20} = t_i - 0,5 \cdot \Theta_{omax} \cdot \frac{t_i - t}{t_i - t_o} + \Delta t_{omax} \cdot \left[\frac{t_i - t}{t_i - t_o} \right]^{0,8}$$

где $\delta\tau_{omax}$ – расчетный перепад температуры воды в тепловой сети равный $\tau_{1max} - \tau_{20max} = 150 - 70 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; Θ_{omax} – то же в системах отопления, т. е. $\tau_{10max} - \tau_{20max} = 105 - 70 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$; Δt_{omax} – расчетный температурный напор между теплоносителем систем отопления и внутренним воздухом отапливаемых помещений, равный

$$\Delta t_{\text{оmax}} = \frac{\tau_{10\text{max}} + \tau_{20\text{max}}}{2} = \frac{105 + 70}{2} - 18 = 69,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Наличие отопительно-бытового графика позволяет построить повышенный, расчет которого сводится к определению перепадов температур сетевой воды в верхней ($\delta_1 = \tau_1 - \tau_{10}$) и нижней ($\delta_2 = \tau_{20} - \tau_2$) ступенях водоподогревательной установки. Расчет выполняем для типового абонента, отношение которого $\rho = Q_{\text{hm}}/Q_{\text{оmax}}$ равно таковому для всего района теплотребления в целом; температуру горячей воды t_h принимаем $60 \text{ } ^\circ\text{C}$. Методика расчета повышенного графика приведена в [7]. При этом суммарный перепад температур сетевой воды в подогревателях верхней и нижней ступеней $\delta = \delta_1 + \delta_2$ не зависит от наружной температуры и определяется по соотношению:

$$\delta = \chi^\delta \times \rho \times \delta \tau_{\text{оmax}},$$

где χ^δ - балансовый коэффициент, учитывающий неравномерность суточного графика горячего водоснабжения, обычно $\chi^\delta = 1, 2$.

3.3. Постановка задачи гидравлического расчета

Рассмотрим задачу прямого гидравлического расчета двухтрубной тупиковой сети.

Имеем двухтрубную сеть, например распределительную или внутриквартальную, схема которой показана на рис. 1. Представим ее в формализованном виде, выделив в сети главную (расчетную) магистраль (ГМ) таким образом, чтобы каждый потребитель был присоединен к ней самостоятельным ответвлением (пока полагаем, что это возможно). Пример формализованной схемы (в общем случае для n потребителей) приведен на рис. 2. Как и ранее, введем нумерацию потребителей, участков ГМ, узловых точек (от начальной точки к конечному (n -му) потребителю).

Исходными данными для выполнения расчета являются: расчетные расходы сетевой воды потребителями - G_1, G_2, \dots, G_n ,

длины участков ГМ - $l_{m1}, l_{m2}, \dots, l_{mn}$, то же ответвлений - $l_{o1}, l_{o2}, \dots, l_{on-1}$. Кроме того, считаем известными располагаемые напоры в начальной точке сети H_{r1} и на вводах потребителей (концевые напоры) - $H_{k1}, H_{k2}, \dots, H_{kn}$. Действительно, при известных схемах присоединения местных систем теплоснабжения к тепловой сети значения H_{ki} могут быть оценены. Например, для элеваторного присоединения систем отопления согласно СНиП 2.04.07.-86 - $H_k \geq 15 \text{ м в ст.}$

Задача заключается в определении диаметров теплопроводов, т.е. в выполнении гидравлического расчета. Она может быть решена, если известны потери напора на каждом участке $\Delta H = H_N - H_K$ (H_N и H_K - располагаемые напоры в начале и конце участка соответственно). Однако, известными являются лишь суммарные потери напора в главной магистрали ΔH_m , от начальной точки до конечного потребителя, так как располагаемые напоры в них заданы по условию задачи:

$$\Delta H_m \leq H_{r1} - H_{kn}$$

При этом здесь и в дальнейшем будем полагать, что потери напора в падающем и обратном трубопроводах одинаковы, т.е. пьезометрический график сети симметричен. Для закрытой системы теплоснабжения такое допущение вполне оправдано, для открытой - при отсутствии водоразбора.

Таким образом, для решения задачи подбора диаметров необходимо предварительно выяснить распределение ΔH_{mi} , удовлетворяющих условию:

$$\sum_1^n \Delta H_{mi} = \Delta H_m.$$

С другой стороны, ΔH_{mi} ($i = 1, 2, \dots, n$) могут быть найдены, если известны располагаемые напоры в узловых точках магистрали H_{ri} ,

так как $\Delta H_{m_i} = H_{r_i} - H_{r_{i+1}}$. Более того, знание H_{r_i} ($i = 1, 2, \dots, n, n+1$; в $n+1$ -ой точке, являющейся узлом ввода сети в конечной потребитель, располагаемый напор известен, т.е. $H_{r_{n+1}} = H_{k_n}$) позволяет определить потери напора в ответвлениях

$$\Delta H_{0_i} = H_{r_{i+1}} - H_{k_i}$$

и решить задачу подбора их диаметров.

Итак, решение задачи гидравлического расчета рассматриваемой сети может быть выполнено в следующей последовательности: определение располагаемых напоров в узловых точках главной магистрали H_{r_i} , расчет потерь напора на ее участках ΔH_{m_i} и подбор диаметров. Начнем с первого этапа.

Очевидно, что перечисленных выше исходных данных для поиска H_{r_i} недостаточно. Необходимо наличие некоторых дополнительных условий, делающих задачу гидравлического расчета однозначной. В качестве такого условия, в соответствии с [11], используется допущение о равномерности потерь давления (напора) вдоль главной магистрали, когда:

$$\Delta H_{m_i} = H_{r_i} - H_{r_{i+1}} = (H_{r_i} - H_{k_n}) \cdot \frac{l_{m_i}}{\sum_{l=i}^n l_{m_l}}$$

В качестве ГМ принимают линию соединяющую начальную точку сети (источник теплоснабжения) и наиболее удаленный потребитель. ЦТП кварталов, присоединенных к магистрали в одном узле, рассматриваются как один потребитель с суммарным расходом сетевой воды.

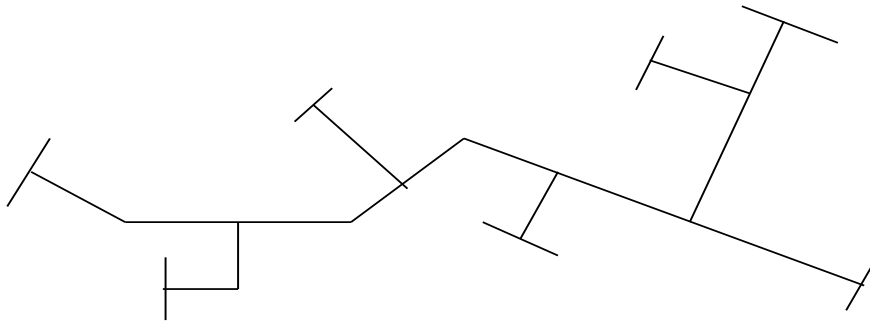


Рис. 3.1

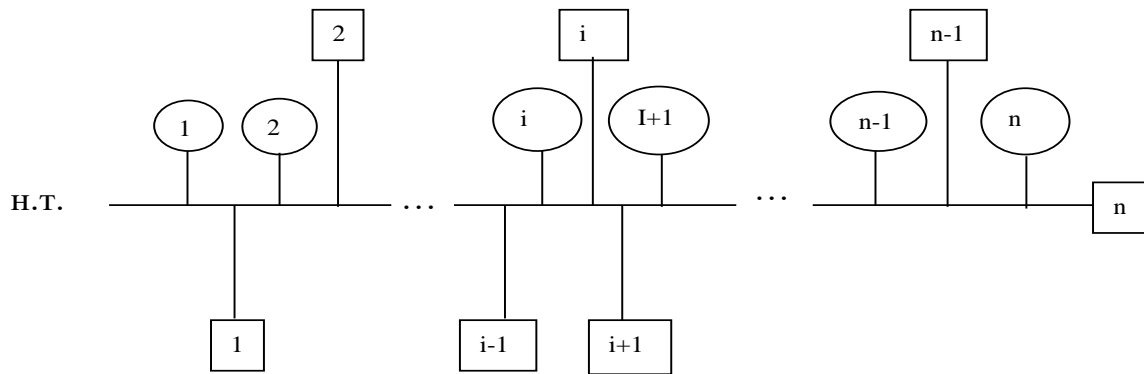


Рис.3.2

Гидравлический расчет тепловой сети выполняется в соответствии с [11] при условии равномерных потерь давления вдоль главной магистрали (ГМ). Располагаемый напор в начале сети представляет собой напор развиваемый сетевым насосом за вычетом потерь в пределах источника теплоты, которые согласно [11] могут быть оценены в размере 20-25 м в.ст.

Что касается конечного напора, то рекомендуемые на вводе ЦТП значения, обеспечивающие нормальные гидравлические и тепловые режимы присоединенных систем, находятся в пределах 30-35 м в.ст. [11].

Суммарные потери напора от начальной точки участка (и сети в данном случае – Н.Т.) до конечного узла главной магистрали

$$\Delta H = H_{HT} - H_K$$

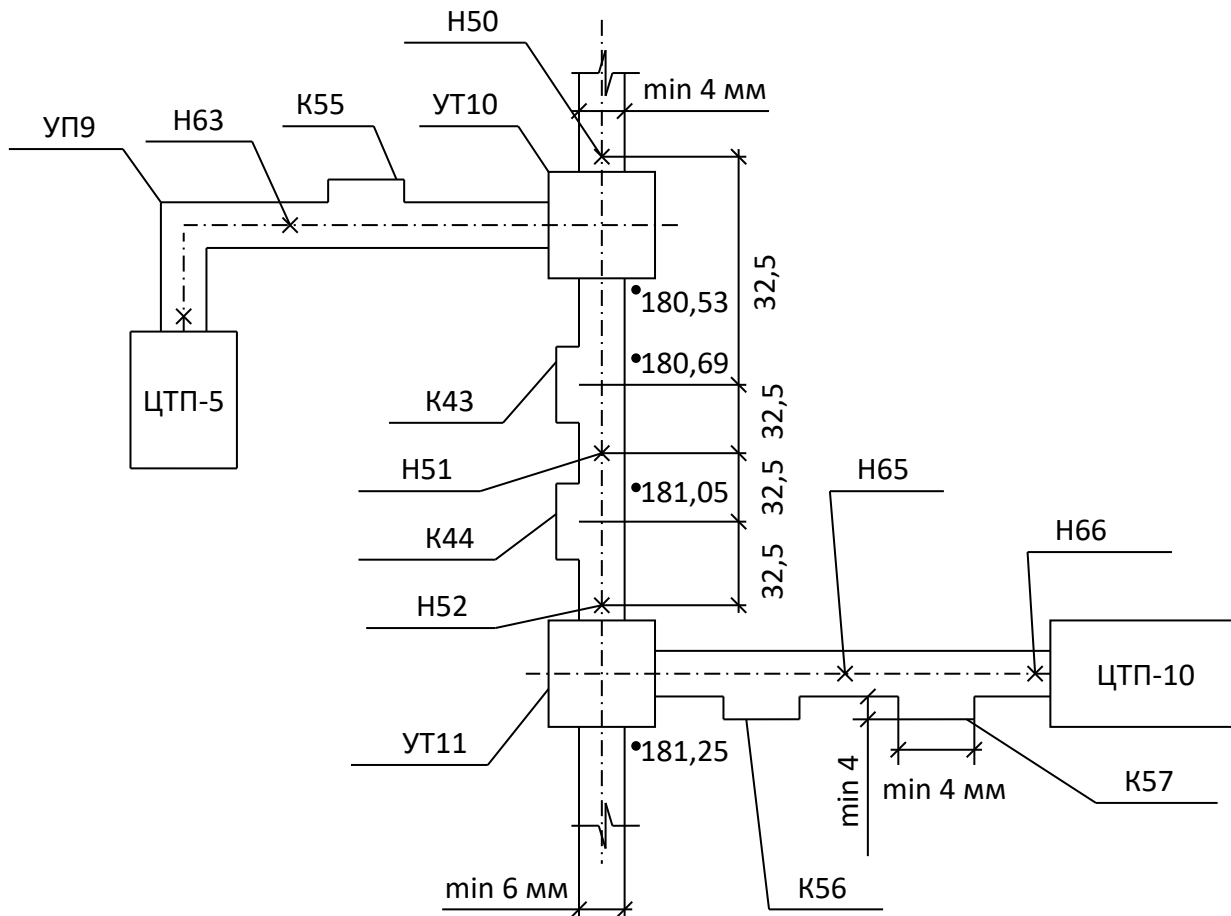


Рис.3.3 - План участка сети

где ННТ и НК – начальный и конечный располагаемые напоры, м в.ст.

Тогда, при вышеуказанном условии потери на 1-ом участке (в начальном приближении) составят

$$\Delta H_m^o = \Delta H \times \frac{l_{m1}}{\sum_1^n l_{mi}},$$

где l_{mi} – длина i -го участка ГМ, м.

Удельные линейные потери напора R , Па/м в начальном приближении оценим, как

$$R_o = \frac{\Delta H_o \times \rho \times g}{l_o \times (1 + \alpha_o)},$$

где α_o – доля местных потерь напора, ориентировочно принимаем 0,3.

Расход воды на данном участке магистрали при заданных расходах потребителей G_i , кг/с равен

$$G_{m1} = \sum_1^n G_i.$$

Оценивается также предварительная величина суммарного коэффициента местных сопротивлений на участке ξ_o . В общем случае

$$\xi_o = n_a^o \times \xi_a + n_k^o \times \xi_k + n_y^o \times \xi_y + n_{mp}^o \times \xi_{mp},$$

где ξ_a , ξ_k , ξ_y , ξ_{tr} – коэффициенты сопротивления запорной арматуры, компенсатора, угла поворота, тройника соответственно, рекомендуемые значения которых могут быть приняты по [9] (см. прилож. 10);

n_{oa} , n_{ok} , n_{oy} , n_{otr} – первоначально принятое на участке количество соответствующих местных сопротивлений.

Знание ΔR_m , G_m и ξ по таблицам гидравлического расчета [9] (см. прилож. 10) позволяет определить внутренний диаметр теплопровода на участке dm , знание которого позволяет при необходимости уточнить количество компенсаторов на участке (в зависимости от максимально допустимого для данного диаметра расстояния между неподвижными опорами [13], см.прилож.18), а затем и коэффициент местных сопротивлений как

$$\xi = \xi_o \pm \xi_{доп},$$

где $\xi_{доп}$ – коэффициент дополнительных сопротивлений (знак «-» используется, например, в случае уменьшения предварительного количества компенсаторов n_{ok}).

Отличие окончательных значений ΔR_m и ξ от начальных приводит к отклонению фактических потерь напора на участке ΔH_m от предварительно найденных ΔH_{om} .

Таким образом, фактические потери напора составят

$$\Delta H_m = \frac{R_o \times (l_o + l_{oe})}{\rho \times g} \quad , \text{ м}$$

где l_{oe} - эквивалентная длина местных сопротивлений, м для выбранного диаметра, определяемая как

$$l_{oe} = 60,8 \times d_o^{1,25} \times \xi_o$$

В свою очередь, знание фактических потерь напора на 1-ом участке позволяет найти располагаемый напор в узле 1

$$H_{r1} = H_{HT} - \Delta H_{m1}.$$

Далее полагая, что суммарные потери $\Delta H = H_{r1} - H_k$ также равномерно распределены вдоль ГМ, аналогичным описанному способом находим диаметр 2-го участка ($\Delta H_{om2} \rightarrow G_{m2} \rightarrow \xi_{o2} \rightarrow d_{om2} \rightarrow d_{m2} \rightarrow \xi_2 \rightarrow \Delta H_{m2} \rightarrow H_{r2}$) и всех последующих.

Результатом расчета помимо диаметров d_{mi} являются потери напора ΔH_{mi} и располагаемые напоры в узловых точках H_{ri} в том числе на вводе конечного потребителя, отличие которого от исходной величины H_k можно рассматривать в качестве критерия правильности расчета. Согласно [11] отклонение в меньшую сторону не должно превышать 10%, в большую – 15%. При несоблюдении этих условий на каких-либо участках следует изменить диаметры и произвести соответствующий пересчет.

3.4. Подбор оптимальных располагаемых напоров

Рассмотренный выше алгоритм, позволяющий последовательно, начиная с первого участка (H_{r1} задано) определить все располагаемые напоры и потери, весьма прост. Однако использованное при его реализации условие равномерности потерь ничем не обосновано. В то же время, согласно действующих норм проектирования (СНиП 2.04.07-86), необходимо технико-экономическое обоснование, т.е. искомые параметры (в данном случае располагаемые напоры H_{r_i}) должны быть определены из условия оптимума некоторого технико-экономического критерия. Попытаемся разработать способ гидравлического расчета в большей степени соответствующий указанному требованию.

Известно, что критерием оптимальности параметров технической системы является минимум приведенных затрат Π , руб/год, рассчитываемых в общем случае (при сроке строительства до 1-го года), как

$$\Pi = K \cdot (E_n + f) + C,$$

где K – стоимость системы (капитальные вложения), руб; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год; f – доля годовых отчислений от первоначальной стоимости объекта, 1/год; C – годовые эксплуатационные издержки, руб/год.

Для тепловых сетей эксплуатационные затраты складываются из стоимости электроэнергии, необходимой для привода циркуляционных насосов C_{Σ} , тепловых потерь трубопроводами St и расходов на обслуживание сети $Собсл$. Как показывает анализ, основное влияние на оптимизацию параметров сети оказывает величина C_{Σ} ; влияние составляющих St и $Собсл$ в значительном диапазоне их изменения мало ощутимо, и им можно пренебречь. С другой стороны, при фиксированном начальном располагаемом напоре H_{r1} (суммарных потерях напора) и постоянном расходе теплоносителя G_{m1} , что соответствует наиболее распространенному случаю центрального качественного регулирования, величина C_{Σ} не зависит от распределения потерь

давления по участкам сети. Таким образом, в рассматриваемой постановке ($H_{r1} = idem$) переменной частью приведенных затрат, а следовательно целевой функцией задачи, является стоимость сети K .

Согласно Соколову Е.Я., затраты K могут быть выражены через диаметры и длины участков сети:

$$K = a \cdot \sum l_i + b \sum d_i \cdot l_i, \quad (3.1)$$

где a , руб/м и b , руб/м² – коэффициенты, зависящие от способа прокладки, а также конкретных местных условий (суммирование выполняется по всем участкам разветвленной сети). Сумму $M = \sum d_i l_i$ обычно называют материальной характеристикой сети (МХ).

Не трудно увидеть, что при заданной трассировке сети (заданных длинах участков) изменение диаметров трубопроводов затрагивает в (1) лишь материальную характеристику M . Таким образом, задача гидравлического расчета конкретизируется: определение диаметров при условии минимального значения M . При этом непосредственное использование M по (1) невозможно в виду отсутствия условий однозначности для диаметров d_i . Поэтому на первом этапе следует определить оптимальные (при $M \rightarrow \min$) располагаемые напоры H_{r_i} , а затем с использованием известных соотношений найти диаметры участков сети. Отметим, что тривиальное решение $M=0$ соответствует нулевому располагаемому напору в начале сети H_{r1} , что физически не имеет смысла.

Воспользуемся принятой ранее системой нумерации (рис. 3.2) и обозначений. Тогда МХ может быть представлена в виде:

$$M = \sum_{i=1}^n d_{m_i} \cdot l_{m_i} + \sum_{i=1}^{n-1} d_{o_i} \cdot l_{o_i} \quad (3.2)$$

В курсе «Теплоснабжение» для диаметра участка сети длиной l с расчетным расходом теплоносителя G , получено соотношение:

$$d = 0,024 \cdot \left[\frac{(1 + \alpha) \cdot l \cdot G^2}{H_n - H_k} \right]^{0,19}, \quad (3.3)$$

где α - доля местных потерь давления на участке.

Выразим диаметры i -го участка ГМ и ответвления в соответствии с (3.3):

$$d_{m_i} = 0,024 \cdot \left[\frac{(1 + \alpha_{m_i}) \cdot l_{m_i} \cdot G_{m_i}^2}{H_{r_i} - H_{r_{i+1}}} \right]^{0,19}; \quad (3.4)$$

$$d_{o_i} = 0,024 \cdot \left[\frac{(1 + \alpha_{o_i}) \cdot l_{o_i} \cdot G_i^2}{H_{r_{+i}} - H_{k_i}} \right]^{0,19}. \quad (3.5)$$

Подстановка (4) и (5) в (2) дает:

$$M = 0,024 \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{(1 + \alpha_{m_i}) \cdot G_{m_i}^2}{H_{r_i} - H_{r_{i+1}}} \right]^{0,19} \cdot l_{m_i}^{1,19} + 0,024 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{(1 + \alpha_{o_i}) \cdot G_i^2}{H_{r_{i+1}} - H_{k_i}} \right]^{0,19} \cdot l_{o_i}^{1,19}, \quad (3.6)$$

которое и представляет собой целевую функцию задачи оптимизации располагаемых напоров в промежуточных узлах ГМ сети $M(H_{r_2}, H_{r_3}, \dots, H_{r_n})$. Все остальные величины, входящие в (3.6), являются параметрами и определяются условиями однозначности. В

частности, $G_{m_i} = \sum_{j=i}^n G_j$.

Необходимым условием существования минимума функции $M(\vec{H}_{r_i})$ является равенство нулю всех частных производных M , т.е.

$$\frac{\partial M}{\partial H_{r_i}} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (3.7)$$

Таким образом, выполняя дифференцирование (3.6) и приравнявая нулю полученные производные, получим систему (n-1)-го уравнений относительно H_{r_i} .

С целью упрощения данной операции целесообразно принять некоторые физически оправданные допущения. В частности, на первоначальном этапе допустимо считать доли местных потерь напора на участках сети одинаковыми, и равными среднему значению, т.е. $\alpha_{m_1} = \alpha_{m_2} = \dots = \alpha_{m_n} = \alpha_{o_1} = \alpha_{o_2} = \dots = \alpha_{o_{n-1}} \equiv \alpha$, что соизмеримо с точностью исходных данных задачи. Кроме того, будем полагать, что напоры на вводах всех потребителей (концевые напоры) H_{k_i} одинаковы и равны заданной величине H_k .

С учетом принятых допущений получим:

$$M = 0,024 \cdot (1 + \alpha)^{0,19} \cdot \left[\frac{G_{m_1}^{0,38} \cdot l_{m_1}^{0,19}}{(H_{r_1} - H_{r_2})^{0,19}} + \frac{G_{m_2}^{0,38} \cdot l_{m_2}^{0,19}}{(H_{r_2} - H_{r_3})^{0,19}} + \dots + \frac{G_{m_n}^{0,38} \cdot l_{m_n}^{0,19}}{(H_{r_n} - H_{r_{n+1}})^{0,19}} + \right. \\ \left. + \frac{G_{o_1}^{0,38} \cdot l_{o_1}^{0,19}}{(H_{r_2} - H_k)^{0,19}} + \dots + \frac{G_{o_{n-1}}^{0,38} \cdot l_{o_{n-1}}^{0,19}}{(H_{r_n} - H_k)^{0,19}} \right] \quad (3.8)$$

причем $G_{m_n} = G_n$ и $H_{r_{n+1}} = H_{k_n} = H_k$.

Выполним дифференцирование (3.8) по всем H_{r_i} , начиная со 2-го и заканчивая n-м узлом:

$$\frac{\partial M}{\partial H_{r_3}} = 0,024 \cdot 0,19 \cdot (1 + \alpha)^{0,19} \cdot \left[\frac{l_{m_2}^{1,19} \cdot G_{m_2}^{0,38}}{(H_{r_2} - H_{r_3})^{1,19}} - \frac{l_{m_3}^{1,19} \cdot G_{m_3}^{0,38}}{(H_{r_3} - H_{r_4})^{1,19}} - \frac{l_{o_2}^{1,19} \cdot G_{o_2}^{0,38}}{(H_{r_3} - H_k)^{1,19}} \right].$$

..

$$\frac{\partial M}{\partial H_{r_i}} = 0,024 \cdot 0,19 \cdot (1 + \alpha)^{0,19} \cdot \left[\frac{l_{m_{i-1}}^{1,19} \cdot G_{m_{i-1}}^{0,38}}{(H_{r_{i-1}} - H_{r_i})^{1,19}} - \frac{l_{m_i}^{1,19} \cdot G_{m_i}^{0,38}}{(H_{r_i} - H_{r_{i+1}})^{1,19}} - \frac{l_{o_{i-1}}^{1,19} \cdot G_{o_{i-1}}^{0,38}}{(H_{r_i} - H_k)^{1,19}} \right]$$

$$\cdot$$

$$\cdot$$

$$\frac{\partial M}{\partial H_{r_n}} = 0,024 \cdot 0,19 \cdot (1 + \alpha)^{0,19} \cdot \left[\frac{l_{m_{n-1}}^{1,19} \cdot G_{m_{n-1}}^{0,38}}{(H_{r_{n-1}} - H_{r_n})^{1,19}} - \frac{l_{m_n}^{1,19} \cdot G_n^{0,38}}{(H_{r_n} - H_k)^{1,19}} - \frac{l_{o_{n-1}}^{1,19} \cdot G_{n-1}^{0,38}}{(H_{r_n} - H_k)^{1,19}} \right]$$

Введем обозначения:

$$\Theta_{m_i} \equiv l_{m_i}^{1,19} \cdot G_{m_i}^{0,38}; \quad \Theta_{o_i} \equiv l_{o_i}^{1,19} \cdot G_i^{0,38}$$

Тогда (3.7) конкретизируется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\Theta_{m_1}}{(H_{r_1} - H_{r_2})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_2}}{(H_{r_2} - H_{r_3})^{1,19}} + \frac{\Theta_{o_1}}{(H_{11r_2} - H_k)^{1,19}} = 0 \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \quad \quad \quad \cdot \\ -\frac{\Theta_{m_{i-1}}}{(H_{r_{i-1}} - H_{r_i})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_i}}{(H_{r_i} - H_{r_{i+1}})^{1,19}} + \frac{\Theta_{o_{i-1}}}{(H_{r_i} - H_k)^{1,19}} = 0 \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \quad \quad \quad \cdot \\ -\frac{\Theta_{m_{n-1}}}{(H_{r_{n-1}} - H_{r_n})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_n}}{(H_{r_n} - H_k)^{1,19}} + \frac{\Theta_{o_{n-1}}}{(H_{r_n} - H_k)^{1,19}} = 0 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Полученная система состоит из (n-1)-го уравнения и содержит (n-1)-о неизвестное - $H_{r_2}, H_{r_3}, \dots, H_{r_n}$. Несмотря на явную нелинейность она может быть решена достаточно просто. Для наглядности сделаем это для частного случая – сети с 4-мя потребителями (рис. 3.3). Тогда

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\Theta_{m_1}}{(H_{r_1} - H_{r_2})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_2}}{(H_{r_2} - H_{r_3})^{1,19}} + \frac{\Theta_{o_1}}{(H_{r_1} - H_k)^{1,19}} = 0 \\ -\frac{\Theta_{m_2}}{(H_{r_2} - H_{r_3})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_3}}{(H_{r_3} - H_{r_4})^{1,19}} + \frac{\Theta_{o_2}}{(H_{r_2} - H_k)^{1,19}} = 0 \\ -\frac{\Theta_{m_3}}{(H_{r_3} - H_{r_4})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_4}}{(H_{r_4} - H_k)^{1,19}} + \frac{\Theta_{o_3}}{(H_{r_4} - H_k)^{1,19}} = 0 \end{array} \right.$$

Преобразуем последнее уравнение системы следующим образом:

$$\begin{aligned} -\frac{\Theta_{m_3}}{(H_{r_3} - H_{r_4})^{1,19}} + \frac{\Theta_{m_4} + \Theta_{o_3}}{(H_{r_4} - H_k)^{1,19}} &= 0 \\ \left(\frac{H_{r_4} - H_k}{H_{r_3} - H_{r_4}} \right)^{1,19} &= \frac{\Theta_{m_4} + \Theta_{o_3}}{\Theta_{m_3}}; \\ \frac{H_{r_4} - H_k}{H_{r_3} - H_{r_4}} &= \left(\frac{\Theta_{m_4} + \Theta_{o_3}}{\Theta_{m_3}} \right)^{1/1,19}. \end{aligned}$$

Обозначим

$$\left(\frac{\Theta_{m_4} + \Theta_{o_3}}{\Theta_{m_3}} \right)^{1/1,19} \equiv m_4 = \left(\frac{\Theta_{m_4} (1 + m_5)^{1,19} + \Theta_{o_3}}{\Theta_{m_3}} \right)^{1/1,19}, (m_5 \equiv 0).$$

Тогда

$$H_{r_4} - H_k = H_{r_3} \times m_4 - H_k \times m_4,$$

$$H_{r_4} = H_{r_3} \cdot \frac{m_4}{1 + m_4} + \frac{H_k}{1 + m_4}$$

Подставим полученное выражение для H_{r_4} во второе уравнение системы, преобразовав для начала знаменатель второго слагаемого:

$$H_{r_3} - H_{r_4} = H_{r_3} - H_{r_3} \cdot \frac{m_4}{1 + m_4} - \frac{H_k}{1 + m_4} = \frac{H_{r_3} + \cancel{H_{r_3} \cdot m_4} - \cancel{H_{r_3} \cdot m_4} - H_k}{1 + m_4} =$$

$$= \frac{H_{r_3} - H_k}{1 + m_4}$$

$$-\frac{\Theta_{m2}}{(H_{r2} - H_{r3})^{1.19}} + \frac{\Theta_{m3} \cdot (1 + m_4)^{1.19}}{(H_{r3} - H_k)^{1.19}} + \frac{\Theta_{02}}{(H_{r3} - H_k)^{1.19}} = 0$$

$$-\frac{\Theta_{m2}}{(H_{r2} - H_{r3})^{1.19}} + \frac{\Theta_{m3} \cdot (1 + m_4)^{1.19} + \Theta_{02}}{(H_{r3} - H_k)^{1.19}} = 0$$

$$\frac{H_{r3} - H_k}{H_{r2} - H_{r3}} = \left[\frac{\Theta_{m3} \cdot (1 + m_4)^{1.19} + \Theta_{02}}{\Theta_{m2}} \right]^{\frac{1}{1.19}}$$

Обозначим

$$\left[\frac{\Theta_{m3} \cdot (1 + m_4)^{1.19} + \Theta_{02}}{\Theta_{m2}} \right]^{\frac{1}{1.19}} = m_3$$

$$H_{r3} - H_k = H_{r2} \times m_3 - H_{r3} \times m_3$$

И

$$H_{r3} = H_{r2} \frac{m_3}{1 + m_3} - \frac{H_k}{1 + m_3}$$

Преобразуя аналогичным образом первое уравнение системы, получим

$$H_{r2} = H_{r1} \frac{m_2}{1 + m_2} - \frac{H_k}{1 + m_2}$$

где

$$m_2 = \left[\frac{\Theta_{m2} \cdot (1 + m_3)^{1.19} + \Theta_{01}}{\Theta_{m1}} \right]^{\frac{1}{1.19}}$$

Таким образом, решение имеет вид:

$$H_{r2} = H_{r1} \frac{m_2}{1 + m_2} + \frac{H_k}{1 + m_2}, \quad m_2 = \left[\frac{\Theta_{m2} \cdot (1 + m_3) \cdot 1.19 + \Theta_{01}}{\Theta_{m1}} \right] \frac{1}{1.19}$$

$$H_{r3} = H_{r2} \frac{m_3}{1 + m_3} + \frac{H_k}{1 + m_3}, \quad m_3 = \left[\frac{\Theta_{m3} \cdot (1 + m_4) \cdot 1.19 + \Theta_{02}}{\Theta_{m2}} \right] \frac{1}{1.19}$$

$$H_{r4} = H_{r3} \frac{m_4}{1 + m_4} + \frac{H_k}{1 + m_4}, \quad m_4 = \left[\frac{\Theta_{m4} \cdot (1 + m_5) \cdot 1.19 + \Theta_{03}}{\Theta_{m3}} \right] \frac{1}{1.19}$$

$$H_{r5} = H_k, \quad m_5 = 0$$

т.е. располагаемый напор каждого узла определяется через значение H_r в предыдущем узле, а коэффициенты m_i , наоборот, рассчитываются в обратном порядке – от последнего ко 2-му. Следовательно, сначала необходимо рассчитать все коэффициенты m_i , а затем и сами располагаемые напоры.

Если рассмотреть сеть с большим числом абонентов, то структура решения будет аналогична. Следовательно, для общего случая по индукции можем записать:

$$H_{r2} = H_{r1} \frac{m_2}{1 + m_2} + \frac{H_k}{1 + m_2}, \quad m_2 = \left[\frac{\Theta_{m2} \cdot (1 + m_3) \cdot 1.19 + \Theta_{01}}{\Theta_{m1}} \right] \frac{1}{1.19}$$

.

.

.

.

$$H_{ri} = H_{ri-1} \frac{m_i}{1 + m_i} + \frac{H_k}{1 + m_i}, \quad m_i = \left[\frac{\Theta_{mi} \cdot (1 + m_{i+1}) \cdot 1.19 + \Theta_{0i-1}}{\Theta_{mi-1}} \right] \frac{1}{1.19}$$

$$\begin{aligned}
 H_{ri+1} &= H_{ri} \frac{m_{i+1}}{1 + m_{i+1}} + \frac{H_k}{1 + m_{i+1}} & m_{i+1} &= \left[\frac{\Theta_{mi+1} \cdot (1 + m_{i+2})^{1.19} + \Theta_{0i}}{\Theta_{mi}} \right]^{\frac{1}{1.19}} \\
 &\cdot & & \\
 &\cdot & & \\
 &\cdot & & \\
 H_{rn} &= H_{rn-1} \frac{m_n}{1 + m_n} + \frac{H_k}{1 + m_n} & m_n &= \left[\frac{\Theta_{mn} \cdot (1 + m_{n+1})^{1.19} + \Theta_{0n-1}}{\Theta_{mn-1}} \right]^{\frac{1}{1.19}} \\
 H_{rn-1} &= H_k \equiv H_{rn} \frac{m_{n-1}}{1 + m_{n-1}} + \frac{H_k}{1 + m_{n-1}} \quad mn+1 = 0. & & (3.10)
 \end{aligned}$$

До сих пор предполагалось, что в каждом узле магистрали ответвления одиночные (тройки). Однако на практике достаточно часто встречаются случаи двойных ответвлений (крестовины) —. Тогда для сохранения индексации узлов и участков следует считать длину между i -м и $i+1$ -м узлами (фактически 1 узел с двумя ответвлениями) равной нулю, т.е. $l_{mi} = 0$. Но в этом случае $\Theta_{mi} = 0$, а

$$m_{i+1} = \left[\frac{\Theta_{mi+1} \cdot (1 + m_{i+2})^{1.19} + \Theta_{0i}}{0} \right]^{\frac{1}{1.19}} \rightarrow \infty$$

И

$$m_i = \left(\frac{0 \times \infty + \Theta_{0i-1}}{\Theta_{mi-1}} \right)^{1/1.19} = (0 \times \infty)$$

т.е. неопределенность. Для ее раскрытия подставим в m_i развернутое выражение m_{i+1} (через m_{i+2}):

$$\begin{aligned}
m_i &= \left\{ \frac{\Theta_{mi} \times \left[1 + \left(\frac{\Theta_{mi+1} \times (1 + m_{i+2})^{1.19} + \Theta_{0i}}{\Theta_{mi}} \right)^{1/1.19} \right]^{1.19} + \Theta_{0i-1}}{\Theta_{mi-1}} \right\}^{1/1.19} = \\
&= \left\{ \frac{\Theta_{mi} \times \left[\frac{\Theta_{mi}^{1/1.19} + (\Theta_{mi+1} \times (1 + m_{i+2})^{1.19} + \Theta_{0i})^{1/1.19}}{\frac{1.19}{\Theta_{mi}^{1.19}} = 1} \right]^{1.19} + \Theta_{0i-1}}{\Theta_{mi-1}} \right\}^{1/1.19} = \\
&= \left(\frac{\Theta_{mi+1} \times (1 + m_{i+2})^{1.19} + \Theta_{0i} + \Theta_{0i-1}}{\Theta_{mi-1}} \right)^{1.19} \tag{3.11}
\end{aligned}$$

Таким образом, в случае нулевой длины i участка коэффициент m_i рассчитывается по (3.11), через m_{i+2} , а не m_{i+1} . Очевидно, H_{ri} в этом случае равно H_{ri-1} .

Соотношения (3.10) и (3.11) определяют оптимальные, соответствующие минимуму материальной характеристики (стоимости) сети располагаемые напоры в узловых точках, т.е. первый этап поставленной задачи выполнен. Однако, необходимо убедиться, что при H_{ri} , рассчитанных по (10), действительно имеем минимум (а не максимум) целевой функции $M(H_{r2}, \dots, H_{rn})$. Для этого найдем вторые производные $\partial^2 M / \partial H_{ri}^2$, что с целью наглядности сделаем при $i=2$. Для всех остальных i выводы аналогичны.

$$\frac{\partial^2 M}{\partial H_{r2}^2} = 0.024 \times 0.19 \times 1.19 \times (1 + \alpha)^{0.19} \times \left[\frac{l_{m1}^{1.19} \times G_{m1}^{0.38}}{(H_{r1} - H_{r2})^{2.19}} + \frac{l_{m2}^{1.19} \times G_{m2}^{0.38}}{(H_{r2} - H_{r3})^{2.19}} + \right]$$

$$\left[+ \frac{l_{01}^{1.19} \times G_1^{0.38}}{(H_{r2} - H_k)^{2.19}} \right]$$

Убедимся, что знаменатели каждого слагаемого положительны, т.е. $H_{r2} < H_{r1}$, $H_{r3} < H_{r2}$, $H_{r2} < H_k$. Воспользуемся (3.10):

$$H_{r2} = H_{r1} \times \left(\frac{H_k / (H_{r1} + m_2)}{1 + m_2} \right)$$

Так как $H_k < H_{r1}$ (исходные величины), то $H_k / H_{r1} < 1$ и $(H_k / (H_{r1} + m_2)) / (1 + m_2) < 1$, а $H_{r2} < H_{r1}$. С другой стороны,

$$H_{r2} = H_k \times \left(\frac{m_2 \times H_{r1} / H_k + 1}{m_2 + 1} \right)$$

Очевидно, $H_{r1} / H_k > 1$, $(m_2 \times H_{r1} / H_k + 1) > (m_2 + 1)$ и $H_{r2} > H_k$.

Далее,

$$H_{r3} = H_{r2} \times \left(\frac{H_k / (H_{r2} + m_3)}{1 + m_3} \right)$$

С учетом выше доказанных соотношений не трудно убедиться, $H_{r3} < H_{r2}$. Таким образом, определяемые по (3.10) располагаемые напоры являются убывающими, т.е.

$$H_{r1} > H_{r2} > \dots > H_{rn} > H_k$$

и, следовательно все вторые производные положительны $\partial^2 M / \partial H_{r_i}^2 > 0$, что и является условием минимума функции при значениях аргументов, найденных по (3.10).

3.5. Подбор диаметров труб на участках сети

Знание оптимальных располагаемых напоров H_{ri} позволяет определить потери напора на участках магистрали, как

$$\Delta H_{mi} = H_{ri} - H_{ri+1} ; i = 1, 2, \dots, n,$$

а затем по (3.4) и диаметры d_{mi} . При этом доля местных потерь напора α_{mi} в начальном приближении может быть принята равной средней величине α (как и при выводе (3.8)) и оценена, например, по формуле Б. Л. Шифринсона:

$$\alpha \approx 0,019 \times \sqrt{G \times m_1}$$

Тогда

$$d_{mi} = 0.024 \times \left[\frac{(1 + \alpha) \times l_{mi} \times G_{mi}}{\Delta H_m} \right]^{0.19} \quad (3.12)$$

Очевидно, что значения d_{mi} , рассчитываемые по (3.12) могут не совпадать со стандартными, так как при выполнении рассматриваемого вывода полагалось, что диаметр труб является непрерывной величиной. Однако, это не так. Известно, что существует дискретный ряд стандартных диаметров труб, выпускаемых промышленностью. Поэтому дальнейшая задача состоит в подборе стандартных диаметров, ближайших к расчетным по (3.12). Процесс подбора может быть формализован для его реализации на ЭВМ.

Рассмотрим дискретный ряд стандартных диаметров (рис. 3.6). Требуется выбрать ближайшее значение d_{st} к расчетному d . Вначале, попарно перебирая d_{stj} и d_{stj+1} ($j = 1, \dots, M$), устанавливаем интервал $d_{stj} - d_{stj+1}$, для которого $d_{stj} \leq d \leq d_{stj+1}$. Затем составляя разности $x = d - d_{stj}$ и $y = d_{stj+1} - d$, выбираем по меньшей из них соответствующий стандартный диаметр трубопровода на участке d_{mi} (для определенности в случае $x = y$, $d_{mi} = d_{stj+1}$). При реализации описанной процедуры следует учитывать также

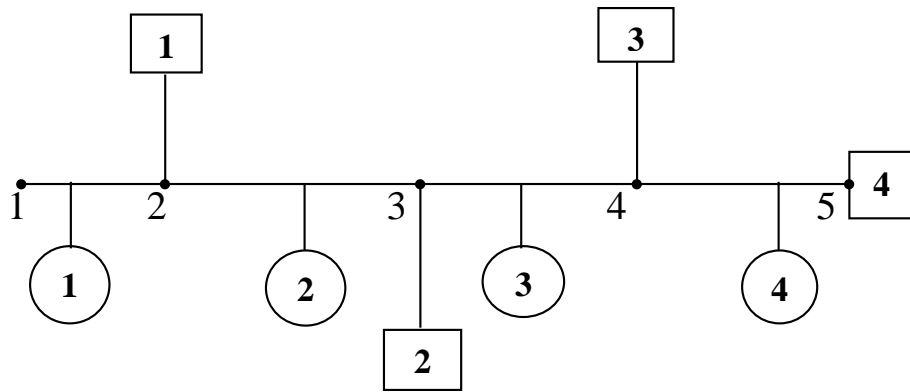


Рис. 3.4

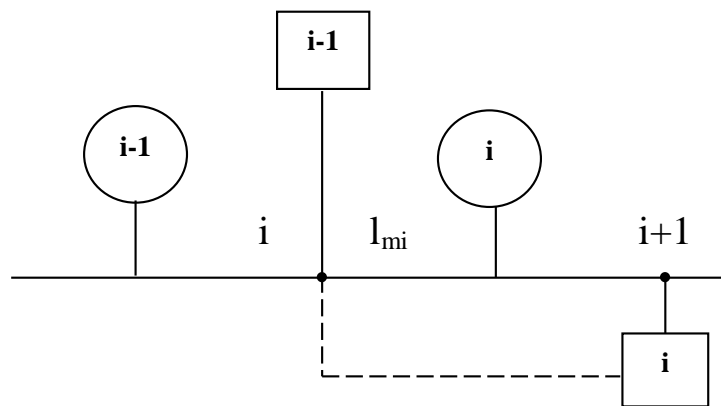


Рис. 3.5

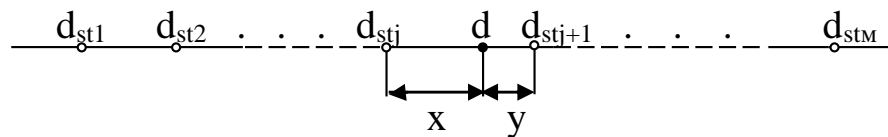


Рис. 3.6

ограничения, накладываемые нормами проектирования. Согласно СНиП 2.04.07-86 диаметры труб тепловых сетей не должны быть менее 32 мм. Следовательно, если расчетное значение $d < 32$ (для внутреннего диаметра – 34 мм), то d_{mi} следует принять равным данному минимальному пределу.

Таким образом, задача подбора диаметров на расчетных участках главной магистрали решена. Однако отличие округленных стандартных диаметров труб от расчетных приведет к отклонению фактических потерь напора на участках, а следовательно и располагаемых напоров в точках от предварительно найденных, оптимальных. Поэтому определенные следует рассматривать, как начальное приближение, а процесс их поиска, как итерационный.

На следующем этапе (2-я итерация) необходимо уточнить потери напора на участках магистрали для выбранных стандартных диаметров труб. В соответствии с (3.4)

$$\Delta H_{mi} = \left[\frac{0.024}{d_{mi}} \right]^{5.25} \cdot (1 + \alpha_{mi}) \cdot l_{mi} \cdot G_{mi}^2 \quad (3.13)$$

При этом знание диаметра позволяет более точно, чем на предварительном этапе, учесть долю местных потерь напора на участке.

В принципе, возможно построить алгоритм, позволяющий достаточно точно определить α_{mi} на основе понятия эквивалентной длины местных потерь давления. Однако, как показывает опыт проектирования, неточность исходной информации соизмерима или даже превосходит таковую при приближенной оценке доли местных потерь, что значительно проще. Поэтому воспользуемся имеющимся на этот счет рекомендациями. Например, для достаточно широкого класса тепловых сетей α может быть принято в зависимости от диаметра трубопровода. Причем процесс подбора легко формализуем для реализации его на ЭВМ. В частности, для разветвленных тепловых водяных сетей с П-образными компенсаторами (наиболее типичный случай) значения α в зависимости от диаметра трубопровода представлены табл.3.1.

Таблица 3.1- Значения α в зависимости от диаметра трубопровода

dy, мм	≤ 150	175-200	250-300	350	400-500	≥ 600
α	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1

После уточнения потерь напора на участках магистрали следует уточнить и располагаемые напоры в узловых точках сети. Очевидно,

$$H_{ri+1} = H_{ri} - \Delta H_{mi}$$

(для первого участка, $i = 1 - H_{r2} = H_{r1} - \Delta H_{m1}$, причем исходная величина начального напора H_{r1} остается неизменной на любой итерации).

В процессе округления диаметров со стандартных и последующего их уточнения возможно отклонение располагаемых напоров в узловых точках магистрали от оптимальных значений (соответствующих минимуму стоимости сети), найденных на начальном этапе H_{ri} . К сожалению, в виду дискретности ряда диаметров исключить данное явление в рассматриваемом алгоритме невозможно, с чем приходится смириться. Более того, возможна ситуация, когда после окончания итерационного процесса напор в конце последнего (n -го) участка магистрали, т.е. на вводе конечного потребителя H_{rn+1} , значительно отличается от заданного H_k . Завышение напора (по сравнению с H_k) не опасно, т.к. избыточная часть его может быть погашена на узле ввода в сопле элеватора или дроссельной диафрагмой; отклонения в меньшую сторону более чем на 10% недопустимо, поскольку может привести к нарушению гидравлического и теплового режимов работы местных систем теплоснабжения. Таким образом, условие $H_{rn+1} > 0,9 \times H_k$ является обязательным. Каким образом можно обеспечить его выполнение? Очевидно, соответствующим изменением (увеличением) диаметров на отдельных участках, например на участке с наибольшими потерями напора. Процесс этот можно полностью формализовать, однако алгоритм его будет весьма сложным. Значительно проще и нагляднее использовать особенности диалогового режима, наиболее приемлемого при работе с персональным компьютером. Рассмотрим, как это можно сделать.

Итак, по завершению подбора стандартных диаметров на экран выводится следующая информация: диаметры и соответствующие потери напора на участках магистрали, а также располагаемый напор в точке “ $n+1$ ”. Для наглядности можно предусмотреть

сравнение (абсолютное или относительное, в %) H_{rn+1} с H_k . Оператор (пользователь) анализируя представленные на дисплее данные, решает на каком участке и как следует изменить диаметр трубопровода (при этом учитывается как указанные выше ограничения так и необходимость телескопичности магистрали – по мере удаления от начальной точки диаметры участков должны уменьшаться!). Далее, после ввода измененных диаметров программа автоматически переходит на участок, соответствующий началу второй итерации, и выполняет все описанные ранее процедуры. Итогом является вывод на экран новых результатов, которые либо вновь анализируются с последующей коррекцией, либо распечатываются. На этом задачу подбора диаметров участков расчетной магистрали можно считать решенной.

После выполнения гидравлического расчета главной магистрали диаметры ответвлений к потребителям подбираются по разности располагаемых напоров в начале и конце ответвления $\Delta H_{oi} = H_{ri+1} - H_k$.

3.6. Алгоритм гидравлического расчета

Все вышеизложенное целесообразно представить в виде структурной блок – схемы (рис. 3.7).

Каждый из укрупненных блоков на схеме имеет достаточно сложную структуру. Детализируем основные из них.

Блок расчета коэффициентов $\{m_i\}$. Напомним, что m_i ($i = 1, 2, \dots, n$) вычисляются по формулам (10) (при $l_{mi} \neq 0$) или (11) (при $l_{mi} = 0$). Кроме того, следует иметь ввиду, что в случае нулевой длины i -го участка магистрали ($l_{mi} = 0$) m_{i+1} обращается в ∞ . Поэтому для данного случая необходимо предусмотреть присвоение m_{i+1} некоторого условного значения с целью заполнения всех ячеек 000000000, отведенных под хранение массива коэффициентов m_i . Целесообразно, чтобы это было заведомо «неправильное» число, в частности отрицательное, например, -10.

Для определения m_i необходимо знание расходов воды на соответствующих участках G_{mi} . Поскольку последнее используется также и на последующих этапах, непосредственное вычисление m_i целесообразно предварить небольшим блоком расчета G_{mi} , имея в

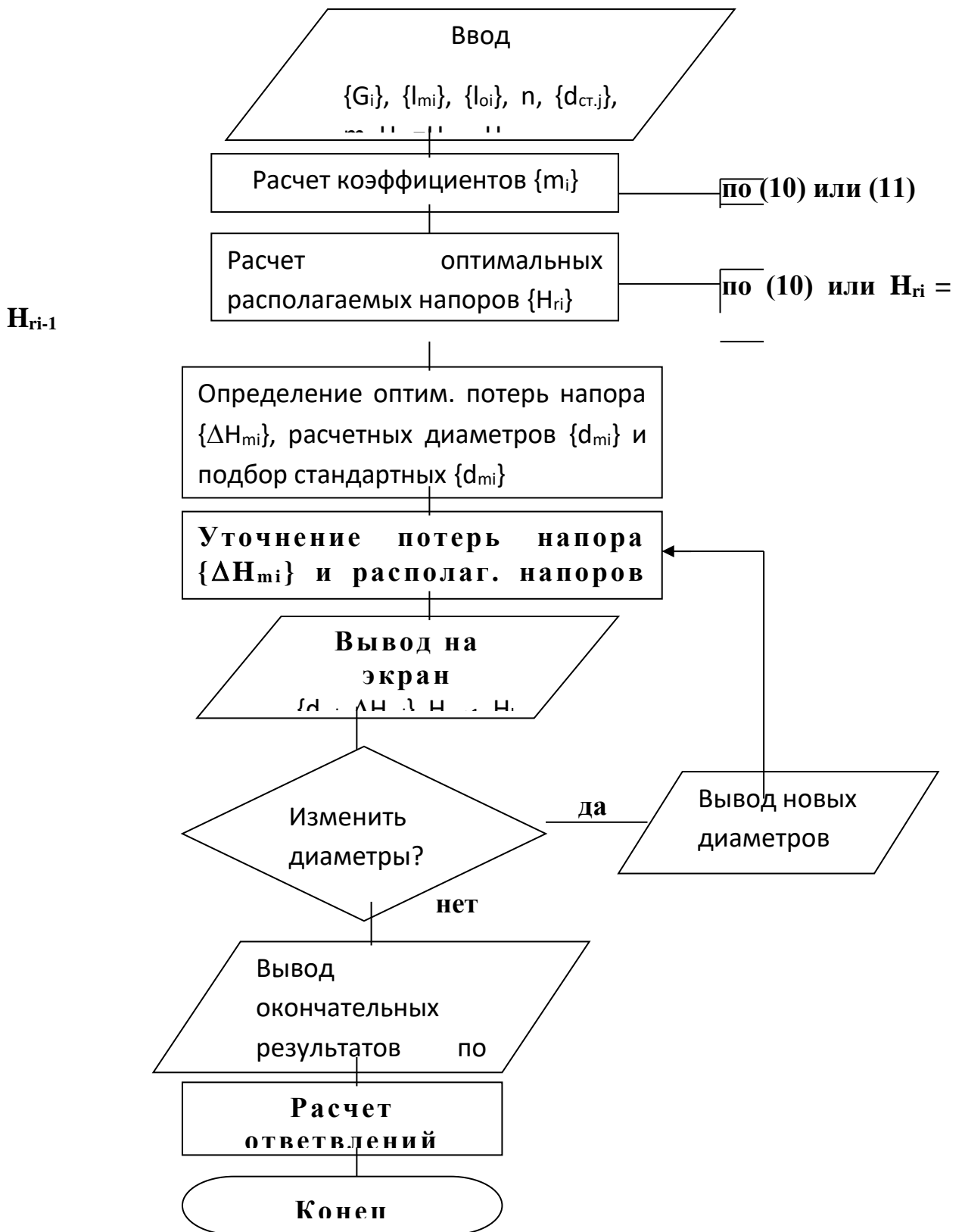


Рис. 3.7- Структурная блок-схема гидравлического расчета тупиковой сети

расчет расходов
сетевой воды на всех
участках главной
магистрالی

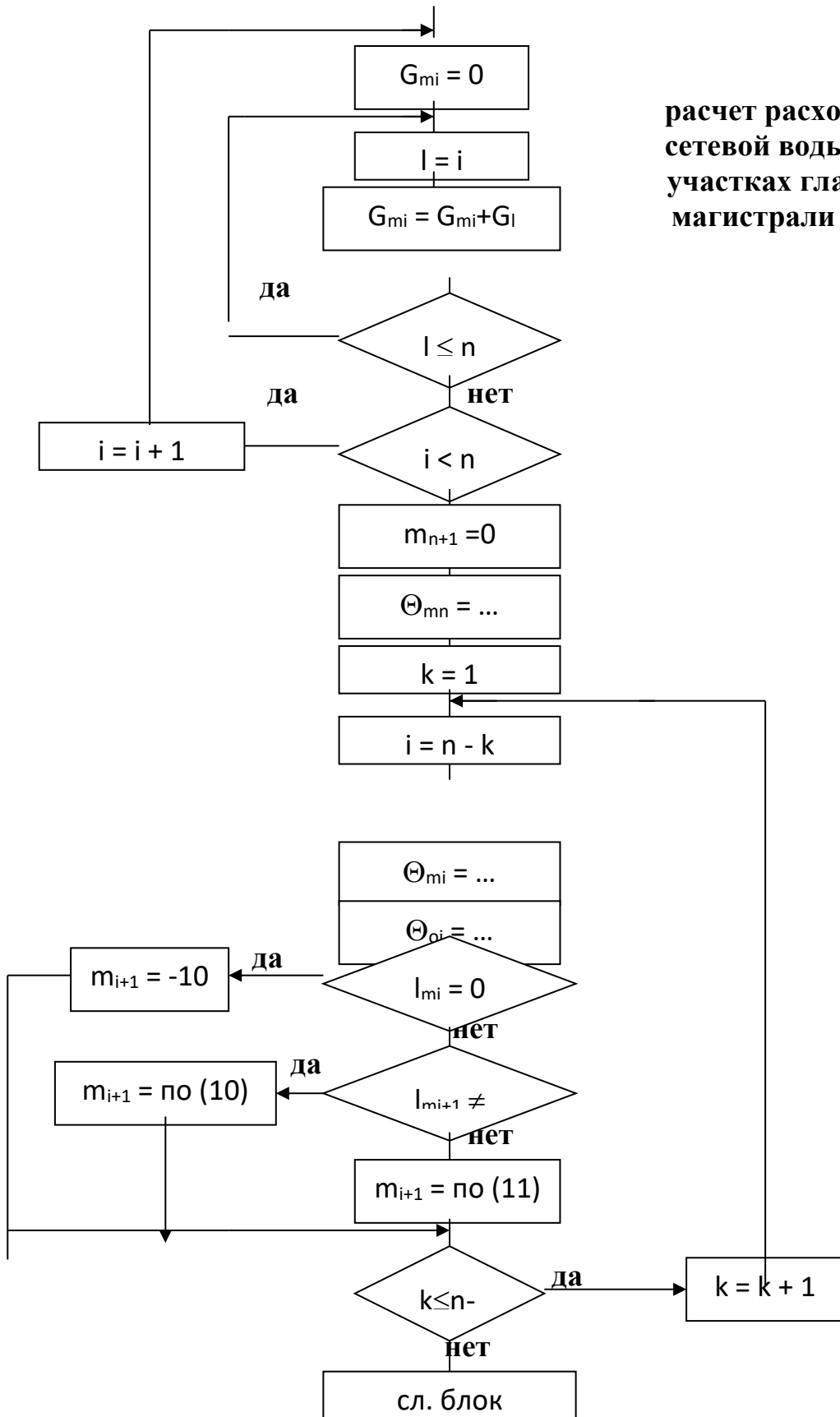


Рис. 3.8- Блок-схема алгоритма расчета коэффициентов m_i .

виду, что . Блок – схема алгоритма вычисления коэффициентов m_i , с учетом сказанного выше, приведена на рис. 7 (нулевой коэффициент m_{n+1} вычисляется отдельно, а остальные – в циклическом процессе. При этом с целью реализации цикла с уменьшающимся параметром i (от $n-1$ до 1) вводится новый $k = n - i$, который, как и положено, возрастает (от 1 до n).

4. Примеры решения задач

Пример 4.1.

Рассчитать тепловые потоки для одного из кварталов ($f=5,8$ га) района централизованного теплоснабжения новой застройки., расположенного в г. Самаре .

Решение

Поскольку конкретные данные отсутствуют определяем параметры, необходимые для решения вышеуказанной задачи, с помощью укрупненных показателей.

Число жителей m оцениваем, как произведение f на плотность населения P , принимаемую с учетом климатического районирования и средней градостроительной ценности территории , равной 330 чел/га. Тогда:

$$f=5,8\text{га}; m=5,8 \cdot 330 \approx 1914 \text{ чел.}; A=1914 \cdot 18 \approx 34452 \text{ м}^2.$$

Необходимые для проектирования климатические параметры района строительства:

-расчетная температура для проектирования отопления $t_o=-35^\circ\text{C}$;

-средняя за отопительный период $t_{om}=-6,4 \text{ C}$;

-продолжительность отопительного периода $p_o=228$ суток;

-среднегодовая температура воздуха $t_y=1,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

При $t_o=-30^\circ\text{C}$ для гражданских зданий современной постройки $q_o=87 \text{ Вт/м}^2$; $k_1=0,25$.

Укрупненный показатель среднего теплового потока на горячее водоснабжение при суточной норме водопотребления $a=105 \text{ л/чел}$ с учетом общественных зданий $q^h_m=376 \text{ Вт/чел}$.

Тогда имеем:

$$Q_{\text{max}}=87 \cdot (1+0,25) \cdot 34452=3746660 \text{ Вт},$$

$$Q_{vmax}=87 \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot 34450=449600 \text{ Вт},$$

$$Q_{hm}=376 \cdot 1914=719660 \text{ Вт},$$

$$Q_{hmax}=2,4 \cdot 719660=1727180 \text{ Вт},$$

$$Q=3746660+449600+1727180=5923440 \text{ Вт}.$$

Пример 4.2.

Рассчитать расходы сетевой воды для условий примера 4.1.

Решение

$$G_{o_{max}} = 3746660/[4187(150-70)] = 11,2 \text{ кг/с}.$$

$$G_{v_{max}} = 449600/[4187(150-70)] = 1,34 \text{ кг/с}.$$

$$G_d = 11,2 + 1,34 = 12,54 \text{ кг/с}.$$

Пример 4.3.

Подобрать сетевой насос системы теплоснабжения, если суммарный расхода теплоносителя составляет $G_d = 240,89 \text{ кг/с}$.

Решение

Подбор выполняем по характеристикам таким образом, чтобы требуемый расход воды соответствовал рабочей части характеристики. В нашем случае это насос типа СЭ-1250-70-11, напорная характеристика которого описывается соотношением:

$$H_H = H^o_H - S_H V^2_H,$$

где H^o_H - максимальный напор насоса при расходе воды равном нулю; $H^o_H = 90,9 \text{ м в.ст.}$;

S_H – внутреннее гидравлическое сопротивление насоса,

$$S_H = 1,4 \times 10^{-5} \text{ м в.ст.}/(\text{м}^3/\text{час});$$

V – объемный расход воды. В соответствии с табл. 5 $V = 240,89 \times 3600 / 958,4 \approx 905,22$ м³/ч (плотность воды 958,4 кг/м³ принята при средней температуре воды 100°C). Тогда,

$$H_H = 90,9 - 1,4 \times 10^{-5} \times 905,22 = 80,0 \text{ м в.ст.}$$

Пример 4.4.

Подобрать диаметр ответвления к отдельному кварталу, если располагаемый напор в начале ответвления $H_H = 37,9$ м в.ст., длина участка 75 м, расчетный расход сетевой воды потребителем $G_d = 12,1$ кг/с.

Решение

Тогда, возможные потери напора в одном трубопроводе ответвления

$$\Delta H_o = (39,6 - 35) / 2 = 2,3 \text{ м в.ст.}$$

Суммарный коэффициент местных сопротивлений предварительно

$$\xi_{o0} = \xi_{от} + \xi_a + \xi_k = 1,5 + 2,8 + 0,5 = 4,8.$$

Удельные линейные потери напора R , Па/м в начальном приближении оценим, как

$$R_o^0 = \frac{\Delta H_o \times \rho \times g}{l_o \times (1 + \alpha_o)},$$

где α_0 – доля местных потерь напора, ориентировочно принимаем 0,3.

$$R = 2,3 \times 958,4 \times 9,81 / 75 \times (1 + 0,3) = 221,8 \text{ Па/м.}$$

В соответствии с расчетным расходом сетевой воды потребителем $G_d = 12,1$ кг/с по таблицам гидравлического расчета принимаем диаметр $d_o = 0,08$ м ($d_{ou} = 80$ мм) удельные потери R_o составляют 372 Па/м. Эквивалентная длина местных сопротивлений l_{oe} , м для выбранного диаметра (увеличения числа компенсаторов согласно [13] не требуется и следовательно $\xi_o = \xi_{oo}$)

$$l_{oe} = 60,8 \times d_o^{1,25} \times \xi_o = 60,8 \times 0,08^{1,25} \times 4,8 = 12,4 \text{ м.}$$

Таким образом, потери напора в одном трубопроводе ответвления составят

$$l_e = 60,794 \times 0,081,25 \times (0,5 + 1,5 + 2,8) = 12,4 \text{ м,}$$

$$\Delta H_m = \frac{372 \times (75 + 12,4)}{958,4 \times 9,81} = 2,01 \text{ , м}$$

а фактический напор на вводе в ЦТП:

$$H_k = H_n - 2 \times \Delta H_o = 39,6 - 2 \times 2,01 \approx 35,6 \text{ м в.ст.,}$$

что отличается от исходной величины всего лишь на

$$\varepsilon = (35,6 - 35) / 35,6 \times 100\% = 1,7 \%$$

Это вполне допустимо.

Пример 4.5.

Подобрать подпиточный насос для закрытой системы теплоснабжения с тепловой нагрузкой 113870000 Вт, а высота самого высокого потребителя – 45 м.

Решение

$$V_{пн} = 0,0075 \times 65 \times 113,87 \approx 55,51 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Пример 4.6.

Подобрать типоразмеры гибких П-образных компенсаторов с гнутыми отводами для участка сети (рис.4.1.) , район строительства – г. Самара.

К 43

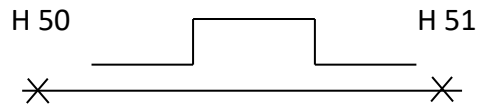


Рис.4.1 - Расчетная схема

Решение

$$d_y = 300 \text{ мм} \quad l = 130 \text{ м} \quad \sigma_{\text{доп}} = 145 \text{ МПа}$$

$$\Delta t = 150 + 35 = 185 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta x = 0,012 \cdot 185 \cdot 130 \cdot 0,5 = 144,3 \text{ мм},$$

$$\Delta l'_k = 260 \text{ мм}; \quad \Delta l_k = \Delta l'_k \cdot \frac{\sigma_{\text{доп}}}{160} = 260 \cdot \frac{145}{160} = 235,6 \text{ мм}.$$

Параметры компенсаторов, установленных на участке приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1- Параметры компенсаторов

Компенсатор по листу графической части	Dy, мм	Δx, мм	Параметры компенсатора				Px, кН
			C, мм	H, м	R, мм	Δlk, мм	
К 43	300	144	3100	3,6	1250	236	33,04

Сила упругого отпора Px составит:

$$P_x = P'_x \cdot \Delta l_k,$$

здесь Δl_k , см;

$$P'_x = f(H, m).$$

$$P_x = 1,4 \cdot 23,6 = 33,04 \text{ кН.}$$

Пример 4.7.

Подобрать тип и определить количество подвижных опор для участка сети $l=130$ м, $D_y=300$ мм.

Решение

$$D_y = 300 \text{ мм}; \quad I = 10000 \text{ см}^4 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4; \quad m = 182 \text{ кг/м};$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{0,02 \cdot 0,3 \cdot 384 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 10^{-4}}{182 \cdot 9,8}} = 15 \text{ м.}$$

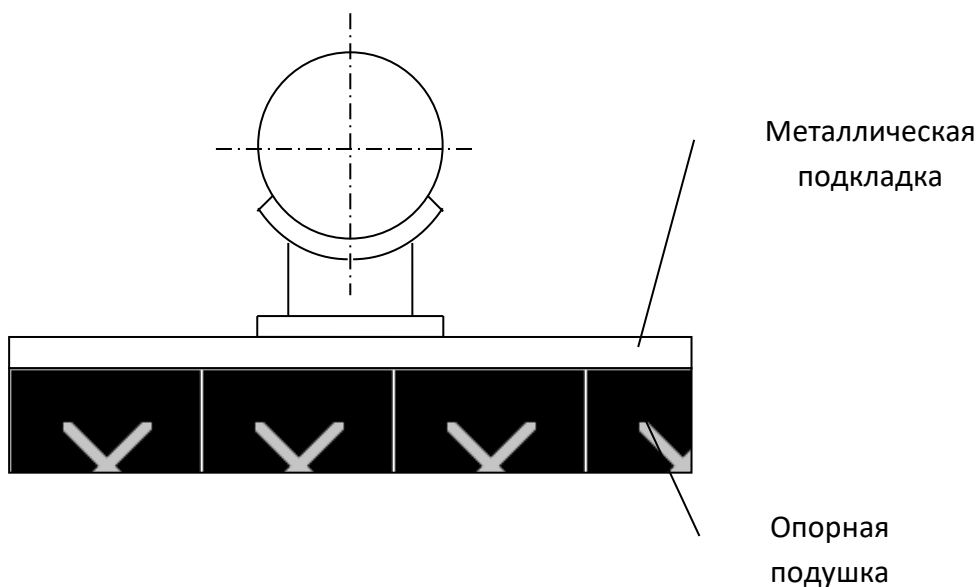


Рис. 4.2 - Скользящая опора.

Таблица 4.2 - Расчет расстояний между подвижными опорами

Ду, мм	m, кг/м	I·10-8, м4	l, м	После округления l, м	Тип опоры
300	182	10000	15	15	Т 13, 22; Т 14, 22

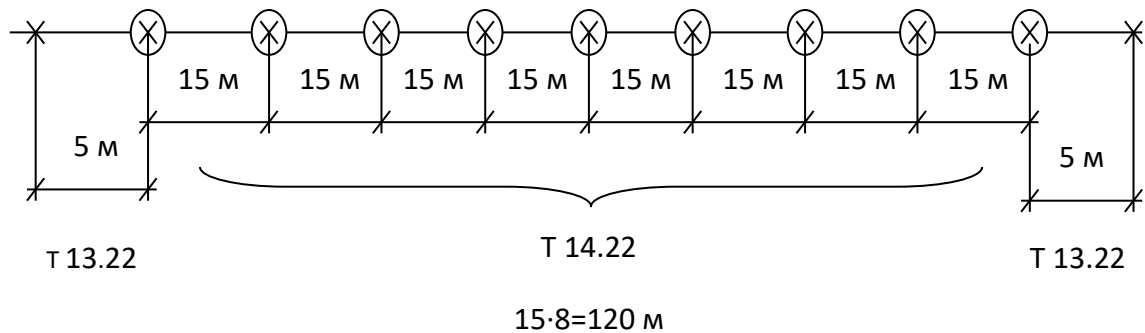


Рис.4.3 -Расчетная схема к примеру 4.7.

Пример 4.8

Подобрать неподвижную опору для участка сети (рис.4.4.) с учетом значения осевых сил для компенсаторов, подобранных в примере 4.6.

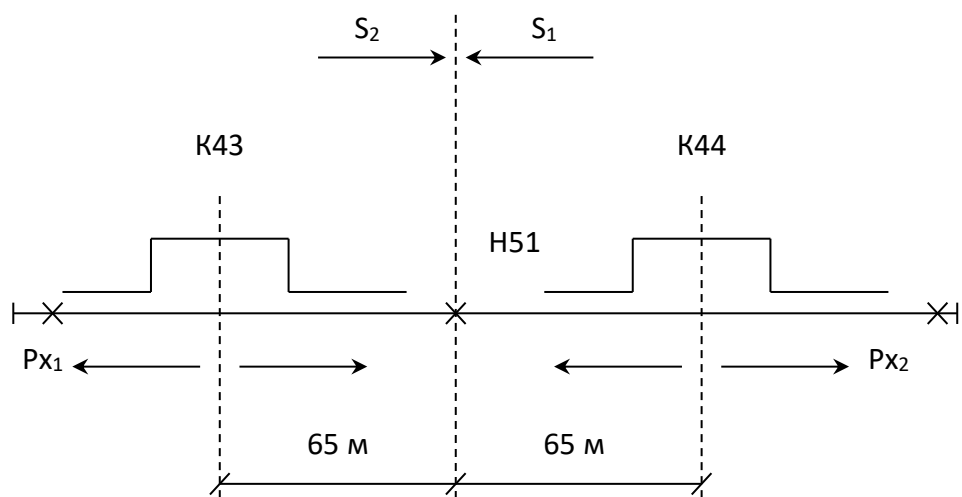


Рис.4.4 - Расчетная схема определения осевых усилий на неподвижную опору

Решение

Определяем результирующее осевое усилие на неподвижную опору.

$$P = S - 0,7S_m.$$

$$S = \mu \cdot g \cdot m \cdot l \cdot 10^{-3} + P_x;$$

$\mu = 0,3$ – коэффициент трения в подвижных опорах.

$$S_1 = S_2 = 0,3 \cdot 9,81 \cdot 182 \cdot 65 \cdot 10^{-3} + 33,04 = 67,86 \text{ кН};$$

$$P = 67,86 - 0,7 \cdot 67,86 = 67,86 \cdot (1 - 0,7) = 20,36 \text{ кН} = 2,04 \text{ т.с.}$$

Выбираем лобовую двухупорную опору Т 4.07 с допустимым осевым усилием 5 т.с.

Пример 4.9

Подобрать канал для участка сети (рис.3.3.).

Для прокладки тепловой сети используем непроходные каналы. Типоразмер канала выбираем с учетом расположения труб в нем в зависимости от допустимых расстояний до строительных конструкций (см. рис.4.5).

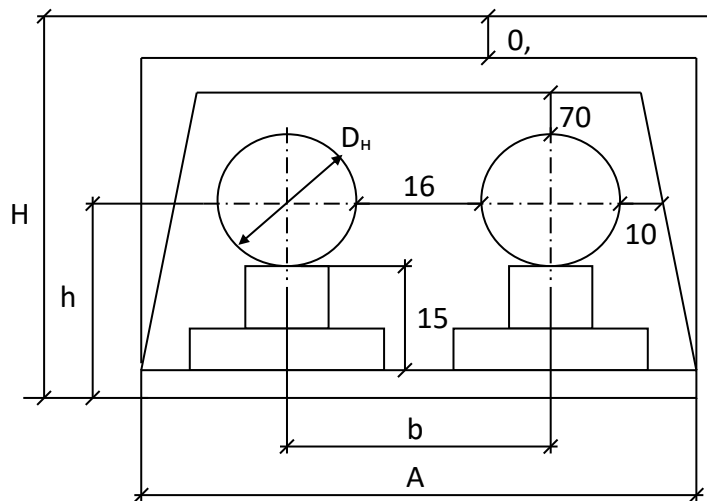


Рис.4.5- Расчетная схема канала

Решение

$\max \delta_{из} = 100 \text{ мм}$

$D_H = 325 \text{ мм}, \quad D_y = 300 \text{ мм}.$

$A = 100 \cdot 2 + 160 + 325 \cdot 2 + 2 \cdot 100 = 1100 \text{ мм};$

$H = 70 + 2 \cdot 100 + 2 \cdot 325 + 150 = 1070 \text{ мм}.$

Принимаем канал КЛ 150x120, основные показатели канала для разрабатываемого участка сети – в табл. 4.3.

Таблица 4.3 - Типоразмеры каналов и размещение труб в них

Dy , мм	Dн· S, мм	Марк а канал а	От оси трубы до потолка канала	От оси трубы до пола канала	Расстоян ие между осями труб	Толщи на плиты перекр ытия	Толщи на днища канала
30 0	325 х6	МКЛ -6	445	519	1196	130	120

Пример 4.10

Подобрать изоляцию для участка теплопровода (рис.3.3.).

Антикоррозийное покрытие – изол в два слоя по холодной изольной мастике марки МРБ-Х-Т15 (ГОСТ 10296-79, ТУ21-27-37-74 МПСМ).

Общая толщина покрытия 5-6 мм.

Основной слой (тепловая изоляция) – маты из стеклянного штапельного волокна на связующем марки МС-50 (ГОСТ 10499-78).

Материал не горюч, температура применения до 180 °С.

Покровный слой – стеклопластик рулонный РСТ марки РСТ-А (ТУ-6-11-145-80). Общая толщина покрытия 0,25-0,5 мм. Материал трудногорюч.

Изделия основного слоя и защитное покрытие закрепляются на трубопроводах бандажами из листовой углеродистой стали и проволоочной скруткой.

Решение

$$h = [(H-120-519)+130+500] = 1105-120-519+130+500 = 1096 \text{ мм} \approx 1,1 \text{ м.}$$

$$\text{Для } \tau_{1\max} = 150 \text{ оС } \tau_{m1} = 90 \text{ оС};$$

$$T_{2\min} = 70 \text{ оС } \tau_{m2} = 50 \text{ оС.}$$

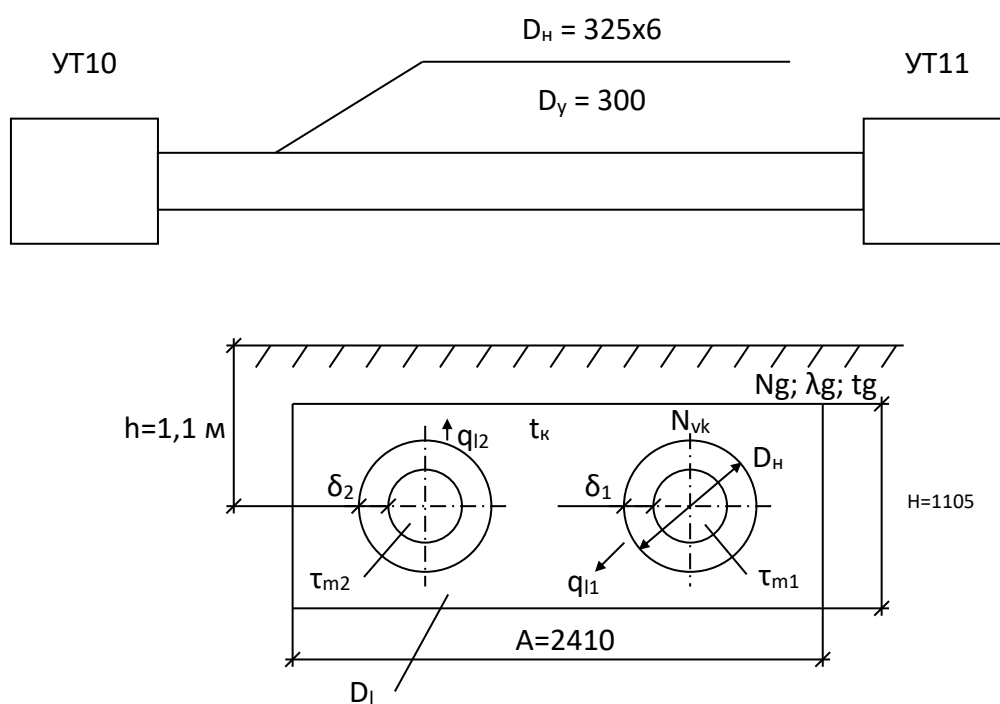


Рис. 4.6- Расчетная схема

$$q_{l1} = 74 \text{ Вт/м};$$

$$q_{l2} = 27 \text{ Вт/м.}$$

Определим эквивалентный диаметр канала, как:

$$D_e = \frac{2 \cdot H \cdot A}{H + A} = \frac{2 \cdot 1105 \cdot 2410}{1105 + 2410} = 1515 \text{ мм} \approx 1,52 \text{ м.}$$

Рассчитываем термическое сопротивление т/о от воздуха канала к его стенкам:

$$r_{\delta k} = r_{vk} = \frac{1}{\pi \cdot D_l \cdot \alpha_{\delta k}},$$

где $\alpha_{\delta k} = 8 \text{ Вт/м}^2\text{оС}$ – коэффициент т/о от поверхности изоляции к воздуху канала;

$$r_{\delta k} = r_{vk} = \frac{1}{3,14 \cdot 1,52 \cdot 8} = 0,026 \text{ м}^2\text{оС/Вт.}$$

Определим термическое сопротивление грунта:

$$r_s = \frac{1}{1,5 \cdot 2 \cdot 3,14} \cdot \ln \left[2 \cdot \frac{1,1}{1,52} + \sqrt{4 \cdot \left(\frac{1,1}{1,52} \right)^2 - 1} \right] = 0,096 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{оС}}{\text{Вт}} \approx 0,1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{оС}}{\text{Вт}}$$

Находим температуру воздуха в канале:

$t_g = f(h, t_o)$ – температура грунта на отметке заложения оси труб;

$$t_g = 5,3 \text{ }^\circ\text{С};$$

$$t_k = 5,3 + (74 + 27) \cdot (0,026 + 0,1) = 18,03 \text{ }^\circ\text{С.}$$

Рассчитываем суммарное термическое сопротивление теплопроводов:

$$r_{tot1} = \frac{90 - 18,03}{74} = 0,97 \text{ м}^2\text{оС/Вт,}$$

$$r_{tot2} = \frac{50 - 18,03}{27} = 1,18 \text{ м}^2\text{оС/Вт.}$$

Определяем коэффициент теплопроводности изоляции.
По [4] $\lambda_{из} \leq 0,07 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$, при $\rho_{из} = 400 \text{ кг/м}^3$.

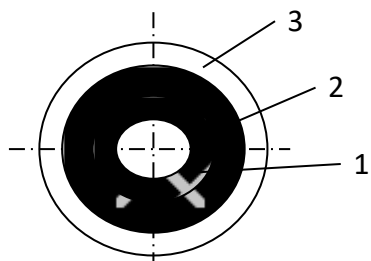


Рис. 4.7 - Конструктивная схема

- 1 – антикоррозионный слой (изол или эпоксидное покрытие из эмали);
2 – т/и – маты из стеклянного штапельного волокна МС-50;
3 – покровный слой – рулонный стеклопластик ([14]).

$$\lambda_{из} = 0,042 + 0,00028 \cdot t_m,$$

где t_m – средняя температура теплоизоляционного слоя

$$t_{m_i} = \frac{\tau_{m_i} + 40}{2},$$

$$t_{m_1} = \frac{90 + 40}{2} = 65 \text{ °С} \rightarrow \lambda_{из_1} = 0,042 + 0,00028 \cdot 65 = 0,06 \text{ Вт/м}^2\text{°С},$$

$$t_{m_2} = \frac{50 + 40}{2} = 45 \text{ °С} \rightarrow \lambda_{из_2} = 0,042 + 0,00028 \cdot 45 = 0,055 \text{ Вт/м}^2\text{°С}.$$

8. Определяем параметр B (отношение $B = d_i/d$),
где d_i – изолированная труба;
 d – неизолированная труба.

$$\ln B_i = 2\pi \cdot \lambda_{\text{из}_i} \cdot \left[N_{\text{tot}_i} - \frac{1}{\pi \cdot 8 \cdot (D_H + 0,1)} \right],$$

$$B_i = e^{\ln B_i};$$

$$\ln B_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,06 \cdot \left[0,97 - \frac{1}{3,14 \cdot 8 \cdot (0,325 + 0,1)} \right] = 0,33,$$

$$B_1 = 1^{0,33} = 1,39;$$

$$\ln B_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,055 \cdot \left[1,18 - \frac{1}{3,14 \cdot 8 \cdot (0,325 + 0,1)} \right] = 0,38,$$

$$B_2 = 1,46.$$

9. Рассчитываем толщину тепловой изоляции:

$$\delta_1 = \frac{0,325 \cdot (1,39 - 1)}{2} = 0,063 \text{ м};$$

$$\delta_2 = \frac{0,325 \cdot (1,46 - 1)}{2} = 0,075 \text{ м};$$

$\delta_{\text{max}} = 0,240 \text{ м}$, при $t_0 = -35 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_y = 300 \text{ мм}$.

10. Окончательно с учетом уплотнения $k_c = 1,6$:

$$\delta_1 = 0,063 \cdot 1,6 \cdot \frac{0,325 + 0,063}{0,325 + 2 \cdot 0,063} = 0,87 \text{ м},$$

$$\delta_2 = 0,075 \cdot 1,6 \cdot \frac{0,325 + 0,075}{0,325 + 2 \cdot 0,075} = 0,1 \text{ м}.$$

Округляем δ_i до рекомендуемых:

$$\delta_1 = 100 \text{ мм},$$

$\delta_2 = 100$ мм.

Пример 4.10

Определить температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах при температуре наружного воздуха $t_H = -15^\circ\text{C}$. Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления $t_{p.o.} = -26^\circ\text{C}$. Расчетные температуры принять: $t_B = +18^\circ\text{C}$; $\tau_1' = 150^\circ\text{C}$; $\tau_{2,0} = 70^\circ\text{C}$; $\tau_3' = 95^\circ\text{C}$.

Решение

Определяем расчетные значения температурного напора в отопительных приборах системы отопления, перепада температур сетевой воды и перепада температур воды в отопительной системе:

$$\Delta t_0' = \frac{\tau_3' + \tau_{2,0}}{2} - t_B = \frac{95 + 70}{2} - 18 = 64,5^\circ\text{C};$$

$$\delta \tau_0' = \tau_1' - \tau_{2,0} = 150 - 70 = 80^\circ\text{C};$$

$$\Theta' = \tau_3' - \tau_{2,0} = 95 - 70 = 25^\circ\text{C}.$$

Относительный расход тепла на отопление при текущей наружной температуре $t_H = -15^\circ\text{C}$ находим по формуле

$$\overline{Q}_o = \frac{t_B - t_H}{t_B - t_{p.o.}} = \frac{18 - (-15)}{18 - (-26)} = 0,75.$$

Подставляем найденные величины в формулы

$$\tau_1 = t_B + \Delta t_0' \overline{Q}_o^{0,8} + (\delta \tau_0' - 0,5 \Theta') \overline{Q}_o =$$

$$= 18 + 64,5 \cdot 0,75^{0,8} + (80 - 0,5 \cdot 25) \cdot 0,75 = 120^\circ\text{C}.$$

$$\tau_{2,0} = t_B + \Delta t_0' \overline{Q}_o^{0,8} - 0,5 \Theta' \overline{Q}_o = 18 + 64,5 \cdot 0,75^{0,8} - 0,5 \cdot 25 \cdot 0,75 = 60^\circ\text{C}.$$

Результаты расчетов представлены на рисунке 4.8

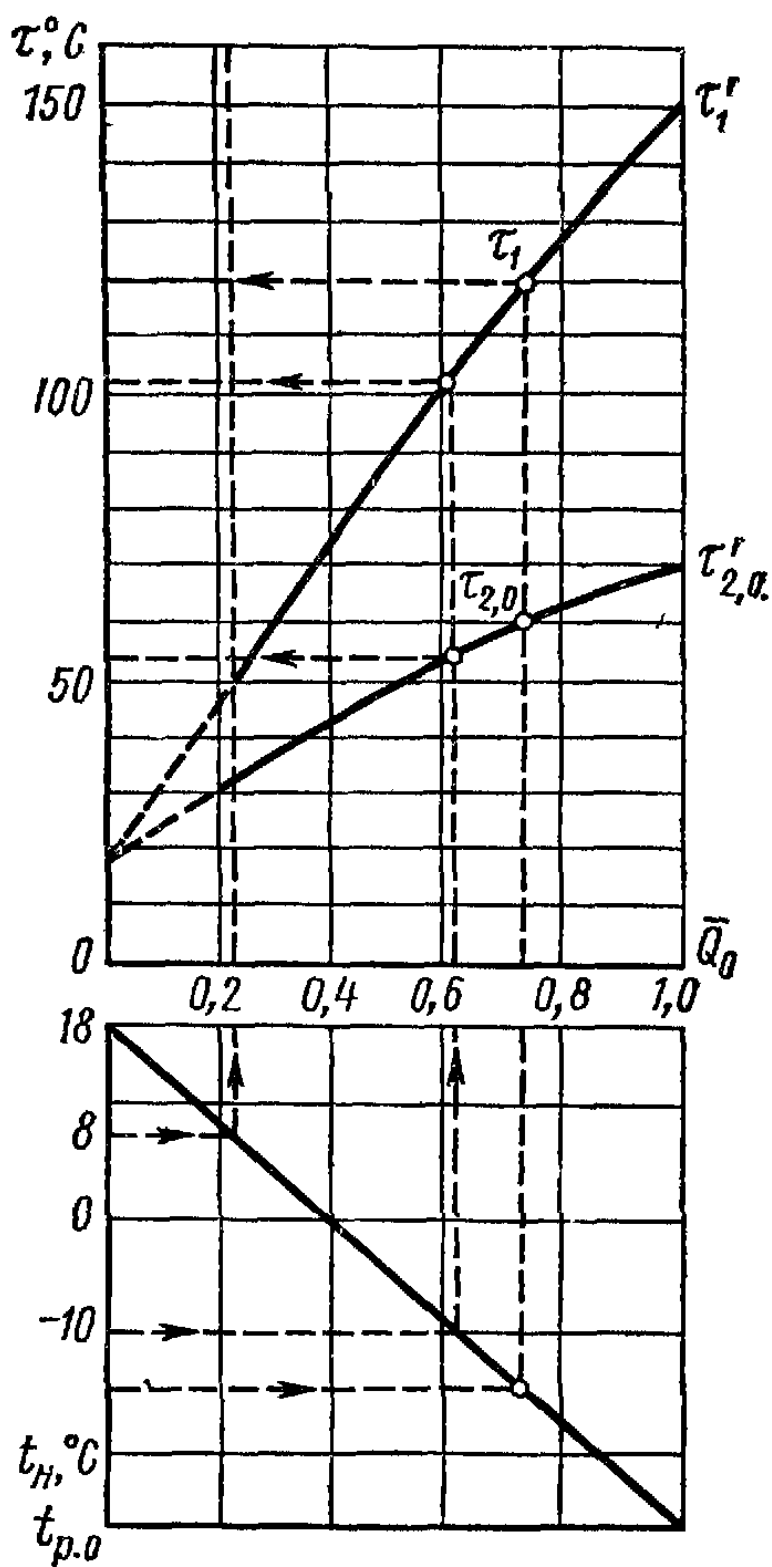


Рис. 4.8 - График температур качественного регулирования отопительной нагрузки

Пример 4.11

Длина стальной трубы 7м, а диаметр 0,6м. Какой утеплитель нужно подобрать из ниже предложенных вариантов, чтобы температура теплоносителя равная 75°C понизилась на 4°C, если температура наружного воздуха -27°C, а расход воды составляет 20кг/с:

а) вата $\delta=79\text{мм}$, $\lambda=0,13\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

б) полиэтилен $\delta=160\text{мм}$, $\lambda=0,32\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

в) пенополистирол $\delta=220\text{мм}$, $\lambda=0,25\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Решение:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}) = 20 \cdot 4,187 \cdot 4 = 334,96 \text{ кДж/с}$$

$$Q = F \cdot K \cdot \left(\frac{t_{\text{нач}} + t_{\text{кон}}}{2} - t_{\text{нар}} \right), \text{ кДж/кг}$$

$$K = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4} \cdot l \cdot \left(\frac{t_{\text{нач}} + t_{\text{кон}}}{2} - t_{\text{нар}} \right)}$$

$$= \frac{334,96}{\frac{3,14 \cdot (0,6)^2 \cdot 7}{4} \cdot \left(\frac{75 + 71}{2} - (-27) \right)} =$$

$$= \frac{334,96}{1,9782 \cdot 100} = 1,693 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{H}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}}}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\alpha_{\text{H}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}}} = 0,59$$

Примечание: решающий должен знать, что значение: $\frac{1}{\alpha_H} + \frac{1}{\alpha_B}$

$$K = \frac{1}{0,1 + \frac{0,16}{0,32}} = \frac{1}{0,6} = 1,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$$

Ответ: б) полиэтилен $\delta=160$ мм, $\lambda=0,32$ Вт/(м·К).

Пример 4.12

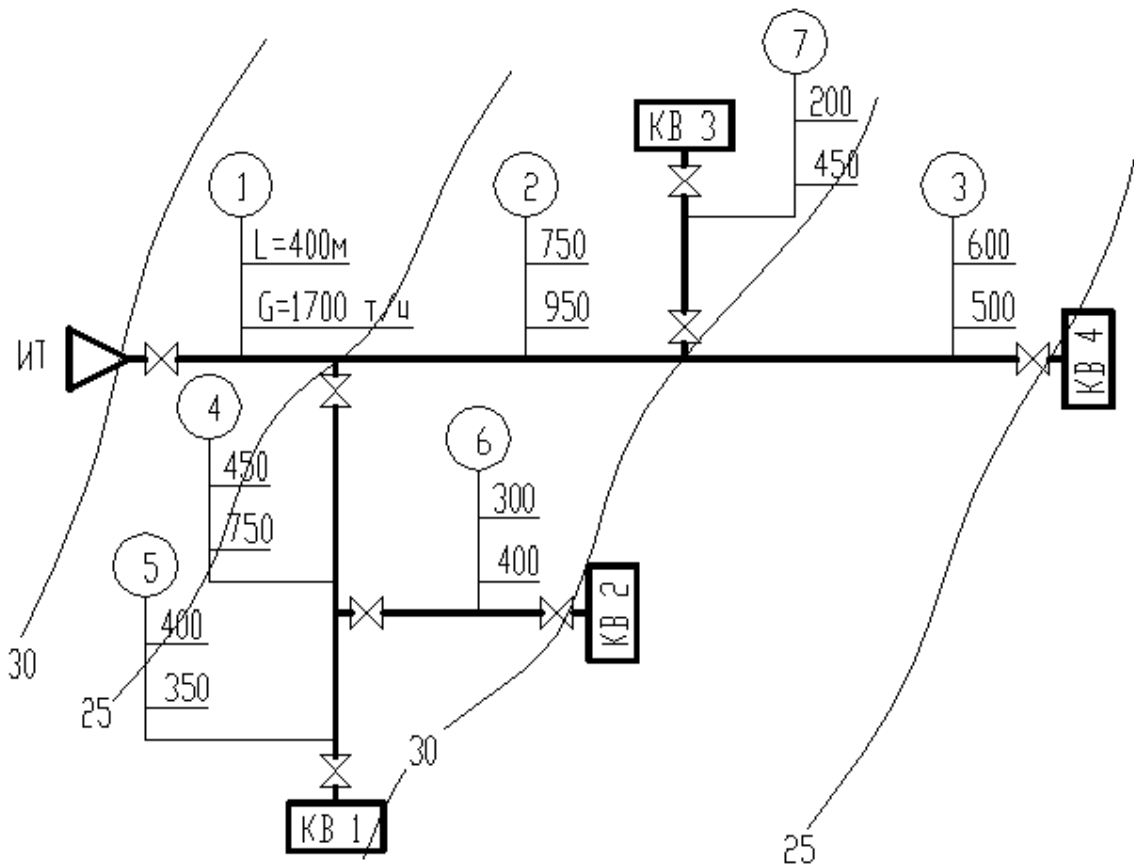


Рис.4.9– Схема тепловой сети

По данным гидравлического расчета (см. таблицу 4.4) построить пьезометрические графики для отопительного и неотапительного периодов закрытой системы теплоснабжения. Максимальный расход сетевой воды на горячее водоснабжение в

летний период года $G_{\text{hmax}}^s = 800$ т/ч. Расчетные температуры сетевой воды 150/70 °С. Этажность зданий - 9 этажей.

Таблица 4.4 – Результаты гидравлического расчета

№ участка	ΔP , Па	$\Sigma \Delta P$, Па
1	9	10
1	20118	94583
2	45485	74465
3	28980	28980
4	40950	68086
5	27136	27136
6	28967	28967
7	25620	25620

Решение

Для построения пьезометрического графика (рис.4.10) примем масштабы: вертикальный Мв 1:1000 и горизонтальный Мг 1: 10000. Построим, используя горизонтали и длины участков, продольные профили главной магистрали (участки 1, 2, 3) и ответвлений (участки 4,5 и участок 7). На профилях в соответствии с масштабом построим высоты присоединяемых зданий. Под профилем располагается спрямленная однолинейная схема теплосети, номера и длины участков, расходы теплоносителя и диаметры, располагаемые напоры.

Приняв предварительно напор на всасывающей стороне сетевых насосов $H_{\text{вс}} = 30$ метров (15-30 м), строим линию потерь напора обратной магистрали теплосети А-В. Превышение точки В по отношению к точке А будет равно потерям напора в обратной магистрали которые в закрытых системах принимаются равными потерям напора в подающей магистрали и составляют в данном примере 9,5 метров. Далее строим линию В-С - линию располагаемого напора для системы теплоснабжения квартала №4. Располагаемый напор в данном примере принят равным 40 метров (не менее 25 м). Затем строим линию потерь напора подающей

магистральной теплосети С-Д. Превышение точки Д по отношению к точке С равно потерям напора в подающей магистрали и составляет 9,5 метра.

Далее строим линию Д-Е – линию потерь напора в теплофикационном оборудовании источника теплоты, которые в данном примере приняты равными 25 метров (25-30 м). Положение линии статического напора S-S выбрано из условия недопущения «оголения», «раздавливания» и вскипания теплоносителя (на 3-5 метров выше самого высокого абонента).

Далее приступаем к построению пьезометрического графика для неотапительного периода. Определим для данного периода потери напора в главной магистрали $\Delta H_{\text{под}}^s$ используя формулу пересчета

$$\Delta H_{\text{под}}^s = \Delta H_{\text{под}} \cdot \left(\frac{G_{\text{hmax}}^s}{G_d} \right)^2 = 9,5 \cdot \left(\frac{800}{1700} \right)^2 = 2,8 \text{ м}$$

Аналогичные потери напора 2,8м, (система закрытая), примем и для обратной магистрали. Потери напора в оборудовании источника тепла, а также располагаемый напор для квартальной теплосети примем аналогичными что и для отопительного периода. Используя примененную ранее методику, построим пьезометрический график для неотапительного периода (А В'С'Д'Е'). После построения пьезометрических графиков следует убедиться, что расположение их линий соответствует требованиям для разработки гидравлических режимов. При необходимости напор на всасывающей стороне сетевых насосов $H_{\text{вс}}$ и, соответственно, положение пьезометрических графиков могут быть изменены (за счет изменения напора подпиточного насоса).

Пример 4.13

Определить горизонтальное осевое усилие $H_{\text{го}}$ на неподвижную опору Б. Определить вертикальную нормативную нагрузку F_v на

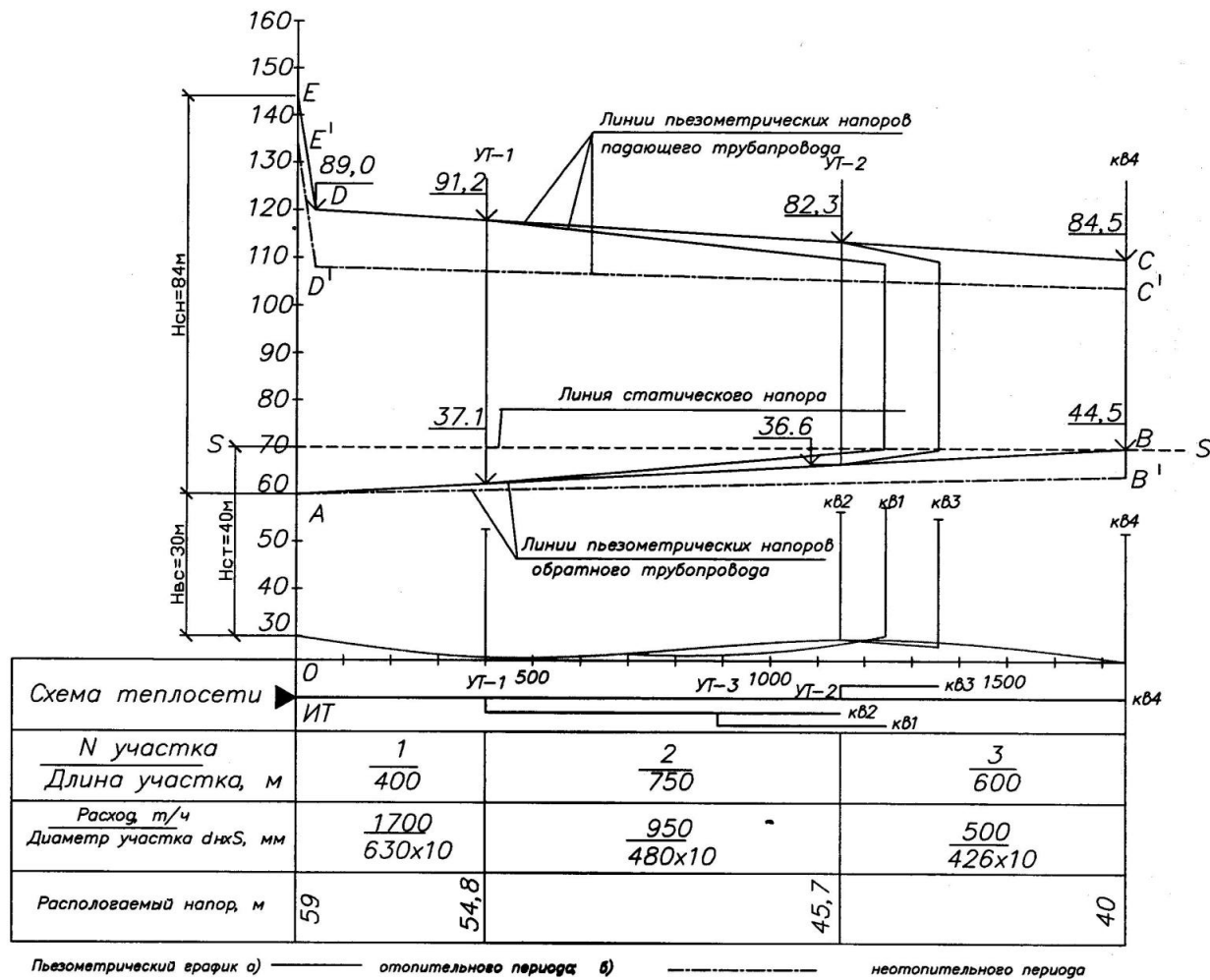


Рис 4.10 – Пьезометрический график

неподвижную опору. Схема расчетного участка приведена на рисунке 4.11.

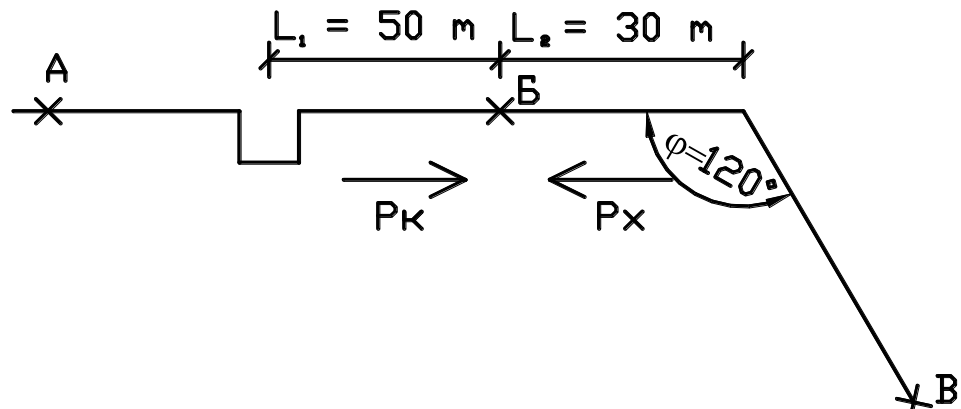


Рис.4.11 - Схема расчетного участка

Трубопровод с $d_{нхS} = 159 \times 6$ мм проложен в техподполье. Вес одного погонного метра трубопровода с водой и изоляцией $G_h = 513$ Н. Расстояние между подвижными опорами $L = 7$ м.

Коэффициент трения в подвижных опорах $\mu = 0,4$. Реакция компенсатора $P_k = 7,85$ кН. Сила упругой деформации угла поворота $P_x = 0,12$ кН.

Решение

Выполним расчет горизонтальных усилий $H_{го}$ на опору Б для различных тепловых режимов работы трубопровода

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

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

$$H_{го} = P_x + \mu \cdot G_h \cdot L_2 - 0,7 \cdot (P_k + \mu \cdot G_h \cdot L_1) = 120 + 0,4 \cdot 513 \cdot 30 -$$

$$-0,7 \cdot (7850 + 0,4 \cdot 513 \cdot 50) = -11714 \text{ Н}$$

$$H_{\text{го}} = P_x + \mu \cdot G_h \cdot L_1 - 0,7 \cdot (P_k + \mu \cdot G_h \cdot L_2) = 120 + 0,4 \cdot 513 \cdot 50 - 0,7 \cdot (7850 + 0,4 \cdot 513 \cdot 30) = -3626 \text{ Н}$$

В качестве расчетного усилия принимаем наибольшее значение

$$H_{\text{го}} = 13801 \text{ Н} = 13,801 \text{ кН.}$$

Вертикальную нормативную нагрузку на подвижную опору F_v определим по формуле

$$F_v = G_h \cdot L = 513 \cdot 7 = 3591 \text{ Н} = 3,591 \text{ кН.}$$

Библиографический список

1. ГОСТ 21.605-82(1997) СПДС. Сети тепловые (тепломеханическая часть): Рабочие чертежи. М.: Изд. стандартов, 1997.
2. СП 42.13330.2011 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (с Поправкой)
3. СП 131.13330.2020 Строительная климатология
4. СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003
5. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию / И.В. Беляйкина и др.; Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 376с.
6. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / В.И. Маток и др. М.: Стройиздат, 1988. 432 с.
7. СП 41-101-95 Проектирование тепловых пунктов. Минстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1997. 79 с.
8. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 320 с.
9. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов ВУЗов / В.Е. Козин и др. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
10. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1987. 320 с.
11. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергоиздат, 1982. 360 с.
12. Теплоснабжение: Учебник для ВУЗов / А.А. Ионин и др.; Под ред. А.А. Ионина, М.: Стройиздат, 1982. 336 с.
13. Справочник строителя тепловых сетей / Под ред. С.А. Захаренко, Изд. 2-е. М.: Энергоатомиздат.1984. 184 с.
14. СП 61.13330.2012 «СНиП 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов».
15. СП 510.1325800.2022 СП Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения