

Министерство науки и образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Р. С. Закируллин

# НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОГАЗОСНАБЖЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 Строительство

Оренбург  
2019

УДК 697.1  
ББК 38.112  
3180

Рецензент – профессор, доктор физико-математических наук С. Н. Летута

3180      **Закируллин, Р. С.**  
Надежность и безопасность систем теплогазоснабжения и вентиляции :  
учебное пособие / Р. С. Закируллин; Оренбургский гос. ун-т. –  
Оренбург: ОГУ, 2019.  
ISBN

В учебном пособии рассмотрены вопросы надежности и безопасности систем теплоснабжения, газоснабжения и вентиляции, представлен пример расчета показателей надежности теплоснабжения района города.

Учебное пособие предназначено для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 08.03.01, 08.04.01 Строительство

ISBN

УДК 697.1  
ББК 38.112

© Закируллин Р. С., 2019  
© ОГУ, 2019

# Содержание

Введение .....	5
1 Основные понятия надежности .....	6
1.1 Нормативные документы, определяющие понятие надежности .....	6
1.2 Понятие о системе теплоснабжения.....	7
1.3 Количественные характеристики надежности систем ТГВ.....	7
1.4 Системные показатели надежности систем ТГВ.....	11
1.5 Статистические законы распределения вероятности отказа .....	13
2 Постепенные и стихийные причины повреждаемости тепловой сети .....	16
2.1 Коррозия металлоконструкций.....	16
2.2 Гидравлической удар в трубопроводе .....	16
2.3 Тепловое расширение трубопровода .....	17
2.4 Механические деформации трубопровода .....	18
3 Категории надежности.....	19
3.1 Безотказность систем ТГВ .....	19
3.2 Долговечность систем ТГВ.....	19
3.3 Ремонтпригодность систем ТГВ.....	20
3.4 Сохраняемость систем ТГВ.....	20
4 Надежность трубопроводов под давлением .....	21
4.1 Рабочее и испытательное давление в трубопроводе .....	21
4.2 Оценка надежности трубопроводов под давлением.....	22
4.3 Расчет прочности трубопроводов.....	22
5 Обеспечение заданных параметров теплоснабжения.....	23
5.1 Тепловой расчет трубопровода.....	23
5.2 Годовой график тепловой нагрузки .....	23
5.3 Суточный график энергоснабжения.....	24
5.4 Гидравлический расчет тепловой сети и гидравлическая устойчивость .....	24
5.5 КПД тепловой сети .....	25
6 Методы повышения надежности систем теплогазоснабжения .....	27

6.1 Резервирование элементов трубопроводов .....	28
6.2 Защита теплосети от внешних воздействий .....	28
6.3 Внутренняя защита трубопроводов.....	28
6.4 Методы компенсации внутренних напряжений трубопроводов.....	29
6.5 Сооружение автономных источников электроэнергии на котельных.....	30
6.6 Повышение надежности систем газоснабжения .....	30
7 Надежность местной вытяжной вентиляции .....	33
8 Надежность систем кондиционирования воздуха .....	37
9 Проектирование систем вентиляции и кондиционирования с учетом требований надежности и безопасности.....	43
10 Требования к пожарной безопасности систем вентиляции и кондиционирования .....	49
11 Надежность в технике .....	62
11.1 Основные понятия.....	62
11.2 Состояния.....	63
11.3 Временные понятия.....	64
11.4 Отказы, дефекты, повреждения .....	65
11.5 Техническое обслуживание, восстановление и ремонт .....	67
11.6 Показатели надежности .....	69
11.7 Разработка, обеспечение, анализ .....	71
11.8 Резервирование.....	72
11.9 Испытания на надежность.....	74
8 Пример выполнения курсового проекта по дисциплине «Надежность и безопасность систем теплогазоснабжения и                      вентиляции» .....	76
Список использованных источников .....	104

## Введение

«Надежность» является понятием многогранным и достаточно важным для всех типов технических устройств, не исключая системы теплогасоснабжения и вентиляции. Надежность характеризуется как рядом категорий, так и рядом числовых характеристик. Теория надежности позволяет оценить вероятность возможных аварий в системах теплогасоснабжения и вентиляции, экономический ущерб и временную потерю комфортности внутреннего микроклимата в помещениях. Надежность и безопасность систем теплогасоснабжения и вентиляции достигаются расчетным путем и выбором наиболее правильного технического решения каждого конкретного вопроса. Учебное пособие посвящено формированию у студентов знаний, умений и навыков по обеспечению надежной и безопасной работы систем теплогасоснабжения и вентиляции (ТГВ), системному изложению понятий надежности и безопасности в системах ТГВ, нормативно-правового обеспечения и основ техники безопасности при монтаже, эксплуатации, обслуживании и ремонте систем ТГВ.

# 1 Основные понятия надежности

Качественная оценка понятия «надежность» проводится по категориям надежности, количественная – по числовым характеристикам. В данной главе приводятся основные понятия, термины и определения, касающиеся надежности.

## 1.1 Нормативные документы, определяющие понятие надежности

В основном нормативном документе, устанавливающем термины и определения надежности [1], дается следующее определение: «Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость, готовность или определенные сочетания этих свойств». Надежность теплоэнергетической системы заключается в свойстве обеспечивать бесперебойную работу в течение всего срока эксплуатации и поддерживать в заданных интервалах функциональные параметры, заложенные в договоре о теплоснабжении. Таким образом, в законодательстве устанавливается норма, согласно которой поставщик обязан гарантировать потребителю не только стабильность теплоснабжения, но и обеспечение определенных параметров [2]. Обеспечивается достижение трех основных параметров:

- 1) температура теплоносителя  $t_t$ , °С;
- 2) расход теплоносителя  $G$ , кг/с;
- 3) давление на абонентском вводе  $p_a$ , атм, или напор  $H_a$ , м.

Предъявляются также специальные требования к используемой воде [3]. В договоре о теплоснабжении учитывается гарантированное количество теплоты в Гкал, которое поставщик должен отпустить потребителю в течение года. Температура воды для систем домового отопления оговаривается в соответствии с температурным графиком и составляет для пика осенне-зимнего максимума (ОЗМ) 95°С [4]. Согласно [5], температура горячей воды в местах водоразбора должна быть плюс  $(55 \pm 5)$  °С. Любое отклонение от заданных температур внутри помещений и

горячей воды может расцениваться как нарушение надежности теплоснабжения. Необходимо расчетное прогнозирование подобной ситуации.

Температура воды на абонентском вводе является качественным показателем. Расход теплоносителя  $G$ , кг/с, является количественным показателем и зависит от многих факторов. Основной задачей надежного теплоснабжения является обеспечение потребителя теплоносителем заданного качества и заданного количества.

## **1.2 Понятие о системе теплоснабжения**

В систему теплоснабжения входит совокупность энергоустановок [6], связанных между собой тепловой сетью (системой трубопроводов). Как правило, система теплоснабжения содержит три основных элемента: источник теплоты (ТЭЦ, РТС, КТС, АЭС), тепловую сеть и потребителей тепла. Тепловая сеть обычно состоит из двух трубопроводов – прямого (подающего) и обратного. По прямому трубопроводу подается теплоноситель с высокими значениями параметров: перегретая вода с температурой до  $+150^{\circ}\text{C}$  и давлением до 16 атм. Вследствие высокого давления вода в трубе не вскипает. После отдачи тепла потребителю вода с температурой  $+30\dots+70^{\circ}\text{C}$  поступает на источник по обратной трубе.

## **1.3 Количественные характеристики надежности систем ТГВ**

Поскольку понятие надежности имеет фундаментальный характер, числовые характеристики тесно связаны с теорией вероятностей и математической статистикой [7]. Числом можно описать то или иное «количество» надежности данного «качества» (т.е. данной категории). Но одно лишь число не может охарактеризовать всю надежность устройства, поэтому надо определять «количество» надежности по каждой категории. Например, изделие может быть безотказным и одновременно иметь очень малый срок службы (медицинские препараты, ступени двигателя космического корабля).

**Вероятность безотказной работы** системы ТГВ можно представить в виде:

$$P_{\text{бо}} = (n - m_{\text{отк}}) / n = 1 - m_{\text{отк}} / n, \quad (1.1)$$

где  $m_{\text{отк}}$  – число отказов из общего возможного количества отказов. Соответственно, вероятность отказа будет равна:

$$P_{\text{отк}} = m_{\text{отк}} / n. \quad (1.2)$$

Вероятность отказа является «частотным» определением понятия вероятности события. При равенстве вероятности отказа и безотказной работы системы ТГВ достигается равновероятностное распределение (характерно для бросания монеты: «орел»-«решка»):  $P_{\text{отк}} = P_{\text{бо}} = 0,5$ .

Законы распределения природных процессов носят нормальный характер (распределение Гаусса) или экспоненциальный характер (распределение Пуассона). Например, процессы старения трубопровода во времени хорошо описываются распределением Пуассона.

Тепловые сети имеют достаточно низкий показатель вероятности безотказной работы. Для заданной конфигурации сети вероятность ее безотказной работы рассчитывают в зависимости от протяженности и разветвленности. Общая безотказность системы теплоснабжения при последовательном соединении  $N$  элементов с безотказностью каждого элемента сети  $P_i(z)$  за время работы  $z$  рассчитывается по формуле:

$$P(z) = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_i \times \dots \times P_N = \prod_{i=1}^{i=N} P_i(z). \quad (1.3)$$

Система теплоснабжения состоит из множества элементов, каждый из этих которых имеет свою вероятность безотказной работы: котел, задвижки, клапаны, насосы, трубопроводы, теплообменники, распределительная арматура и т. д.

**Интенсивность потока отказов**  $\lambda$  удобнее описывает отказы, возникающие на протяженном трубопроводе, т. к. при увеличении длины трубопровода его надежность снижается. Значение интенсивности  $\lambda$  относят к единице длины трубопровода заданного условного диаметра  $D_y$  и времени наблюдения в один год. Величина



$\lambda$ ,  $\text{отк}^{-1}$ , характеризует количество отказов в расчете на 1 км длины трубопровода за один год.

Для системы радиальной сети трубопроводов с длинами  $L$  общая интенсивность потока отказов равна:

$$\lambda_c = \lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2 + \dots + \lambda_n L_n = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i L_i. \quad (1.4)$$

Дискретные элементы сети (котлы, задвижки, клапаны, насосы, теплообменники, распределительная арматура) также характеризуются значениями интенсивности потока отказов  $\lambda$ . Общее значение интенсивности потока отказов системы, не имеющей трубопроводов и состоящей из  $N$  элементов, составляет:

$$\lambda_c = \lambda_1 N_1 + \lambda_2 N_2 + \dots + \lambda_n N_n = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_i N_i, \quad (1.5)$$

где  $N_i$  – количество  $i$ -х элементов с известным значением  $\lambda_i$ .

Снижение величины вероятности безотказной работы трубопровода при естественных процессах старения аппроксимируется экспоненциальным распределением:

$$P_{60} = \exp(-z\lambda_c), \quad (1.6)$$

где  $z$  – длительность наблюдения в годах.

Важным показателем надежности является *срок службы изделия*. При экспоненциальном характере процессов старения трубопровода из-за коррозии и других естественных причин неминуемо ограничение временного отрезка возможной эксплуатации изделия. В конце срока службы значение интенсивности потока отказов  $\lambda$  близко к нормативному и дальнейшая эксплуатация трубопровода невозможна или нецелесообразна по экономическим и другим причинам. На рис. 1.1 показана вероятность безотказной работы изделия в зависимости от длительности эксплуата-

ции  $z$  для максимального и минимального (в случае интенсивной загруженности) срока службы элемента системы ТГВ.

Через определенное время службы, когда значение вероятности безотказной работы  $P_{60}$  снижается до 0,45, отказ уже может наблюдаться более чем в половине случаев и система подлежит капитальному ремонту или полной замене.

**Наработка на отказ** показывает «скорость» старения трубопровода, т. е. ориентировочное вероятное время, в течение которого система будет работать исправно. Причинами отказа системы или устройства могут быть как физические процессы старения, так и внезапные события, например, природные катастрофы.

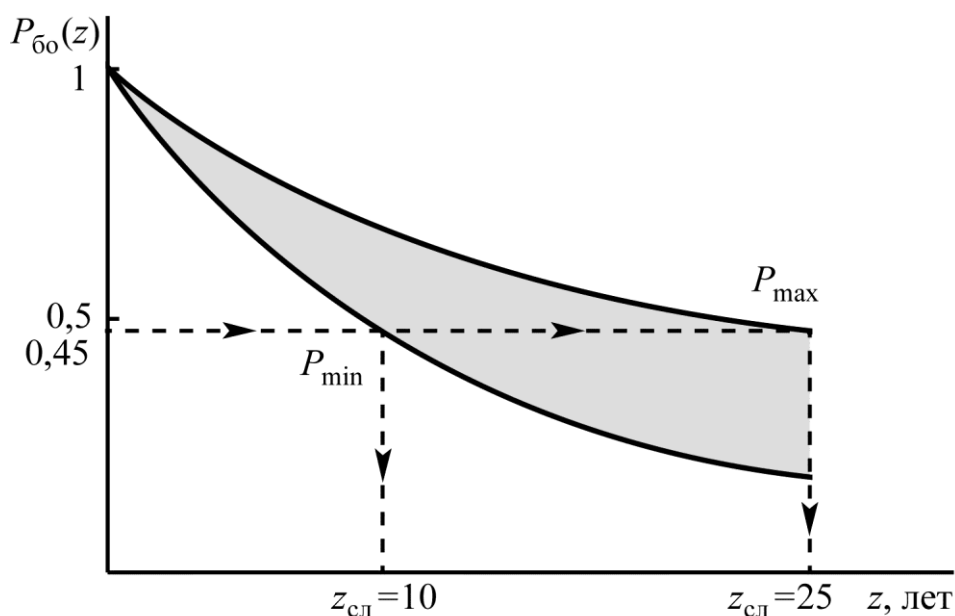


Рисунок 1.1 – Снижение вероятности безотказной работы устройства в течение срока эксплуатации

Для трубопроводов наработка на отказ составляет от одного до пяти лет. В других системах наработка на отказ может составлять от нескольких секунд (ступени космической ракеты) до 30–50 лет (мосты, бетонные сооружения). Показатель наработки на отказ является субъективным фактором. Например, один трубопровод может иметь наработку на отказ 2,5 года, а второй – 3 года, однако при этом второй может стоить значительно дороже.

## 1.4 Системные показатели надежности систем ТГВ

Для оценки надежности теплоэнергетической системы в течение длительного периода (года и более) применяются интегральные показатели. Они позволяют получить объективную картину работы энергосистемы за выбранный период и выявить упущенные выгоды от эксплуатации системы, простои, затраты на аварийный и восстановительный ремонт.

Значение интенсивности потока отказов можно приближенно рассматривать в качестве *показателя повреждаемости теплосети*. Этот показатель характеризуется временной функцией:

$$P_{\text{бo}} = f(\lambda, z). \quad (1.7)$$

При каком-либо характерном значении интенсивности потока отказов  $\lambda$  (таблица 1), например, для трубопровода конкретного типа, можно рассмотреть изменение функции (1.7) в интервале времени от 0 до 25 лет.

Таблица 1 – Шкала надежности оборудования

№ п/п	Тип оборудования	$\lambda$ , отк <sup>-1</sup>	Примечание
1	Насосы	0,15...0,3	Для крупных насосов мощностью более 100 кВт $\lambda = 0,1 \dots 0,12$ отк <sup>-1</sup>
2	Задвижки с электроприводом	0,08...0,1	
3	Вентили и арматура	0,03...0,06	С ручным приводом
4	Трубопроводы со сварными швами, 100 м прокладки	0,004...0,02	В зависимости от условий прокладки и грунта

Комплекс значений функции (1.7) будет представлять собой двумерную поверхность, вершина которой принадлежит начальному значению времени  $z_{\text{п}}$  после ввода системы в эксплуатацию (после проверки и приработки системы). Значение вероятности безотказной работы  $P_{\text{бo}}$  в начале эксплуатационного периода может до-

стигать уровня 0,95 и выше. Убывание функции  $P_{60}$  и соответствующее снижение надежности в течение времени эксплуатационного периода  $z$  описывается уравнением (1.6).

Интегральная оценка сложности и стоимости разветвленной теплосети с большим количеством трубопроводов различного диаметра и различной длины участков проводится с помощью понятия *материальной характеристики* [2]. Материальная характеристика  $M_0$  сети отображает сумму поверхностей всех участков, т. е. имеет размерность  $m^2$ :

$$M_0 = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{i=1}^{i=n} F_i, \quad (1.8)$$

где  $F_i$  – поверхность  $i$ -го участка сети, которая для круглоцилиндрических труб равна:

$$F_i \approx \pi DL_i. \quad (1.9)$$

Боковые ответвления магистральной сети образуют локальные (местные) сети. Главные боковые ответвления магистральной сети называют ответвлениями I порядка, боковые ответвления от них – II порядка. По мере удаления от источника диаметры труб уменьшаются и у самого отдаленного потребителя могут составлять 100...150 мм.

Гарантированное число часов  $n$ , в течение которых поставщик обязан поставлять потребителю горячую воду заданных параметров, оговаривается в договоре на теплоснабжение. Однако в результате аварий, перебоев с подачей топлива, простоя оборудования по техническим причинам годовое число часов работы системы теплоснабжения бывает меньше. Кроме количества часов простоя, фиксируют и общее количество недополученной теплоты в Гкал. Суммарное количество недополученной тепловой энергии равно:

$$Q_{\text{авар}} = Q_1 n_1 + Q_2 n_2 + \dots + Q_N n_N = \sum_{i=1}^{i=N} Q_i n_i, \quad (1.10)$$

где  $Q_i$  – тепловая мощность;  $n_i$  – время простоя вследствие произошедшей аварии.

В годовом балансе величина *аварийного недоотпуска тепловой энергии* не превышает нескольких процентов от количества теплоты  $Q_{\text{год}}$ , Гкал, полученной потребителями за один календарный год:

$$Q_{\text{ист}} = Q_{\text{авар}} / Q_{\text{год}} \leq 0,01 \dots 0,03 .$$

Важную роль в энергетической стратегии играет автоматизация производства и распределения тепловой энергии. Уровень автоматизации обобщенно оценивается штатным коэффициентом  $K_{\text{шт}}$ , показывающим количество работающих  $N$ , занятых при производстве тепловой энергии установленной мощности источника ( $Q_{\text{ист}}$ ):

$$K_{\text{шт}} = N / Q_{\text{ист}} . \quad (1.11)$$

При более высоком штатном коэффициенте больше доля ручного труда и меньше эффективность производства. В России значение штатного коэффициента составляет 2...3 чел/(Гкал/ч). В развитых странах он составляет всего 0,02...0,05 чел/(Гкал/ч), а многие малые и средние котельные установки работают в полном автоматическом режиме без участия человека.

### 1.5 Статистические законы распределения вероятности отказа

Вероятность безотказной работы энергоустановки, состоящей из деталей в количестве  $N_0$  в случае, когда в процессе эксплуатации к моменту времени  $t$  оказались исправными только  $N_{\text{и}}(t)$  деталей, т. е. остальные  $N_* = N_0 - N_{\text{и}}(t)$  деталей вышли из строя из-за неисправностей, будет равна:

$$P(t) = N_n(t)/N_0. \quad (1.12)$$

Функция  $P(t)$  является интегральной статистической характеристикой, определяющей вероятность отказа установки за все время наблюдения. Статистическая вероятность отказа составляет:

$$F(t) = (N_0 - N_n(t))/N_0 = 1 - P(t). \quad (1.13)$$

Для оценки «скорости выбывания» неисправных изделий вводят дифференциальную характеристику [8] – плотность распределения отказов  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_*}{dt}. \quad (1.14)$$

Она характеризует частоту отказов деталей установки, т. е. число отказов в единицу времени  $dt$ . Уравнения (1.12)–(1.14) являются *основными уравнениями теории надежности*.

При постоянном (независимом от времени) потоке отказов  $\lambda = \text{const}$  применим *экспоненциальный закон распределения*:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda dt\right) = \exp(-\lambda t). \quad (1.15)$$

Такое приближение возможно при анализе работоспособности устройства после прохождения периода приработки, т. е. выхода установки на стационарный рабочий режим, при котором  $\lambda = \text{const}$ . Выражение вероятности безотказной работы до наступления времени  $t$  называют также априорной вероятностью.

В некоторых задачах требуется вычислить вероятность безотказной работы системы в будущем (получить апостериорную вероятность) путем экстраполяции процесса:

$$P(t) = \exp(-\lambda(T - t)), \quad (1.16)$$

где  $t$  – текущее время;  $T$  – время в будущем ( $T > t$ ).

Это выражение позволяет определить поведение энергоустановки в любой момент в последующие годы эксплуатации.

**Нормальный закон распределения** характеризует многие природные процессы, когда множество случайных факторов не влияет друг на друга, а единичное влияние каждого фактора на систему в целом невелико. В теории надежности вводят плотность распределения в общем виде:

$$f(t) = \frac{\exp\left(-\frac{(t - \bar{t})^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (1.17)$$

где  $\bar{t}$  – среднее значение времени (математическое ожидание);  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

## **2 Постепенные и стихийные причины повреждаемости тепловой сети**

В данной главе рассматриваются физическая сущность и динамика развития процессов повреждаемости тепловых сетей. Среди причин возникновения аварий можно выделить две группы процессов: постепенные процессы ухудшения состояния сети (например, коррозия), которые ведут в дальнейшем к внезапной аварии (через 3...5 лет эксплуатации), и стихийные процессы, ведущие к молниеносной аварии (гидроудар, тепловое расширение и др.). Обе группы причин повреждаемости тепловых сетей можно прогнозировать и отслеживать с целью их предупреждения.

### **2.1 Коррозия металлоконструкций**

Коррозия изделий из металла ежегодно в мире выводит из строя более 10 млн. т. металлоконструкций. На восстановление и ремонт этих металлоконструкций расходуется более 3 трлн. долларов! Кислород, всегда присутствующий в воздухе и растворенный в воде, является главным источником коррозии.

Катализаторами коррозии являются углекислый газ  $\text{CO}_2$  и водяной пар  $\text{H}_2\text{O}$ , всегда присутствующие в атмосфере и грунте. В процентном соотношении концентрация углекислого газа может составлять в воздухе от 0,03% (естественный фон) до 0,6...0,7% (в атмосфере городов). Концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе свыше 2,0...2,5% для человека является смертельной.

### **2.2 Гидравлической удар в трубопроводе**

Гидравлической удар представляет собой волновой процесс перемещения жидкости по трубопроводу с высокой скоростью и может привести к его повреждению. Гидроудар связан со свойством несжимаемости жидкости и протекает в закрытых резервуарах.

Причиной возникновения гидроудара является резкое механическое воздействие на жидкость при закрытии задвижки, пуске насоса и т. п. Образуется бегущая волна, распространяющаяся от места появления этой неоднородности. В трубе дли-



ной  $l$ , закрытой с одной стороны задвижкой, возникающее уплотнение давления перемещается со скоростью  $a$ , превосходящей скорость звука в воздухе и многократно превосходящей скорость потока жидкости  $v$ . Закрытый трубопровод играет роль резонансного контура длиной  $l$ . При длине трубы  $l$ , многократно превышающей собственную длину волны  $L$  колебательного процесса ( $L \gg l$ ), давление уплотненного участка постепенно убывает по амплитуде и к определенному моменту времени затухает. Процесс затухания является аperiodическим. Трубопровод обычно содержит большое число поворотов, мест сужения и расширения, арматуры и других неоднородностей. Гидроудар может разрушить эти элементы, а также вызвать разрыв сварных швов и повреждение трубопровода.

### 2.3 Тепловое расширение трубопровода

Тепловое расширение трубы происходит под воздействием температуры, увеличивающейся по мере приближения к пику отопительного сезона. Температура трубопровода может колебаться от  $0^\circ\text{C}$  до  $+150^\circ\text{C}$  (в точке осенне-зимнего максимума). Расширение материала под воздействием температуры характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения  $\alpha'(t)$ ,  $\text{мм}/^\circ\text{C}$ . Величина коэффициента показывает, на сколько миллиметров увеличивается длина трубы при увеличении температуры в  $1^\circ\text{C}$ .

Допустим, что первоначальная длина трубы при температуре  $0^\circ\text{C}$  равна  $L$ , а после подачи в трубу горячего теплоносителя ее длина увеличилась на  $\Delta L$ . Итоговая длина трубы составляет:

$$L(t) = L + \Delta L = L + L\alpha'(t)\Delta t = L(1 + \alpha'(t)\Delta t), \quad (2.1)$$

где  $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$  – максимально возможный перепад температуры на трубопроводе,  $^\circ\text{C}$ .

## 2.4 Механические деформации трубопровода

Изгиб трубопровода вследствие веса воды и собственного веса (при наружной прокладке) и термическое расширение из-за воздействия температуры могут вызвать механические деформации трубопровода. Для труб, проложенных в грунте, влиянием изгиба можно пренебречь. В остальных случаях (например, при надземной или канальной прокладке) обе причины деформации действуют совместно.

Если на трубопроводе отсутствуют компенсирующие устройства либо самокомпенсация, то продольно его оси возникает деформирующее напряжение  $\sigma$ , МПа. Оно всегда должно быть меньше некоторого допустимого значения, т. е. должно выполняться условие:

$$\sigma < [\sigma_{\text{доп}}]. \quad (2.2)$$

### 3 Категории надежности

Понятие надежности систем теплоснабжения, газоснабжения и вентиляции, как и любой технической системы, представляет собой комплекс следующих категорий (критериев) надежности: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

#### 3.1 Безотказность систем ТГВ

Безотказность теплоэнергетической системы заключается в ее свойстве обеспечивать гарантированную работоспособность в течение некоторого времени  $z$ , сохраняя тем самым установленные параметры теплоснабжения: температуру, расход и давление теплоносителя. В электроэнергетической или механической системе обеспечиваемые параметры будут другими, однако сущность понятия безотказности работы остается такой же. Безотказность можно характеризовать такими числовыми характеристиками, как вероятность безотказной работы  $P_{\text{бo}}$  и интенсивность потока отказов  $\lambda$ .

#### 3.2 Долговечность систем ТГВ

Категория долговечности систем теплоснабжения не носит столь ультимативного характера, как, например, в транспортных отраслях. Их долговечность больше является экономической категорией. Долговечность тепловых сетей – это сохранение их работоспособности до наступления некоторого предельного состояния, когда дальнейшая их нормальная (допустимая) эксплуатация становится невозможной.

Плановый срок эксплуатации (долговечность) тепловых сетей в течение 25 лет возможен не во всех участках, т. к. интенсивность использования участков в разных районах населенного пункта может быть различной. Поэтому применяют экономическую оценку критерия долговечности, основанную на известных для конкретного района значениях интенсивности потока отказов и нормативных капиталовложений на сооружение нового теплопровода взамен аварийного.

### 3.3 Ремонтпригодность систем ТГВ

Ремонтпригодность систем ТГВ – это способность к поддержанию и восстановлению их работоспособности путем проведения ремонта с последующим вводом в эксплуатацию как отремонтированных объектов. Ремонтпригодность закладывается на ранней стадии разработки и конструирования изделия, причем не каждая система подлежит ремонту.

Для оценки ремонтпригодности систем теплоснабжения применяется эмпирическая формула профессора Е.Я. Соколова [2], по которой можно определить длительность ремонта двухпроводной сети, проложенной в непроходном бетонном канале, ч:

$$z_p = [6(0,5 + 0,0015L)d^{1,2}], \quad (3.1)$$

где  $L$  – расстояние между секционирующими задвижками, м;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода, м. Численные коэффициенты получены в результате экспериментального наблюдения.

### 3.4 Сохраняемость систем ТГВ

Категория сохраняемости является пассивным элементом надежности системы и определяется ее внутренними свойствами и способностью к хранению. Например, малой сохраняемостью обладают продукты питания, вследствие чего в них добавляют консерванты. Сохраняемость определяется предельным гарантийным сроком хранения системы, после которого она должна быть расконсервирована и введена в эксплуатацию. Если гарантийный срок хранения истек, то система может оказаться неработоспособной. Как правило, системы ТГВ имеют длительный срок сохраняемости.

## 4 Надежность трубопроводов под давлением

### 4.1 Рабочее и испытательное давление в трубопроводе

Согласно [6], установлены следующие нормативы: давление в магистральной сети должно быть 16 атм, а в распределительной сети – не более 9 атм. По мере продвижения от источника к наиболее удаленному потребителю величины давлений уменьшаются. В любой точке сети в подающем (прямом) трубопроводе давление должно быть не менее 6 атм. Довольно высокие значения давлений объясняются необходимостью передачи теплоносителя на большие расстояния при высокой температуре воды в трубе.

Избыточное давление на абонентском вводе в здание гасят с помощью регуляторов давления или дросселирующих шайб. При открытой системе теплоснабжения дополнительно устанавливается обратный клапан, не допускающий реверса циркуляции.

При опрессовке гидравлических устройств и трубопроводов применяют испытательное давление  $p_{\text{исп}}$ , которое выше рабочего давления  $p_{\text{раб}}$  на 25 % :

$$p_{\text{исп}} = 1,25 p_{\text{раб}}. \quad (4.1)$$

Для сосудов, работающих под высоким давлением, и особо опасных изделий испытательное давление применяют выше на 50%. Единицы давления  $p$ , Па, и напора  $H$ , м, связаны между собой простым соотношением:

$$P = \gamma H = \rho g H, \quad (4.2)$$

где  $\gamma$  – объемный вес воды, Н/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность воды при заданной температуре, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

## **4.2 Оценка надежности трубопроводов под давлением**

Гидравлические испытания трубопроводов проводят после завершения ремонта или строительства нового участка, а также после окончания отопительного периода. Испытания необходимы для проверки прочности сварных швов, узлов крепления, арматуры и других изделий, из которых состоит тепловая сеть. Первичные испытания отремонтированного или нового трубопровода называют опрессовкой. Длительность испытаний обычно составляет от 7 до 15 дней.

## **4.3 Расчет прочности трубопроводов**

Оценка прочности трубопровода при анализе теплотехнических и конструкторских проектов сводится к решению двух задач: 1) по заданным значениям диаметра трубопровода и рабочей температуры определяется максимальное давление жидкости; 2) по заданному рабочему давлению жидкости, известному из технологической задачи, определяется тип трубопровода, толщина стенки и материал трубопровода. Внутренний диаметр трубопровода определяется по результатам гидравлического расчета, исходя из скорости жидкости и допустимого падения напора на заданной длине трубопровода.

## **5 Обеспечение заданных параметров теплоснабжения**

Важнейшей задачей теории надежности систем теплоснабжения является своевременная подача тепла в жилые объекты и обеспечение установленных параметров теплоснабжения для всех потребителей. Для потребителя важно соответствие температуры, расхода и напора воды на абонентском вводе необходимым и принятым по договору значениям. Его не интересует величина потерь в системе теплоснабжения. Большие тепловые потери при транспортировке и низкий КПД тепловой сети неизбежно приводят к необходимости отпуска большего количества тепла на источнике и повышенному расходу топлива в котлах, следовательно, возрастут тарифы на тепловую энергию, что всегда негативно воспринимается потребителем.

### **5.1 Тепловой расчет трубопровода**

Тепловой расчет проводится с целью определения общих потерь трубопровода в окружающую среду по всей его длине (в кВт) и температуры в конце трубы (в °С). Также проверяется обеспечение надежности теплоснабжения по достижению требуемых параметров. Например, на абонентском вводе системы отопления должно быть +95 °С, а на вводе в здание трубы горячего водоснабжения должно быть не менее +55 °С. При невыполнении этих условий необходимо разработать соответствующие меры.

В зависимости от способа прокладки трубопровода тепловой расчет проводится по разным формулам, учитывающим термическое сопротивление грунта или воздуха. Термическое сопротивление изоляции самого теплопровода рассчитывается одинаково в обоих случаях. При этом учитывается зависимость теплопроводности теплоизоляционного материала от влажности.

### **5.2 Годовой график тепловой нагрузки**

Годовой график тепловой нагрузки имеет сезонный характер. Мощность источника тепла подбирается по максимальной тепловой нагрузке. Годовой график

тепловой нагрузки на бытовые цели изменяется незначительно и слабо зависит от климатических условий местности, а график на отопительные цели имеет ярко выраженный переменный характер. В теплое время года суммарное потребление тепла резко уменьшается. С целью выравнивания годового графика тепловой нагрузки ТЭЦ в летний период отработавшую теплоту рекомендуется использовать для выработки холода в системах кондиционирования воздуха промышленных и общественных зданий.

Годовой график отображает изменение тепловой нагрузки энергосистемы и течение года. График строится по трем координатным осям: тепловой нагрузки  $Q$ , времени  $z$  и температуры  $t$ . Порядок построения графика зависимости расхода теплоты жилым районом от температуры наружного воздуха  $t_n$  приведен в [9]. Фактическая нагрузка на систему отопления и горячего водоснабжения при надежном теплоснабжении не должна превышать величин, устанавливаемых по графику  $Q=f(t_n)$  при любой погоде. Иначе температура воды в отопительных приборах и в системе горячего водоснабжения будет недостаточной для удовлетворения потребителей.

### **5.3 Суточный график энергоснабжения**

В течение суток из-за цикличности графика работы производственных объектов и неравномерности привычного ритма жизни населения тепловая и электрическая энергия поступает от источников к потребителям неравномерно.

Для оценки неравномерности поступления энергии строятся суточные графики энергоснабжения, например, графики потребления электрической энергии, графики потребления тепловой энергии системы горячего водоснабжения для городского микрорайона [9].

### **5.4 Гидравлический расчет тепловой сети и гидравлическая устойчивость**

Физические параметры тепловой сети, при которых должна быть обеспечена надежность поступления теплоносителя к потребителю, определяются при гидравлическом расчете трубопроводов. Заданными параметрами являются массовый расход



теплоносителя  $G$  и суммарное падение давления  $\Delta p$  на участке  $l$ . Проводят предварительный и поверочный расчеты, как правило, для двухтрубной водяной сети с подающей и обратной магистралями.

Под *гидравлической устойчивостью* понимается способность системы поддерживать заданный гидравлический режим. При отсутствии авторегулирования невозможно добиться высокой устойчивости для разнородных по характеру абонентов. Помехи, вносимые отдельными абонентами, можно существенно уменьшить путем правильного выбора основного гидравлического режима.

Степень гидравлической устойчивости оценивается коэффициентом  $Y$ , показывающим соотношение текущего объемного расхода после разрегулировки системы к максимальному объемному расходу:

$$Y = \frac{V_c''}{V_{\max}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \Delta H_a / \Delta H_c}} \quad (5.1)$$

где  $V_{\max}$  – пропускная способность, максимальный объем прокачиваемой воды, м<sup>3</sup>/ч;  $\Delta H_a$  – располагаемый напор на абонентском вводе, м;  $\Delta H_c$  – потеря напора в сети при расчетном расходе воды, м.

### 5.5 КПД тепловой сети

Наиболее проблемным сектором системы теплоснабжения является тепловая сеть. Вопрос о КПД тепловой сети часто возникает как в задачах расчета эффективности систем энергоснабжения, так и в задачах надежности этих систем. Очевидно, что если значение КПД теплосети равно нулю, то даже при бесконечной мощности источника теплота не дойдет до потребителя. Также и при малой величине КПД теплоснабжение потребителя будет недостаточным: температура в помещениях будет ниже расчетной, а температура горячей воды будет значительно меньше +55°C. Например, при некачественной или поврежденной теплоизоляции весьма сильные тепловые потери на протяженном трубопроводе приведут к остыванию теплоносителя. Таким образом, нарушается надежность всей системы теплоснабжения. КПД

тепловые сети значительно меняются в течение года. Для того чтобы выдержать требуемые параметры теплоснабжения, необходимо поддерживать величину КПД в установленных расчетом пределах [10, 11].

Функция КПД является интегральной оценкой тепловой сети, показывающей долю теплоты, доставленной к потребителю, по сравнению с отпущенной на источнике. Точного метода расчета этой важнейшей характеристики не существует. В [2] приводятся следующие данные:

- |                                       |               |
|---------------------------------------|---------------|
| * тепловые сети от ТЭЦ                | 0,9...0,95;   |
| * тепловые сети от районной котельной | 0,92... 0,96; |
| * тепловые сети от местной котельной  | 0,96... 0,98. |

## 6 Методы повышения надежности систем теплогазоснабжения

Основные мероприятия по повышению надежности систем теплоснабжения закладываются на стадии проектно-конструкторских и изыскательских работ. В первую очередь эти мероприятия касаются тепловых сетей. Технические решения, внедряемые проектировщиком в создание новой системы, определяют ее жизнь на многие десятилетия. А в уже построенной системе повысить надежность очень сложно.

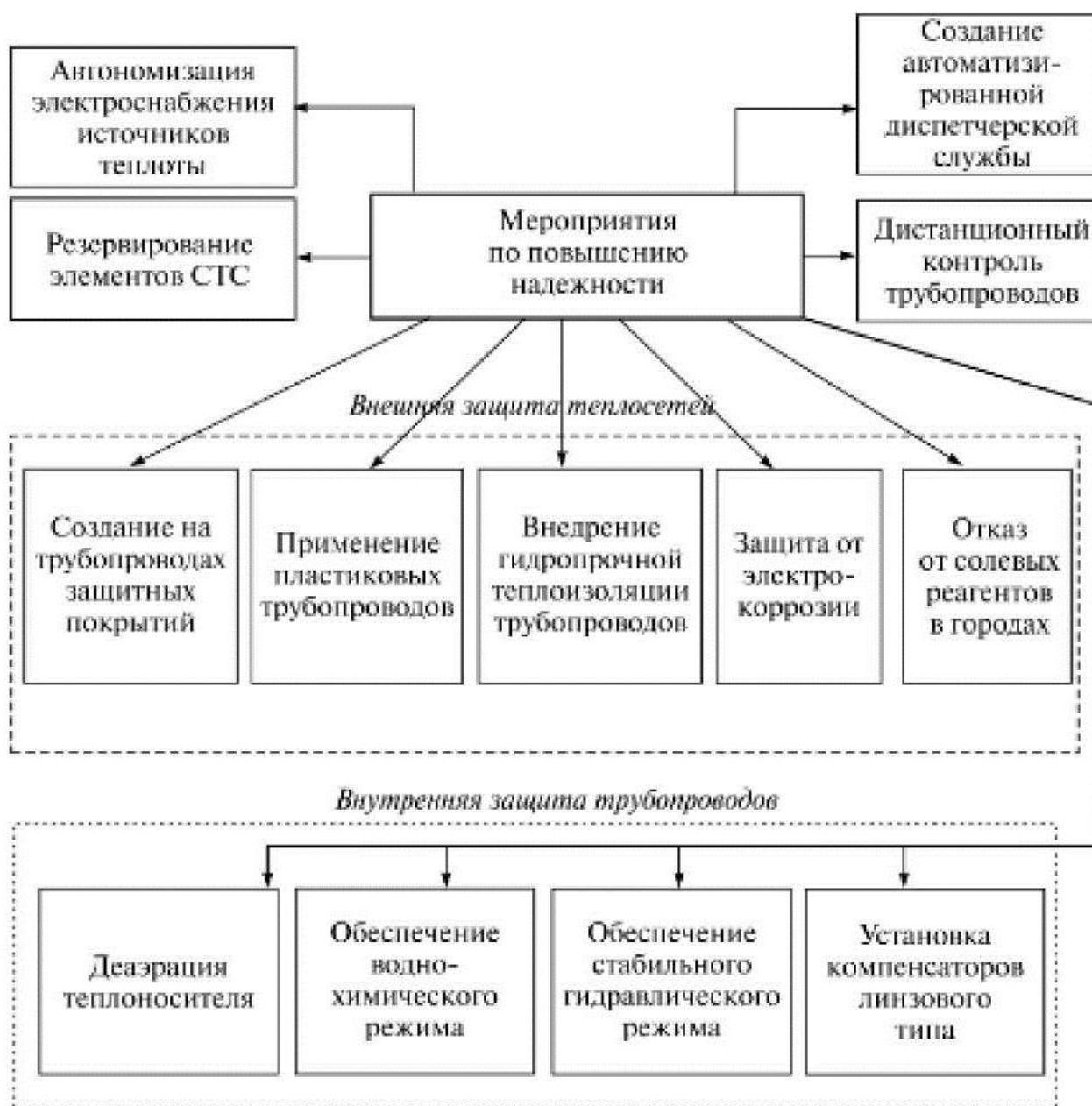


Рисунок 6.1 – Мероприятия по повышению надежности систем теплоснабжения

## 6.1 Резервирование элементов трубопроводов

Общая задача резервирования технического устройства независимо от его характера решается следующим образом. Для  $n$  одинаковых устройств, выполняющих идентичную задачу и включенных в систему параллельно, когда каждое из устройств может автоматически включаться в работу и дублировать  $i$ -тое устройство, вышедшее на строя, вероятность отказа каждого устройства будет примерно одинакова:  $P = P_1 = P_2 = \dots = P_n$ . Тогда вероятность безотказной работы системы с резервированием составит:

$$P_{\text{б.о.}} = 1 - P^n. \quad (6.1)$$

## 6.2 Защита теплосети от внешних воздействий

К внешним воздействиям относятся агрессивные внешние среды, в том числе вода, углекислый газ, кислород и различные соли – антигололедные реагенты, применяемые в крупных городах и проникающие в почву, а также электрокоррозия, вызванная наличием электрических кабелей, рельсового транспорта и электрических подстанций.

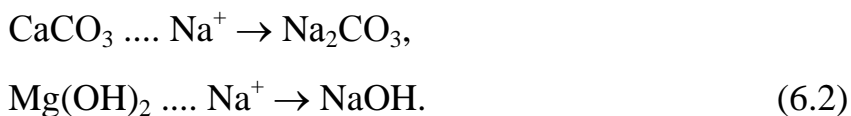
Наиболее перспективным направлением, хотя и не единственным, является защита стальных трубопроводов специальными покрытиями.

## 6.3 Внутренняя защита трубопроводов

Удаление из воды коррозионно-опасных газов ( $O_2$  и  $CO_2$ ) осуществляется с помощью агрегатов, называемых деаэраторами. Деаэраторы различают по величине рабочего давления. Наиболее распространены деаэраторы, функционирующие при атмосферном давлении. Это объясняется тем, что на линии кипения воды при атмосферных условиях проще обеспечить отвод коррозионных газов. Такой деаэратор состоит из бака очищенной от газов воды и колонки.

Значительное место в структуре водогрейной котельной занимают агрегаты химической водоподготовки теплоносителя. К ним относятся, например, аппараты типа «Комплексон» [12]. Для умягчения воды в теплоноситель добавляются специ-

альные присадки. Например, при использовании процесса натрий-катионирования химические реакции солей жесткости воды кальция  $\text{CaCO}_3$  и магния  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  протекают и в виде:



Удаленность потребителей от источников тепла в больших городах и пересеченный профиль местности приводят к необходимости сооружения насосных и дроссельных подстанций. Оси подающего и обратного трубопроводов близки к геодезическим отметкам от земной поверхности или совпадают с ними. Следовательно, гидравлический режим теплотрассы должен быть рассчитывается так, чтобы на всех участках обеспечивалась устойчивость системы и не допускалось случайное «опрокидывание циркуляции».

#### **6.4 Методы компенсации внутренних напряжений трубопроводов**

При изменениях температуры и прогибе трубопровода под действием собственного веса и веса жидкости в нем происходит удлинение трубы на величину  $\Delta L$ . Удлинение трубы при нагреве теплоносителя и укорочение при его охлаждении приводят к тому, что трубопровод постоянно испытывает переменные механические напряжения, которые могут привести к разрыву сварного шва. Для предотвращения этого применяют методы компенсации напряжений.

Применяются метод самокомпенсации и метод оборудования трубопровода специальными устройствами – компенсаторами. Компенсаторы бывают линзовыми и сальниковыми. В настоящее время линзовые компенсаторы постепенно вытесняют сальниковые, хотя удельное компенсированное напряжение в них значительно меньше и они стоят дороже.

## **6.5 Сооружение автономных источников электроэнергии на котельных**

Источники теплоты, как правило, сами не производят электроэнергию, а только перераспределяют полученную электроэнергию от внешней электросети, принадлежащей чаще всего другим собственникам. В связи с распадом единого комплекса энергетики СССР данная проблема особенно остро встала в последнее время. Авария на сети, несвоевременная оплата за потребленную электроэнергию, передача сети другому собственнику, перегрузка сети, теракт, стихийное бедствие, военные действия и т. п. могут привести к отключению водогрейной котельной от внешней электросети.

Базовым вариантом сетевого источника электроэнергии является питание от межрегиональной распределительной сетевой компании (МРСК). Обеспечение электроснабжения котельной возможно и за счет автономных источников [13]. Наиболее распространены дизель-генераторные (ДЭС) и газотурбинные (ГТУ) энергоустановки.

Проблема местного электроснабжения может быть решена за счет автономной электрогенерирующей установки, работающей на теплоте сетевой воды, которая всегда есть на котельной. При этом водогрейный котел можно обеспечивать местным дешевым топливом или использовать древесные отходы, МДФ, органические отходы и т. п.). В конструкцию низкопотенциальной электрогенерирующей установки может быть включен теплообменник, сообщающийся с окружающей средой по типу «рабочее тело – воздух» и теплообменником, сообщающимся с обратной сетевой водой по типу «рабочее тело – вода».

## **6.6 Повышение надежности систем газоснабжения**

В процессе эксплуатации даже при отсутствии ограничений со стороны магистральных газопроводов и полной исправности всех элементов системы потребители могут не получать природный газ в необходимом количестве. Причиной этого может являться подключение к газотранспортной сети объектов, не учтенных проектом. Суммарная потребность в газе превышает пропускную способность системы.

Снижение надёжности системы газораспределения в данном случае можно определить по формуле:

$$N = \frac{Q_T - (Q_T - Q)}{Q_T} = \frac{Q}{Q_T}, \quad (6.3)$$

где  $Q_T$  – требуемое суммарное газопотребление в момент исследования системы;  $Q$  – суммарное газопотребление, которое может обеспечить система (расчётное, учтенное проектом газопотребление).

Несоответствие системы новым условиям эксплуатации при отсутствии отказов всех её элементов является формой проявления морального старения системы. Результатом морального старения является неспособность её обеспечить необходимую производительность. Причиной является повышение потребности всех подключенных к ней объектов, снижение точности пределов регулирования и надёжности, возрастание энергоёмкости и т.д. Для устранения этого случая необходима реконструкция системы.

Неудовлетворительные режимы давления сохраняются особенно в сетях низкого давления, где непроизводительные потери газа составляют более 0,7% общего расхода газа. Следовательно, реконструкцию системы газоснабжения необходимо проводить за счёт мероприятий с целью повышения пропускной способности системы, чтобы при этом выполнялось условие:

$$\Delta Z \rightarrow \min \text{ или } \Delta K \rightarrow \min, \quad (6.4)$$

где  $\Delta Z$  и  $\Delta K$  – дополнительные приведённые затраты и дополнительные капитальные вложения, необходимые для обеспечения требуемой производительности системы, соответственно.

Для увеличения срока эксплуатации системы газоснабжения без реконструкции необходимо принять превентивные меры при проектировании. Они предусматривают рассмотрение исходной информации о развитии системы газоснабжения как статистически неопределённую и предлагают при выборе основных параметров системы исходить из их

вероятностных значений. Для реализации методики необходимо располагать необходимым количеством статистических наблюдений на основе опыта эксплуатации систем газоснабжения в других городах, статистикой отклонения фактических параметров от принятых в проекте. Необходимо учитывать специфику городов и их развития, а также возникновение неучтенных при проектировании потребителей газа. Данные за рассматриваемый период не всегда могут в полной мере экстраполироваться на будущее, поэтому вероятностные характеристики таких величин очень часто содержат некоторую погрешность. Однако они помогают в большей мере выявить общую тенденцию будущих условий развития системы. Таким образом, задача сводится к тому, на что ориентироваться при проектировании – на данные перспективных схем газоснабжения, разработанные на основании их генеральных планов, или на ожидаемые отклонения от этих схем. Решение задачи заключается в выборе варианта одно, двух или многостадийного сооружения системы и определения, какой из этих вариантов является наименее капиталоемким.



## **7 Надежность местной вытяжной вентиляции**

Система механической местной вытяжной вентиляции относится к сложным техническим системам. Практически в нее входят все элементы, характерные для остальных типов вентиляционных систем, но в то же время в ней есть элементы, выполняющие самостоятельные важные функции. Система местной вентиляции улавливает, очищает и рассеивает загрязняющие вещества. Эффективность вентиляционной системы влияет на на здоровье людей, находящихся в помещении, поэтому ее безотказная работа гарантирует создание микроклимата.

Каждый из элементов системы механической местной вытяжной вентиляции может быть реализован разными способами и различными видами соответствующих технических устройств.

Для оценки качества работы местной вытяжной вентиляции применяют технические, экономические и функциональные параметры и соответствующие им критерии. В инженерной практике используют следующий перечень показателей качества:

- технические параметры, к которым относятся потери давления, производительность и эффективность работы;
- экономические параметры, учитывающие как экономические показатели, так и общий уровень энергопотребления;
- функциональные параметры, включающие электро-, взрыво-, и пожаробезопасность и надежность работы системы, ее устойчивость к различным видам вредного воздействия.

Надёжность системы местной вытяжной вентиляции, как и любой сложной технической системы, заключающаяся в ее безотказной, долговечной, ремонтнопригодной и сохраняемой работе, является главным функциональным параметром оценки качества. После начала эксплуатации местной вытяжной вентиляции только критерии надежности позволяют оценить работу системы в любой момент времени.

Каждый элемент системы в случае потери работоспособности в данный момент времени может быть восстанавливаемым или невосстанавливаемым в

зависимости от особенностей или этапов эксплуатации. Для безотказной и долговечной эксплуатации местных вентиляционных систем имеет важное значение выбор соответствующих показателей надёжности.

При появлении отказа любого элемента вентиляционная система перестаёт выполнять своё основное функциональное назначение, переставая обеспечивать оптимальные параметры микроклимата в помещении для достижения санитарно-гигиенических требований качества воздуха рабочих зон и приземного слоя атмосферы.

Характер изменения параметров системы вентиляции наиболее полно отображает картину отказов вентиляционной системы с точки зрения временного масштаба возникновения этих отказов и поэтому его можно считать важнейшим классификационным признаком. Характер изменения параметров позволяет выявить факторы, приводящие к отказам, а также оценить масштаб возможного отказа.

В системах механической местной вытяжной вентиляции наиболее характерны отказы постепенного типа, вызванные износом или старением. Несмотря на то, что безаварийная работа элементов местной вытяжной вентиляции в основном гарантируется их прочностными характеристиками, тем не менее, постепенное изменение этих характеристик, следовательно, уровней вибрации, абразивного и коррозионного износа и т.п., часто оказывает главное отрицательное влияние на работу элементов механической вытяжной вентиляции и требует проведение планово-предупредительных мероприятий, ремонтов или полной замены отдельных элементов и узлов. Ввиду того, что надёжность эксплуатации вентиляционных систем обусловлена в основном накапливающимися отказами, то ведущую роль в продлении срока эксплуатации элементов играет диагностика их технического состояния.

Критерии надёжности являются статистическими величинами и определяются по математической статистике и теории вероятности, поскольку процесс появления отказов в системах вентиляции по своей физической природе носит случайный характер.

Учитывая специфику функционирования вентиляционных систем, к основным критериям безотказности этих систем можно отнести вероятность безотказной рабо-

ты, частоту возникновения отказов, интенсивность возникновения отказов, среднее время работы между отказами (наработку на отказ) и среднее время безотказной работы.

Наработка на отказ может являться критерием оценки надежности только восстанавливаемых систем. Остальные четыре критерия используются преимущественно для оценки надежности невосстанавливаемых систем и их элементов, хотя могут применяться и для восстанавливаемых систем (до появления первого отказа).

Вероятность безотказной работы вентиляционной установки, состоящей из деталей в количестве  $N_0$  в случае, когда в процессе эксплуатации к моменту времени  $t$  оказались исправными только  $N_n(t)$  деталей, вычисляется по формуле (1.12), статистическая вероятность отказа вычисляется по формуле (1.13).

Частота отказов деталей установки, т. е. число отказов в единицу времени  $dt$  определяется по формуле (1.14).

Формулы (1.12)-(1.14) являются основными уравнениями теории надежности и основаны на статистических методах определения исходных величин, принятых для расчета. Однако при проектировании, а иногда и при эксплуатации вентиляционных систем, статистические методы не всегда приемлемы по причине отсутствия каких либо статистических данных.

В этих случаях для определения количественных характеристик надежности работы систем вентиляции необходимо анализировать и систематизировать математические методы определения основных параметров безотказности элементов системы, провести анализ и систематизацию всего комплекса данных, связанных с организацией безотказной работы вентиляционных систем на производстве, физических процессов и факторов, обуславливающих возникновение отказа систем вентиляции, разработать инженерную методику прогноза и повышения надежности работы систем механической местной вытяжной вентиляции, разработать программный комплекс по прогнозу и повышению надежности работы систем местной вытяжной вентиляции, апробировать инженерную методику надежности в произ-

водственных условиях и разработать систему рекомендаций по повышению надежности вентиляционных систем.

Такая инженерная методика расчета надежности может предполагать как точный расчет (при наличии статистических данных), так и приближенный расчет по известным математическим зависимостям. В любом случае расчет включает сбор исходных данных, определение основных критериев надежности и основных величин вероятности безотказной работы по нормальному или экспоненциальному закону распределения.

Повышение величины надежности вентиляционных систем может быть достигнуто за счет резервирования наиболее слабых элементов систем. Вероятность безотказной работы системы с резервированием увеличится и может быть определена по формуле (6.1).

## **8 Надежность систем кондиционирования воздуха**

Надежность систем кондиционирования воздуха состоит в свойстве сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Отказы как правило происходят в период пиковых нагрузок при максимальной температуре наружного воздуха, когда физиологическая и психологическая нагрузки на пользователей системы кондиционирования в период ремонта многократно увеличиваются.

Надежность систем кондиционирования напрямую зависит от степени обеспеченности (или необеспеченности) параметров внутреннего микроклимата кондиционируемых помещений, которая нормируется и зависит от класса системы кондиционирования воздуха (СКВ).

Общая вероятность безотказной работы СКВ определяется путем простого перемножения четырех вероятностей: вероятности учета параметров наружного воздуха, вероятности учета параметров внутреннего воздуха, вероятности безотказной работы сетей электроснабжения и вероятности безотказной работы самой конструкции системы кондиционирования.

Таким образом, общая вероятность безотказной работы СКВ зависит от многих факторов, в том числе и от надежности конструкции систем кондиционирования воздуха, и для расчета требуемой величины надежности конструкции систем кондиционирования необходимо определить значения многих переменных.

Общая вероятность безотказной работы системы кондиционирования является достаточно условной величиной. Например, для достаточно комфортных мультизональных систем кондиционирования, используемых в течение одной смены и относящихся ко второму классу кондиционирования, общая вероятность безотказной работы составляет 0,92. Это практически означает, что данная система комфортного кондиционирования может не работать по каким либо причинам 22

рабочих дня в течение одного года, и это допустимо по нормативным требованиям [15].

Вероятность учета параметров наружного воздуха для систем кондиционирования зависит от класса СКВ и периода года.

Например, для тех же комфортных систем кондиционирования с переменным расходом хладагента вероятность учета параметров наружного воздуха равна 0,97.

Вероятность учета параметров внутреннего воздуха для систем кондиционирования относится к ненормируемым параметрам и зависит от назначения системы кондиционирования. Технологические системы кондиционирования и системы кондиционирования больших помещений (спортивные залы, кинотеатры и т.д.), как правило, требуют детерминированного подхода к выбору расчетных параметров внутреннего воздуха. В отличие от технологических СКВ, параметры внутреннего воздуха многозональных систем кондиционирования в большей степени зависят от субъективных характеристик потребителей, поэтому к ним применим вероятностный подход [16]. В данном случае, для систем кондиционирования с переменным расходом хладагента, вероятность учета параметров внутреннего воздуха можно принять равной 0,98.

Вероятность безотказной работы сетей электроснабжения достаточно высока. По надежности системы электроснабжения подразделяются на три категории.

Системы технологического кондиционирования помещений серверных, источников бесперебойного питания, автоматических телефонных станций и т.д. относятся к электроприемникам первой категории. Системы комфортного кондиционирования принадлежат ко второй и третьей категории электроснабжения с вероятностью безотказной работы 0,9999–0,9973.

Минимальная величина вероятности безотказной работы (надежности) конструкции систем кондиционирования с переменным расходом хладагента, если принять величины вероятности учета параметров наружного воздуха – 0,97, вероятности учета параметров внутреннего воздуха – 0,98 и вероятности безотказной работы сетей электроснабжения – 0,9973, будет составлять 0,97.

В свою очередь, надежность конструкции системы кондиционирования зависит от надежности входящих в нее элементов: компрессоров, вентиляторов, клапанов, теплообменников, соединительных трубопроводов и систем электронного управления.

Наибольшую нагрузку в любом оборудовании испытывают движущиеся элементы, поэтому на надежность конструкции кондиционера в первую очередь влияют надежности компрессоров, вентиляторов и клапанов. Без сомнения, «сердцем» кондиционера является компрессор, потребляющий более 95% электроэнергии всего кондиционера и несущий на себе такую же часть нагрузки. От качества и надежности данного элемента в первую очередь зависит качество кондиционера. Кроме того, стоимость замены вышедшего из строя компрессора занимает до 50% от стоимости всего кондиционера.

Для производителей систем кондиционирования с переменным расходом хладагента характерен различный подход к компоновке компрессорного узла наружных блоков. Существуют одно-, двух- и трехкомпрессорная схемы компоновки наружного блока стандартной производительности 28 кВт.

Однокомпрессорная схема компоновки наружного блока мощностью 28 кВт применяется в кондиционерах MITSUBISHI ELECTRIC серии CITY MULTI.

Регулирование производительности наружного блока в зависимости от нагрузки производится путем изменения частоты вращения одного инверторного компрессора. При поломке компрессора система теряет 100% своей производительности.

Двухкомпрессорная схема компоновки наружного блока мощностью 28 кВт применяется в кондиционерах DAIKIN (VRV-K), MITSUBISHI HEAVY Industries (KX), HITACHI (SET FREE). Причем применяется один инверторный компрессор с переменной производительностью, а другой – с постоянной производительностью. В данном случае регулирование производительности наружного блока в зависимости от нагрузки внутренних блоков производится следующим образом.

Как правило, мощность инверторного компрессора составляет 50% от всей мощности наружного блока. Поэтому при нагрузке до 50% работает один инвертор-

ный компрессор. Когда нагрузка увеличивается, например, до 60% и мощности инверторного компрессора не хватает, включается компрессор постоянной производительности и частично инверторный (50% + 10%). При необходимости работы наружного блока на производительность 100% включаются на полную мощность оба компрессора (50% + 50%). Поломка инверторного компрессора ведет к потере 100% производительности. При поломке компрессора постоянной производительности система продолжает работать на одном инверторном компрессоре.

Трехкомпрессорная схема компоновки наружного блока мощностью 28 кВт применяется в кондиционерах FUJITSU GENERAL (VRF). В отличие от предыдущих схем, в которых всегда присутствовал один компрессор с переменной производительностью, в данной схеме все три компрессора используются с постоянной производительностью. Регулирование мощности наружного блока в зависимости от нагрузки внутренних производится следующим образом.

За счет комбинирования трех компрессоров различной мощности № 1, 2, 3 достигается шестиступенчатая регулировка производительности. Причем 100% нагрузки наружного блока соответствует работе двух больших компрессоров 2 и 3. Компрессор 1 при выходе системы на мощность 28 кВт является резервным. Сглаживание ступеней регулирования достигается за счет технологии аккумуляции мощности наружного блока и за счет инерционности системы кондиционирования. При поломке любого компрессора система продолжает работать на оставшихся двух. При поломке любых двух компрессоров система продолжает работать на оставшемся одном.

Надежность одно- двух- и трехкомпрессорной схемы систем кондиционирования оценить на первый взгляд достаточно сложно. К тому же, большое влияние на оценку оказывают критерии надежности, которые могут быть выбраны. Поэтому сейчас рассмотрим надежность работы систем при трех критериях надежности – условие обеспечения 100%, 75% и 50% мощности наружного блока. Для наглядности примем одинаковое значение надежности каждого компрессора, равное 0,99.

Критерий 1. Обеспечение 100% мощности наружного блока.

Однокомпрессорная схема (100%).



Так как рассматривается один элемент в системе, то надежность компрессорной системы равна надежности этого элемента, т.е. 0,99.

Двухкомпрессорная схема (50% + 50%).

Выход системы из строя будет наблюдаться при поломке любого из двух компрессоров. Надежность системы будет равна  $0,99^2 = 0,9801$ .

Трехкомпрессорная схема (57% + 43% + 18%).

Так как третий компрессор является резервным, то выход системы из строя будет наблюдаться при поломке компрессора № 1 или № 2. Надежность системы также будет равна  $0,99^2 = 0,9801$ .

Критерий 2. Обеспечение 75% мощности наружного блока.

Однокомпрессорная схема (100%).

Поломка одного компрессора. Надежность системы равна 0,99.

Двухкомпрессорная схема (50% + 50%).

Выход системы из строя будет наблюдаться при поломке любого из двух компрессоров. Надежность системы будет равна  $0,99^2 = 0,9801$ .

Трехкомпрессорная схема (57% + 43% + 18%).

Нормальная работа системы будет наблюдаться при работе всех трех компрессоров, при выходе из строя компрессора № 2 и при выходе из строя компрессора № 3. Надежность системы также будет равна  $0,99^2 = 0,9801$ .

Критерий 3. Обеспечение 50% мощности наружного блока.

Однокомпрессорная схема (100%).

Поломка одного компрессора. Надежность системы равна 0,99.

Двухкомпрессорная схема (50% + 50%).

При поломке инверторного компрессора надежность системы будет равна 0,99.

Трехкомпрессорная схема (57% + 43% + 18%).

Нормальная работа системы будет наблюдаться при работе всех трех компрессоров, при выходе из строя компрессора № 2, при выходе из строя компрессора № 3, при выходе из строя компрессора № 1, при одновременном выходе из строя компрессоров № 2 и № 3. Надежность системы равна 0,999801.

Чтобы трехкомпрессорная система потеряла работоспособность на участке нагрузки от 0% до 61%, необходим одновременный выход из строя двух компрессоров. Вероятность такого события практически равна нулю, поэтому надежность трехкомпрессорных систем при неполной нагрузке очень велика. Данное свойство практически означает, например, что даже при поломке одного самого большого компрессора можно обеспечить 61% нагрузки на систем кондиционирования с переменным расходом хладагента в виде наиболее значимых помещений: кабинеты руководства, залы совещаний и т.д.

На участке от 61% до 75% нагрузки надежность трехкомпрессорных систем равна надежности однокомпрессорных систем.

На участке от 75% до 100% нагрузки лидирующее положение по надежности занимают однокомпрессорные системы.

## **9 Проектирование систем вентиляции и кондиционирования с учетом требований надежности и безопасности**

Для расчета теплового и влажностного баланса, когда осуществляется проектирование систем вентиляции помещения необходимо учитывать все причины, которые влияют на нарушения воздушного климата в помещении. Для разработки теплового баланса, как правило, используют стандартные, общеизвестные методы, которые используют в отопительной и вентиляционной практике. При составлении баланса, а также когда осуществляется проектирование вентиляции здания или помещения, в первую очередь, важно определить основные места поступления и потери тепла. Для различного рода помещений выделяют два основных вида тепловых нагрузок:

- которые возникают вне помещения (наружные);
- которые возникают внутри помещения (внутренние).

Основная характеристика наружных тепловых нагрузок связана с разностью температур снаружи и внутри помещения и от того, присутствуют ли теплопоступления или теплопотери. Летом тепло поступает через стены, окна, двери, щели, таким образом образуется теплопоступление, а зимой наоборот, т.е направление потока тепла происходит из самого помещения на улицу, происходят теплопотери. Это необходимо учитывать при проектировании вентиляции.

Солнечное излучение проходит через застекленные пространства, создавая теплопоступление. Эта нагрузка является ощутимым теплом – от солнечного света происходит только положительная нагрузка, как летом, так и зимой. Компенсироваться эта нагрузка должна летом, а во время зимы она неощутима, потому что интегрируется с теплом, вырабатываемым системой кондиционирования.

Воздух, поступающий снаружи через вентиляционную систему и воздух, который попадает внутрь помещения (за счет инфильтрации), имеют много разных свойств, как правило, контрастирующих с метеорологическими потребностями зданий. Летом воздух горячий и увлажненный (иногда наоборот сухой) и оказывает существенное влияние на работу установки, цель у которой охладить и осушить воздух до максимально приятной температуры в помещении; зимой наружный воз-

дух, как правило, холодный и сухой (или влажный), поэтому он нуждается в обогреве и увлажнении. Об этом также необходимо помнить при проектировании систем вентиляции. И только осенью и весной можно использовать наружный воздух как бесплатный подогрев или охлаждение помещений. Различают два вида наружных тепловых нагрузок: положительные и отрицательные нагрузки. Вид тепловых нагрузок зависит от времени года и суток. Внутренние тепловые нагрузки в жилых помещениях, офисах, в общественных зданиях, кафе, ресторанах состоят, как правило, из:

- тепла, исходящего от людей (чем больше массовость, тем больше тепла);
- тепла, получаемого от ламп, осветительной техники, газовых и электроплит, телевизоров, холодильников и других электробытовых приборов (это применительно к жилым зданиям и помещениям);
- тепла, исходящего от офисного оборудования: принтеров, компьютеров, ксероксов, и другой рабочей техники.

У производственных зданий и помещений внутренние тепловые нагрузки также могут происходить от:

- технологического оборудования, которое в процессе работы нагревается;
- горячих материалов, используемых в работе;
- химических веществ и различных продуктов сгорания.

В связи с этим очень важно рассмотреть объект со всех сторон, дать его оценку, на основе требований предъявляемых к нему. Основной перечень требований к проекту:

Требования санитарии:

- поддержание определенной влажности и температуры. От необходимости поддержания влажности зависит размер стоимости данного проекта;
- каким путем будет осуществляться подача в здание чистого и свежего воздуха (существует два варианта: механическим или естественным путем, а также для этого используют рециркуляционные системы.

- удаление воздуха и устройства для его вывода (в производственных помещениях удаление осуществляется через отсосы или общеобменную вытяжку, в жилых помещениях используют естественную вытяжку).

Архитектурно-строительные требования:

- условия для установки на фасаде здания наружной коробки кондиционера, а внутренней – непосредственно в здании, с использованием шкафных кондиционеров или установка сплит-системы, которая должна располагаться в подшивном потолке и осуществляет подачу чистого воздуха;

- условия для монтажа центральной системы кондиционирования на техническом этаже или кондиционера Roof-Top (этот вид кондиционера устанавливается на крыше здания);

- условия для прокладки трубопроводов и воздуховодов, в частности это касается реконструируемых помещений или зданий.

Противопожарные требования. Зданию или помещению присуждается категория: "А" и "Б" - взрывопожароопасные, "В" - пожароопасные, "Д" - нормальные условия. В соответствии с этими категориями разрабатывают проектные решения.

Эксплуатационные требования зависят от того, есть ли возможность эксплуатации и управления системой кондиционирования с централизованного пульта управления или существует потребность регулирования параметров автономно. Такая потребность может возникнуть из-за того, что разные части здания выходят на разные стороны, например, одна на юг, другая на север. Также нужно организовать отдельные режимы работы систем на различные виды помещений.

Надежность системы – один из главных критериев установки систем вентиляции и кондиционирования, особенно в прецизионном кондиционировании, где необходима очень точная поддержка микроклиматических параметров системы.

Экономические требования. В данном случае важно определить бюджет проекта. Это зависит от того, какая репутация у производителя и от качества и класса оборудования, которое будет устанавливаться. В связи с этим, разрабатывают различные варианты проектов, в которых приводят характеристику различному

оборудованию, а затем делают сравнительный анализ и выбирают наиболее приемлемый вариант.

Рассмотрим основные принципы выбора систем кондиционирования воздуха и вентиляции.

Проблема выбора системы вентиляции или кондиционирования, как правило, решается после составления технико-экономического сравнительного анализа подобранных вариантов, их количество может быть различным от двух, трех и больше.

В связи с этим очень важно рассмотреть объект со всех сторон, дать его оценку, на основе требований предъявляемых к нему. Основной перечень требований к проекту:

Требования санитарии:

- поддержание определенной влажности и температуры – от необходимости поддержания влажности зависит размер стоимости данного проекта;

- каким путем будет осуществляться подача в здание чистого и свежего воздуха – механическим или естественным, или используются рециркуляционные системы.

- удаление воздуха и устройства для его вывода – в производственных помещениях удаление осуществляется через отсосы или общеобменную вытяжку, в жилых помещениях используют естественную вытяжку.

Архитектурно-строительные требования:

- условия для установки на фасаде здания наружной коробки кондиционера, а внутренней – непосредственно в здании, с использованием шкафных кондиционеров или установка сплит-системы, которая должна располагаться в подшивном потолке и осуществляет подачу чистого воздуха;

- условия для монтирования центральной системы кондиционирования на техническом этаже или кондиционера Roof-Top (этот вид кондиционера устанавливается на крыше здания);

- условия для прокладывания трубопроводов и воздуховодов, в частности это касается реконструируемых помещений или зданий.

Противопожарные требования. Зданию или помещению присуждается категория: "А" и "Б" - взрывопожароопасные, "В" - пожароопасные, "Д" - нормальные условия. В соответствии с этими категориями разрабатывают проектные решения.

Эксплуатационные требования зависят от того, есть ли возможность эксплуатации и управления системой кондиционирования с централизованного пульта управления или существует потребность регулирования параметров автономно. Такая потребность может возникнуть из-за того, что разные части здания выходят на разные стороны, например, одна на юг, другая на север. Также нужно организовать отдельные режимы работы систем на различные виды помещений.

Надежность системы – один из главных критериев установки систем вентиляции и кондиционирования, особенно в прецизионном кондиционировании, где необходима очень точная поддержка микроклиматических параметров системы.

Экономические требования. В данном случае важно определить бюджет проекта. Это зависит от того, какая репутация у производителя и от качества и класса оборудования, которое будет устанавливаться. В связи с этим, разрабатывают различные варианты проектов, в которых приводят характеристику различному оборудованию, а затем делают сравнительный анализ и выбирают наиболее приемлемый вариант.

Таким образом, после повторного и более углубленного рассмотрения всех требований, составляются этапы проектных работ.

Проектные работы систем вентиляции и кондиционирования проходят в два этапа. На первом этапе проводят технико-экономическое обоснование (ТЭО) проекта. В первую очередь, по укрупненным показателям осуществляют выбор и технико-экономическое обоснование вида нужной системы, замеряют необходимую площадь и пространство для дальнейшей установки и монтажа оборудования, также делают расчет характеристик этого пространства: наличие центральных или автономных систем, их тип и количество, расположение, количество расхода тепло и хладоносителей, вид и численность холодильного оборудования, насосов, размер и вес системы, определение мощности электроприборов. На этом этапе уже рассчитывают предварительную стоимость проекта. Разрабатывают и определяют

первоначальную схему системы вентиляции и кондиционирования. Раньше в практике проектирования после этапа технико-экономического обоснования разрабатывали технический проект. Но в связи с появлением блочного оборудования эти две стадии объединили. Проектные предприятия называют эту стадию технико-экономическим обоснованием, а коммерческие фирмы – техническим проектом.

Заказчик вносит свои коррективы и утверждает ТЭО, после этого начинается более важный и ответственный этап проектирования вентиляции, который еще называют рабочим проектом.

Второй этап начинается с изучения сделанных ранее строительных планировок, тепловых и технических характеристик строительного оборудования и технологического задания, разработанного очень подробно и со спецификацией. В первую очередь необходимо сделать расчет тепловлаговывделений, а затем на его основании расчет воздухообмена для всех помещений по отдельности. Подбирают необходимое оборудование, предварительно определив все его достоинства и недостатки, и выбирают удовлетворяющее требованиям проекта. Оборудование должно обеспечивать воздухообмен и потери напора в сети. Окончательно определяют вид и подходящую схему системы, определяют ее параметры и характеристики.

После этого проектирование систем вентиляции завершается.

Окончательные чертежи необходимо передать монтажной организации на рабочий объект. После завершения работы монтажников, составляют исполнительные чертежи и исполнительную сертификацию.



## **10 Требования к пожарной безопасности систем вентиляции и кондиционирования**

Пожаротехнические характеристики конструкций и оборудования систем общеобменной вентиляции, местных отсосов, воздушного отопления и кондиционирования (далее – систем вентиляции) в зданиях различного назначения, необходимые для обеспечения комплексной безопасности (техногенной, экологической, санитарногигиенической и пожарной безопасности), должны соответствовать установленным требованиям в соответствии с [17, 18].

Системы вентиляции следует предусматривать отдельными для групп помещений, размещенных в разных пожарных отсеках.

Общие системы вентиляции для групп помещений, размещенных в пределах одного пожарного отсека, следует предусматривать с учетом класса функциональной пожарной опасности помещений жилых, общественных и административно-бытовых зданий, а также категорий по взрывопожарной и пожарной опасности производственных и складских помещений в соответствии с [18].

Помещения одной категории по взрывопожарной опасности, не разделенные противопожарными преградами, а также имеющие открытые проемы общей площадью более  $1 \text{ м}^2$  в другие помещения, допускается рассматривать как одно помещение.

Общие приемные устройства наружного воздуха для систем вентиляции следует предусматривать согласно [18].

В пределах одного пожарного отсека общие приемные устройства наружного воздуха не следует предусматривать для систем приточной противодымной вентиляции и для систем приточной общеобменной вентиляции.

Допускается предусматривать общие приемные устройства наружного воздуха для систем приточной противодымной вентиляции и для систем приточной общеобменной вентиляции (кроме систем, обслуживающих помещения категорий А, Б и В1 и склады категорий А, Б, В1 и В2, а также помещения с оборудованием систем местных отсосов взрывоопасных смесей и систем общеобменной вытяжной вентиляции для помещений категорий В1В4, Г и Д, удаляющих воздух из 5-метровой зоны

вокруг оборудования, содержащего горючие вещества, которые могут образовать в этой зоне взрывопожарные смеси) при условии установки противопожарных нормально открытых клапанов на воздуховодах приточных систем общеобменной вентиляции в местах пересечения ими ограждений помещения для вентиляционного оборудования.

Общие приемные устройства наружного воздуха не следует предусматривать для систем приточной противодымной вентиляции разных пожарных отсеков. Расстояние по горизонтали и по вертикали между приемными устройствами, расположенными в смежных пожарных отсеках, должно быть не менее 3 м.

Общие приемные устройства наружного воздуха допускается предусматривать для систем приточной противодымной вентиляции разных пожарных отсеков при установке противопожарных клапанов:

а) нормально закрытых – на воздуховодах систем приточной противодымной вентиляции в местах пересечения ограждающих строительных конструкций помещения для вентиляционного оборудования, если установки этих систем размещаются в общем помещении для вентиляционного оборудования;

б) нормально закрытых – на воздуховодах систем приточной противодымной вентиляции перед клапанами наружного воздуха всех таких систем, если установки этих систем размещаются в разных помещениях для вентиляционного оборудования; в указанных установках противопожарные клапаны допускается устанавливать взамен клапанов наружного воздуха.

Помещения для вентиляционного оборудования вытяжных систем общеобменной вентиляции и местных отсосов по взрывопожарной и пожарной опасности следует относить:

а) к категории помещений, которые они обслуживают, если в них размещается оборудование систем общеобменной вентиляции производственных зданий;

б) к категории Д, если в них размещаются вентиляторы, воздуходувки и компрессоры, подающие наружный воздух в эжекторы, расположенные вне этих помещений;

в) к категории помещений, из которых забирается воздух вентиляторами, воздуходувками и компрессорами для подачи в эжекторы;

г) к категории А или Б, если в них размещается оборудование систем местных отсосов, удаляющих взрывоопасные смеси от технологического оборудования.

Помещения для оборудования систем местных отсосов взрывоопасных пылевоздушных смесей с пылеуловителями мокрой очистки, размещенными перед вентиляторами, допускается при обосновании относить к помещениям категории Д;

д) к категории Д, если в них размещается оборудование вытяжных систем общеобменной вентиляции жилых, общественных и административнобытовых помещений.

Помещения для оборудования вытяжных систем, обслуживающих несколько помещений различных категорий по взрывопожарной и пожарной опасности, следует относить к более опасной категории.

Помещения для вентиляционного оборудования приточных систем вентиляции по взрывопожарной и пожарной опасности следует относить:

а) к категории В1, если в них размещены установки (фильтры и др.) с маслом вместимостью 75 л и более в одной из установок;

б) к категориям В1, В2, В3, В4 или Г, если система работает с рециркуляцией воздуха из помещений соответственно категорий В1, В2, В3, В4 или Г, кроме случаев забора воздуха из помещений, где не выделяются горючие газы и пыль или для очистки воздуха от пыли применяются пенные или мокрые пылеуловители;

в) к категориям В1, В2, В3, В4, если в помещении для вентиляционного оборудования размещаются вытяжные установки, обслуживающие помещения соответственно категорий В1, В2, В3, В4;

г) к категории помещений, теплота удаляемого воздуха из которых используется в воздуховоздушных теплоутилизаторах, размещаемых в помещении для оборудования приточных систем;

д) к категории Г, если в обслуживаемых системах помещениях размещено теплогенерирующее оборудование на газовом топливе;

е) к категории Д – в остальных случаях.

Помещения для оборудования приточных систем с рециркуляцией, обслуживающих несколько помещений различных категорий по взрывоопасной и пожарной опасности, следует относить к более опасной категории.

Помещения для вентиляционного оборудования следует размещать непосредственно в пожарном отсеке, в котором находятся обслуживаемые и (или) защищаемые помещения.

В зданиях I и II степени огнестойкости помещения для вентиляционного оборудования допускается предусматривать вне обслуживаемого (защищаемого) пожарного отсека:

а) непосредственно за противопожарной преградой (противопожарной стеной или противопожарным перекрытием) на границе такого пожарного отсека – при установке противопожарных нормально открытых или нормально закрытых клапанов на воздуховодах систем общеобменной вентиляции или систем противодымной вентиляции, соответственно, в местах пересечений указанной противопожарной преграды;

б) на удалении от границы этого пожарного отсека – при аналогичной установке противопожарных клапанов и при исполнении воздуховодов на участках от ограждений помещения для вентиляционного оборудования до пересекаемой противопожарной преграды с пределами огнестойкости не менее пределов огнестойкости конструкций этой преграды.

Ограждающие строительные конструкции помещений для вентиляционного оборудования должны быть выполнены с обеспечением пределов огнестойкости не менее пределов огнестойкости противопожарной преграды, отделяющей обслуживаемый (защищаемый) пожарный отсек. В этих помещениях допускается устанавливать оборудование систем приточной или вытяжной общеобменной вентиляции в ограниченном перечне в соответствии с [18] или систем приточной или вытяжной противодымной вентиляции, обслуживающих или защищающих помещения разных пожарных отсеков.

Для предотвращения распространения продуктов горения при пожаре в помещениях различных этажей по воздуховодам систем общеобменной вентиляции,

воздушного отопления и кондиционирования должны быть предусмотрены следующие устройства:

а) противопожарные нормально открытые клапаны – на поэтажных сборных воздуховодах в местах присоединения их к вертикальному или горизонтальному коллектору для жилых, общественных, административнобытовых (кроме санузлов, умывальных, душевых, бань, а также кухонь жилых зданий) и производственных помещений категорий В4 и Г;

б) воздушные затворы – на поэтажных сборных воздуховодах в местах присоединения их к вертикальному или горизонтальному коллектору для жилых, общественных, административнобытовых (в том числе, для санузлов, умывальных, душевых, бань, а также кухонь жилых зданий) и производственных помещений категории Г.

Геометрические и конструктивные характеристики воздушных затворов должны обеспечивать при пожаре предотвращение распространения продуктов горения из коллекторов через поэтажные сборные воздуховоды в помещения различных этажей; длину вертикального участка воздуховода воздушного затвора следует принимать расчетную, но не менее 2 м.

Вертикальные коллекторы допускается присоединять к общему горизонтальному коллектору, размещаемому на чердаке или техническом этаже; в зданиях высотой более 28 м на вертикальных коллекторах в местах присоединения их к общему горизонтальному коллектору следует устанавливать противопожарные нормально открытые клапаны.

К каждому горизонтальному коллектору следует присоединять не более пяти поэтажных сборных воздуховодов с последовательно расположенных этажей.

В многоэтажных зданиях допускается присоединять:

- к горизонтальному коллектору – более пяти поэтажных сборных воздуховодов при условии установки противопожарных нормально открытых клапанов в местах присоединения дополнительных (сверх пяти безусловно предусматриваемых) этажных воздуховодов;

- к общему коллектору, размещаемому на чердаке или техническом этаже, группу горизонтальных коллекторов, при условии установки противопожарных нормально открытых клапанов в местах присоединения их к общему коллектору;

в) противопожарные нормально открытые клапаны – в местах пересечений ограждающих строительных конструкций с нормируемыми пределами огнестойкости обслуживаемых помещений воздуховодами:

- систем, обслуживающих производственные помещения, склады категорий А, Б, В1, В2 или В3, кладовые горючих материалов, сауны;

- систем местных отсосов взрывопожароопасных и пожароопасных смесей;

- систем общеобменной вентиляции помещений категорий В1, В4, Г и Д, удаляющих воздух из 5 метровой зоны вокруг оборудования, содержащего горючие вещества, способные к образованию взрывоопасной смеси в этой зоне;

г) противопожарные нормально открытые клапаны – на каждом транзитном сборном воздуховоде непосредственно перед ближайшими ответвлениями к вентиляторам систем, обслуживающих группы помещений (кроме складов) одной из категорий А, Б, В1, В2 или В3 общей площадью не более 300 м<sup>2</sup> в пределах одного этажа с выходами в общий коридор;

д) противопожарные нормально открытые клапаны – на сборных воздуховодах систем общеобменной вентиляции и воздушного отопления, обслуживающих помещения подземных и закрытых надземных многоэтажных стоянок автомобилей одной из категорий В1, В2 или В3.

Противопожарные нормально открытые клапаны следует устанавливать в проемах ограждающих строительных конструкций с нормируемыми пределами огнестойкости или с любой стороны указанных конструкций, обеспечивая предел огнестойкости воздуховода на участке от поверхности ограждающей конструкции до закрытой заслонки клапана, равный нормируемому пределу огнестойкости этой конструкции. При этом различные варианты установки в зависимости от технических характеристик противопожарных нормально открытых клапанов,

соответствующие различным направлениям возможного теплового воздействия на их конструкции, следует принимать с учетом данных сертификатов соответствия.

Если по техническим причинам установить противопожарные клапаны или воздушные затворы невозможно, то объединять воздуховоды из разных помещений в одну систему не допускается. В этом случае для каждого помещения необходимо предусмотреть отдельные системы без противопожарных клапанов или воздушных затворов.

В противопожарных перегородках, отделяющих общественные, административнобытовые или производственные помещения (кроме складов) категорий В4, Г и Д от коридоров, допускается устройство отверстий для перетекания воздуха при условии защиты отверстий противопожарными нормально открытыми клапанами. Установка указанных клапанов не требуется в помещениях, для дверей которых предел огнестойкости не нормируется.

Воздуховоды с нормируемыми пределами огнестойкости (в том числе теплозащитные и огнезащитные покрытия в составе их конструкций) должны быть из негорючих материалов. При этом толщину листовой стали для воздуховодов следует принимать расчетную, но не менее 0,8 мм. Для уплотнения разъемных соединений таких конструкций (в том числе фланцевых) следует использовать негорючие материалы. Конструкции воздуховодов с нормируемыми пределами огнестойкости при температуре перемещаемого газа более 100 °С следует предусматривать с компенсаторами линейных тепловых расширений. Элементы креплений (подвески) конструкций воздуховодов должны иметь пределы огнестойкости не менее нормируемых для воздуховодов (по установленным числовым значениям, но только по признаку потери несущей способности).

Строительные конструкции зданий из негорючих материалов с пределами огнестойкости не менее нормируемых для воздуховодов допускается использовать для перемещения воздуха, не содержащего легкоконденсирующиеся пары. При этом следует предусматривать герметизацию конструкций, гладкую отделку внутренних поверхностей (затирку или облицовку листовой сталью) и возможность очистки.

Вентиляционные каналы систем приточновытяжной противодымной вентиляции строительного исполнения длиной до 50 м допускается предусматривать:

а) класса герметичности В, в соответствии с [18];

б) при сохранении неизменности формы и площади проходного сечения (с относительным отклонением последней не более 3%) с исключением локальных выступов в местах пересечения межэтажных перекрытий.

Во всех остальных случаях строительное исполнение вентиляционных каналов систем противодымной вентиляции (кроме воздухозаборных каналов приточной противодымной вентиляции) не допускается без применения внутренних сборных или облицовочных стальных конструкций.

При этом фактические пределы огнестойкости различных конструкций вентиляционных каналов, в том числе стальных воздуховодов с огнезащитными покрытиями и каналов строительного исполнения, следует определять в соответствии с ГОСТ Р 53299.

Воздуховоды из негорючих материалов следует предусматривать в соответствии с требованиями [18].

Воздуховоды из горючих материалов (с группой горючести не ниже Г1) допускается предусматривать в пределах обслуживаемых помещений. Гибкие вставки у вентиляторов, кроме систем местных отсосов взрывопожароопасных смесей, аварийной вентиляции и перемещающих газовой среды температурой 800 С и выше, могут быть из горючих материалов. Не допускается применение гибких вставок из горючих материалов при присоединении к вентиляторам воздуховодов с нормируемыми пределами огнестойкости.

Плотность воздуховодов вентиляционных систем различного назначения должна соответствовать классам герметичности, установленным в соответствии с [18].

Условия прокладки транзитных воздуховодов и коллекторов систем вентиляции любого назначения (кроме систем противодымной вентиляции) в одном пожарном отсеке и пределы огнестойкости указанных воздуховодов и коллекторов следует предусматривать на всём протяжении от мест пересечений ограждающих



строительных конструкций обслуживаемых помещений до помещений для вентиляционного оборудования согласно приложению В.

Транзитные воздуховоды и коллекторы систем любого назначения в пределах одного пожарного отсека допускается проектировать:

а) из материалов группы горючести Г1 (кроме систем противодымной вентиляции) при условии прокладки каждого воздуховода в отдельной шахте, кожухе или гильзе из негорючих материалов с пределом огнестойкости EI 30;

б) из негорючих материалов и с ненормируемым пределом огнестойкости при условии прокладки каждого воздуховода или коллектора в отдельной шахте с ограждающими конструкциями, имеющими предел огнестойкости не менее EI 45, и установки противопожарных нормально открытых клапанов на каждом пересечении воздуховодами ограждающих конструкций такой шахты;

в) из негорючих материалов и с пределами огнестойкости ниже нормируемых при условии прокладки транзитных воздуховодов и коллекторов (кроме воздуховодов и коллекторов для производственных помещений категорий А и Б, а также для складов категорий А, Б, В1, В2) в общих шахтах с ограждающими конструкциями, имеющими предел огнестойкости не менее EI 45, и установки противопожарных нормально открытых клапанов на каждом воздуховоде, пересекающим ограждающие конструкции общей шахты;

г) из негорючих материалов с пределом огнестойкости ниже нормируемого, предусматривая при прокладке транзитных воздуховодов (кроме помещений и складов категорий А, Б, складов категорий В1, В2, а также жилых помещений) установку противопожарных нормально открытых клапанов при пересечении воздуховодами каждой противопожарной преграды и ограждающей строительной конструкции с нормируемыми пределами огнестойкости.

Пределы огнестойкости воздуховодов и коллекторов (кроме транзитных), прокладываемых в помещениях для вентиляционного оборудования, а также воздуховодов и коллекторов, прокладываемых снаружи здания, не нормируются.

Транзитные воздуховоды, прокладываемые за пределами обслуживаемого пожарного отсека, после пересечения ими противопожарной преграды

обслуживаемого пожарного отсека следует проектировать с пределами огнестойкости не менее EI 150.

Указанные транзитные воздуховоды допускается проектировать с ненормируемым пределом огнестойкости при прокладке каждого из них в отдельной шахте с ограждающими конструкциями, имеющими пределы огнестойкости не менее EI 150. Транзитные воздуховоды и коллекторы систем любого назначения из разных пожарных отсеков допускается прокладывать в общих шахтах с ограждающими конструкциями из негорючих материалов с пределами огнестойкости не менее EI 150 при условиях:

а) транзитные воздуховоды и коллекторы в пределах обслуживаемого пожарного отсека предусматриваются с пределом огнестойкости EI 30, поэтажные ответвления присоединяются к вертикальным коллекторам через противопожарные нормально открытые клапаны;

б) транзитные воздуховоды систем другого пожарного отсека должны иметь предел огнестойкости EI 150;

в) транзитные воздуховоды систем другого пожарного отсека должны быть с пределом огнестойкости EI 60 при условии установки противопожарных нормально открытых клапанов на воздуховодах в местах пересечения ими каждой противопожарной преграды с нормируемым пределом огнестойкости REI 150 и более.

Транзитные воздуховоды систем, обслуживающих тамбуршлюзы при помещениях категорий А и Б, а также систем местных отсосов взрывоопасных смесей следует проектировать:

а) в пределах одного пожарного отсека – с пределом огнестойкости EI 30;

б) за пределами обслуживаемого пожарного отсека – с пределом огнестойкости EI 150.

Противопожарные нормально открытые клапаны, устанавливаемые в проемах ограждающих строительных конструкций с нормируемыми пределами огнестойкости и (или) в воздуховодах, пересекающих эти конструкции, следует предусматривать с пределами огнестойкости:

- EI 90 – при нормируемом пределе огнестойкости противопожарной преграды или ограждающих строительных конструкций REI 150 и более;
- EI 60 – при нормируемом пределе огнестойкости противопожарной преграды или ограждающих строительных конструкций REI 60;
- EI 30 – при нормируемом пределе огнестойкости ограждающих строительных конструкций REI 45 (EI 45);
- EI 15 – при нормируемом пределе огнестойкости ограждающих строительных конструкций REI 15 (EI 15).

Допускается не устанавливать противопожарные нормально открытые клапаны при пересечении транзитными воздуховодами противопожарных преград или строительных конструкций с нормируемыми пределами огнестойкости (кроме ограждающих конструкций шахт с проложенными в них воздуховодами других систем) при обеспечении пределов огнестойкости транзитных воздуховодов не менее пределов огнестойкости пересекаемых противопожарных преград или строительных конструкций.

В других случаях противопожарные нормально открытые клапаны следует предусматривать с пределами огнестойкости не менее нормируемых для воздуховодов, на которых они устанавливаются, но не менее EI 15.

Фактические пределы огнестойкости различных конструкций противопожарных клапанов следует определять в соответствии с ГОСТ Р 53301.

Места прохода транзитных воздуховодов через стены, перегородки и перекрытия зданий (в том числе в кожухах и шахтах) следует уплотнять негорючими материалами, обеспечивая нормируемый предел огнестойкости пересекаемой ограждающей конструкции, за исключением мест прохода воздуховодов через перекрытия (в пределах обслуживаемого отсека) в шахтах с транзитными воздуховодами.

Для зданий и помещений, оборудованных автоматическими установками пожаротушения и (или) автоматической пожарной сигнализацией, следует предусматривать автоматическое отключение при пожаре систем общеобменной

вентиляции, кондиционирования воздуха и воздушного отопления (далее – системы вентиляции), а также закрытие противопожарных нормально открытых клапанов.

Отключение систем вентиляции и закрытие противопожарных нормально открытых клапанов должно осуществляться по сигналам, формируемым автоматическими установками пожаротушения и (или) автоматической пожарной сигнализацией, а также при включении систем противодымной вентиляции.

Необходимость частичного или полного отключения систем вентиляции и закрытия противопожарных клапанов должна определяться в соответствии с технологическими требованиями.

Особые требования выдвигаются к пожарной безопасности при эксплуатации газоиспользующего оборудования. Пожарная опасность газового оборудования характеризуется возможностью образования взрывоопасных смесей газа с воздухом и высокими температурами на поверхностях элементов печей и аппаратов. Взрывоопасные смеси при утечке газа могут образовываться в помещениях при отсутствии в них вентиляции, а также в объеме печей и аппаратов.

Не допускается газового отопления в помещениях, относящихся по пожарной опасности к категориям А, Б и В, складских помещениях, гаражах на 50 и более автомобилей, в помещениях, выполненных из легких металлических конструкций с утеплителем из горючих материалов в стенах и перекрытиях, а также в помещениях подвальных и цокольных этажей.

Аппараты водонагревательные емкостные газовые следует устанавливать в нежилых помещениях у несгораемых стен на расстоянии не менее 15 см от стены. Допускается установка аппаратов у сгораемых стен при условии изоляции стены кровельной сталью по листу асбеста толщиной 3 мм или асбестофанерой, которая должна выступать на 10 см за габариты корпуса.

При установке водонагревателя на сгораемый пол последний необходимо изолировать кровельной сталью по листу асбеста толщиной 3 мм или другим несгораемым материалом.

Отопительные приборы с горелками инфракрасного излучения, предназначенные для отопления помещений без постоянного обслуживающего персонала,

должны предусматриваться с автоматикой, обеспечивающей прекращение подачи газа при погасании пламени горелки.

Расстояние от горелок инфракрасного излучения до конструкций из горючих материалов (стены, перегородки, оконные и дверные коробки и т. д.) должно быть не менее 0,5 м при температурах излучающей поверхности до 900 °С и не менее 1,25 м при температурах выше 900 °С, потолок и конструкции из горючих материалов над горелкой необходимо защищать или экранировать негорючими материалами.

Для отвода продуктов сгорания от газовых аппаратов и печей должен предусматриваться обособленный дымоход от каждого аппарата или печи. Допускается в существующих зданиях присоединение к одному дымоходу не более двух газовых аппаратов или печей, расположенных на одном или разных этажах, при условии ввода продуктов сгорания в дымоход на различных уровнях не ближе 50 см друг от друга или устройства в дымоходе на такую же высоту рассечек.

Расстояние от соединительной дымоотводящей трубы до потолка из негорючих материалов или стены должно приниматься не менее 5 см. При наличии деревянных оштукатуренных потолков и стен это расстояние принимается не менее 25 см. В случае обивки указанных конструкций кровельной сталью по листу асбеста толщиной 3 мм расстояние можно уменьшить до 10 см. Обивка должна выступать за габариты дымоотводящей трубы на 15 см с каждой стороны.

Запрещается использовать для отвода в атмосферу продуктов сгорания газа дымоходы, выполненные из силикатного кирпича, шлакобетонных и других неплотных или пористых материалов. Во время эксплуатации дымоходов от газовых аппаратов и печей необходимо производить периодическую проверку и чистку каналов. Дымоходы подлежат периодической проверке и чистке в следующие сроки: один раз в квартал – кирпичные дымоходы от проточных газовых нагревателей, один раз в год – асбоцементные дымоходы, выполненные из специальных блоков жаростойкого бетона, дымоходы от проточных водонагревателей, оборудованных автоматикой по тяге, дымоходы от отопительных и отопительно-варочных печей.

## **11 Надежность в технике**

В данной главе приводятся основные термины и определения, касающиеся надежности в технике, из [1].

### **11.1 Основные понятия**

Объект (технический) – предмет рассмотрения, на который распространяется терминология по надежности в технике. Объектом может быть сборочная единица, деталь, компонент, элемент, устройство, функциональная единица, оборудование, изделие, система, сооружение. Он может включать в себя аппаратные средства, программное обеспечение, персонал или их комбинации. Термин «объект» может относиться к конкретному объекту и к одному из представителей группы однотипных объектов, в частности, к выбранному случайным образом элементу выборки, партии, серии, генеральной совокупности.

Элемент – объект, для которого в рамках данного рассмотрения не выделяются составные части.

Система – объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое и отделенных от окружающей среды.

Подсистема – часть системы, которая представляет собой систему.

Надежность – свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения.

Ремонтопригодность – свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта.

Восстанавливаемость – свойство объекта, заключающееся в его способности восстанавливаться после отказа без ремонта.

Долговечность – свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния.

Сохраняемость – свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования.

Готовность – свойство объекта, заключающееся в его способности находиться в состоянии, в котором он может выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и ремонта в предположении, что все необходимые внешние ресурсы обеспечены.

## **11.2 Состояния**

Исправное состояние (исправность) – состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в документации на него.

Неисправное состояние (неисправность) – состояние объекта, в котором он не соответствует хотя бы одному из требований, установленных в документации на него.

Работоспособное состояние – состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции.

Неработоспособное состояние – состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию по причинам, зависящим от него или из-за профилактического технического обслуживания.

Рабочее состояние – состояние объекта, в котором он выполняет какую-либо требуемую функцию.

Нерабочее состояние – состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций.

Предельное состояние – состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, установленные в документации на него.

Опасное состояние – состояние объекта, в котором возникает недопустимый риск причинения вреда людям, или окружающей среде, или существенных материальных потерь, или других неприемлемых последствий.

Техническое состояние – состояние объекта, характеризуемое совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях.

Предотказное состояние – состояние объекта, характеризуемое повышенным риском его отказа.

Критерий предотказного состояния – признак или совокупность признаков предотказного состояния объекта.

### **11.3 Временные понятия**

Наработка – продолжительность или объем работы объекта.

Наработка до отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации или от момента его восстановления до отказа.

Наработка между отказами – наработка объекта между двумя следующими друг за другом отказами.

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до момента достижения предельного состояния.

Остаточный ресурс – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до момента достижения предельного состояния.

Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после капитального ремонта до момента достижения предельного состояния.



Срок сохраняемости – календарная продолжительность хранения и/или транспортирования объекта, в течение которой он сохраняет работоспособное состояние

Время (продолжительность) ремонта – время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по ремонту объекта.

Время восстановления – время, затрачиваемое непосредственно на выполнение операций по восстановлению объекта.

Время до восстановления – время от момента отказа до восстановления работоспособного состояния объекта.

Назначенный ресурс – суммарная наработка, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя.

Назначенный срок службы – календарная продолжительность, при достижении которой эксплуатация объекта может быть продолжена только после принятия решения о возможности продления данного показателя.

Назначенный срок хранения – календарная продолжительность, при достижении которой хранение объекта может быть продолжено только после принятия решения о возможности продления данного показателя.

#### **11.4 Отказы, дефекты, повреждения**

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Дефект – каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией.

Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния.

Вид отказа – единица классификации отказов, исходящей из установленных критериев: характера, причины, последствий отказа, функции, способность выполнения которой потеряна, или изменения состояния объекта.

Критерий отказа – признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния объекта, установленные в документации.

Независимый отказ – отказ, не обусловленный другими отказами.

Зависимый отказ – отказ, обусловленный другими отказами.

Причина отказа – явления, процессы, события и состояния, вызвавшие возникновение отказа объекта.

Последствия отказа – явления, процессы, события и состояния, обусловленные возникновением отказа объекта.

Критичность отказа – совокупность признаков, характеризующих последствия отказа.

Ресурсный отказ – отказ, в результате которого объект достигает предельного состояния.

Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние.

Постепенный отказ – отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта.

Систематический отказ – отказ, однозначно вызванный определенной причиной, которая может быть устранена только модификацией проекта или производственного процесса, правил эксплуатации и документации.

Перебегающий отказ – многократно возникающий самоустраняющийся отказ одного и того же характера.

Сбой – самоустраняющийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора.

Явный отказ – отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения.

Скрытый отказ – отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностирования.

Конструктивный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленных правил и (или) норм проектирования и конструирования.

Производственный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с несовершенством или нарушением установленного процесса изготовления или ремонта, выполняемого на ремонтном предприятии.

Эксплуатационный отказ – отказ, возникший по причине, связанной с нарушением установленных правил и (или) условий эксплуатации.

Деградационный отказ – отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении всех установленных правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации.

Механизм отказа – процесс, который приводит к отказу.

Отказы по общей причине – отказы различных объектов, возникающие вследствие одного события (отказа, ошибки персонала, внешнего или внутреннего воздействия), которые без рассмотрения причин считались бы независимыми.

Отказы общего вида – отказы различных объектов, характеризующиеся одним и тем же видом отказа.

## **11.5 Техническое обслуживание, восстановление и ремонт**

Система технического обслуживания и ремонта – совокупность взаимосвязанных средств, документации технического обслуживания и ремонта и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления работоспособного состояния объекта.

Техническое обслуживание – комплекс организационных мероприятий и технических операций, направленных на поддержание работоспособности (исправности) объекта и снижение вероятности его отказов при использовании по назначению, хранении и транспортировании.

Обслуживаемый объект – объект, для которого техническое обслуживание предусмотрено документацией.

Необслуживаемый объект – объект, для которого техническое обслуживание не предусмотрено документацией.

Восстановление – процесс и событие, заключающиеся в переходе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное.

Самовосстановление – восстановление объекта без вмешательства извне.

Восстанавливаемый объект – объект, восстановление работоспособного состояния которого предусмотрено документацией.

Невосстанавливаемый объект – объект, восстановление работоспособного состояния которого не предусмотрено документацией.

Ремонт – комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению исправного или работоспособного состояния объекта и восстановлению ресурса объекта или его составных частей.

Ремонтопригодный объект – объект, ремонт которого предусмотрен документацией и возможен в заданных условиях.

Неремонтопригодный объект – объект, ремонт которого не предусмотрен документацией.

Мониторинг технического состояния – составная часть технического обслуживания, заключающаяся в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах.

Замена – процедура поддержания или восстановления работоспособности объекта путем установки запасной части вместо отказавшего или изношенного элемента объекта.

Запасная часть – отдельный узел, устройство или элемент, предназначенные для замены изношенных, неисправных или отказавших составных частей объекта с целью поддержания или восстановления его работоспособного состояния.

Запасные части, инструменты и принадлежности – совокупность запасов материальных средств, сформированная в зависимости от назначения и особенностей использования объекта и предназначенная для его функционирования, технического обслуживания и ремонта.

Комплект ЗИП – набор запасных частей, инструментов, принадлежностей и расходных материалов, необходимых для функционирования, технического обслуживания и ремонта объекта.

Система ЗИП – совокупность комплектов ЗИП разных видов и уровней иерархии, необходимых для поддержания и восстановления работоспособности объекта или совокупности объектов.

### **11.6 Показатели надежности**

Показатель надежности – количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта.

Единичный показатель надежности – показатель надежности, характеризующий одно из свойств, составляющих надежность объекта.

Комплексный показатель надежности – показатель надежности, совместно характеризующий несколько единичных свойств, составляющих надежность объекта

Вероятность безотказной работы – вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет.

Средняя наработка до отказа – математическое ожидание наработки объекта до отказа.

Гамма-процентная наработка до отказа – наработка до отказа, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью, выраженной в процентах.

Средняя наработка между отказами – математическое ожидание наработки объекта между отказами.

Гамма-процентная наработка между отказами – наработка между отказами, в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью, выраженной в процентах.

Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Параметр потока отказов – предел отношения вероятности возникновения отказа восстанавливаемого объекта за достаточно малый интервал времени к длительности этого интервала, стремящейся к нулю.

Вероятность восстановления – вероятность того, что время (до) восстановления работоспособного состояния объекта не превысит заданное значение.

Среднее время восстановления – математическое ожидание времени восстановления.

Среднее время до восстановления – математическое ожидание времени до восстановления.

Гамма-процентное время восстановления – время, в течение которого восстановление работоспособности объекта будет осуществлено с вероятностью, выраженной в процентах.

Гамма-процентное время до восстановления – длительность времени до восстановления, которая не будет превышена с вероятностью, выраженной в процентах

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления работоспособного состояния объекта, определенная для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента восстановление не было завершено.

Средний ресурс – математическое ожидание ресурса.

Гамма-процентный ресурс – суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах.

Средний срок службы – Математическое ожидание срока службы.

Гамма-процентный срок службы – календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью, выраженной в процентах.

Средний срок сохраняемости – математическое ожидание срока сохраняемости.

Гамма-процентный срок сохраняемости – срок сохраняемости, достигаемый объектом с заданной вероятностью, выраженной в процентах.

Коэффициент готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени.

Коэффициент неготовности – вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в данный момент времени.

Коэффициент оперативной готовности – вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени.

Коэффициент технического использования – отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период.

Коэффициент сохранения эффективности – отношение значения показателя эффективности использования объекта по назначению за определенную продолжительность эксплуатации к номинальному значению этого показателя, вычисленному при условии, что отказы объекта в течение того же периода не возникают.

### **11.7 Разработка, обеспечение, анализ**

Нормирование надежности – установление в нормативно-технической документации и (или) конструкторской (проектной) документации количественных и качественных требований к надежности объекта.

Распределение требований – распределение требований к показателям надежности объекта между его составными частями.

Структурная схема надежности – логическое и графическое представление объекта, отображающее, каким образом безотказность его блоков и их сочетаний влияют на безотказность объекта.

Программа обеспечения надежности – документ, устанавливающий перечень и порядок проведения на разных стадиях жизненного цикла объекта организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение надежности и (или) на ее повышение.

Оценка надежности – определение численных значений показателей надежности объекта.

Прогнозирование надежности – предварительная оценка надежности объекта на основании предшествующего опыта или статистики.

Контроль надежности – определение соответствия показателей надежности объекта заданным требованиям.

Расчетный метод определения надежности – метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта, по данным о надежности объектов-аналогов, по данным о свойствах материалов и другой информации, имеющейся к моменту расчета надежности.

Расчетно-экспериментальный метод определения надежности – метод оценки надежности объекта путем расчета, при котором показатели надежности всех или некоторых составных частей объекта определены экспериментально.

Экспериментальный метод определения надежности – метод оценки показателей надежности путем статистической обработки данных, полученных при испытаниях или эксплуатации объекта в целом.

Модель надежности – математическая модель объекта, используемая для прогнозирования или оценки надежности.

Анализ отказов – исследование отказов, направленное на определение различных факторов, влияющих на надежность (причин отказов, составляющих времени восстановления, эффективности резервирования и т.п.).

Отбраковочные испытания – испытание или набор испытаний, предназначенные для обнаружения и удаления из выборки дефектных объектов или объектов, подверженных риску ранних отказов.

## **11.8 Резервирование**

Резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и/или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций.

Резерв – совокупность дополнительных средств и/или возможностей, используемых для резервирования.

Основной элемент – элемент объекта, необходимый для выполнения требуемых функций без использования резерва.



Резервный элемент – элемент объекта, предназначенный для выполнения функций основного элемента в случае отказа последнего.

Кратность резерва – отношение числа резервных элементов к числу основных элементов, выраженное несокращенной дробью.

Нагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в режиме основного элемента.

Облегченный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в менее нагруженном режиме, чем основной элемент до начала выполнения ими функций основного элемента.

Ненагруженный резерв – резерв, который содержит один или несколько резервных элементов, находящихся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента.

Постоянное резервирование – резервирование, при котором используется нагруженный резерв, и при отказе любого элемента в резервированной группе выполнение объектом требуемых функций обеспечивается оставшимися элементами без переключений.

Резервирование замещением – резервирование, при котором функции основного элемента передаются резервному только при отказе основного элемента.

Общее резервирование – резервирование, при котором резервируется объект в целом.

Раздельное резервирование – резервирование, при котором резервируются отдельные элементы объекта или их группы.

Переключающий элемент – элемент объекта, предназначенный для подключения исправного резервного элемента объекта вместо отказавшего основного элемента.

Вероятность успешного перехода на резерв – вероятность того, что переход на резерв произойдет без отказа объекта.

Смешанное резервирование – сочетание различных видов резервирования в одном и том же объекте.

Резервирование без восстановления – резервирование, при котором восстановление отказавших основных элементов и/или резервных технически невозможно без нарушения работоспособности объекта в целом и/или не предусмотрено эксплуатационной документацией.

Резервирование с восстановлением – резервирование, при котором восстановление отказавших основных элементов и/или резервных технически возможно без нарушения работоспособности объекта в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией.

Мажоритарное резервирование – резервирование, при котором в нагруженном режиме находится нечетное количество не менее трех однотипных элементов и результатом работы объекта принимается одинаковый результат работы большинства основных элементов.

## **11.9 Испытания на надежность**

Испытания на надежность – испытания, проводимые с целью определения и/или контроля показателей надежности в заданных условиях.

Определительные испытания на надежность – испытания, проводимые для оценки показателей надежности.

Контрольные испытания на надежность – испытания, проводимые для проверки соответствия показателей надежности заданным требованиям.

Лабораторные испытания на надежность – испытания, проводимые в лабораторных условиях.

Эксплуатационные испытания на надежность – испытания проводимые в реальных условиях эксплуатации объекта.

Нормальные испытания – испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых максимально приближены к эксплуатационным для объекта.

Ускоренные испытания – испытания на надежность, методы, режимы и условия проведения которых обеспечивают получение информации о надежности

объекта в более короткий срок, чем при испытаниях, проводимых в реальных условиях эксплуатации объекта.

Коэффициент ускорения испытаний – отношение значений времени получения информации об оцениваемом показателе надежности в нормальном и ускоренном режимах..

План испытаний на надежность – совокупность правил, устанавливающих объем выборки, порядок проведения испытаний, критерии их завершения и принятия решений по результатам испытаний на надежность.

## **8 Пример выполнения курсового проекта по дисциплине «Надежность и безопасность систем теплогазоснабжения и вентиляции»**

Оформление курсового проекта должно соответствовать правилам, приведенным в [14]. В данной главе приводится пример выполнения курсового проекта.

### **Аннотация**

Курсовой проект состоит пяти частей:

В первой части определяются характеристики надежности элементов тепловой сети: интенсивность и параметр потока отказов, интенсивность и среднее время восстановления.

Во второй части определяются вероятности рабочего состояния сети и вероятности состояний сети с отказом одного из элементов.

В части 3, для расчета показателей надежности вычисленным вероятностям состояний сети необходимо поставить в соответствие количество тепловой энергии, подаваемой каждому потребителю в этих состояниях.

В части 4, на основе данных, полученных в части 3, определяются температуры воздуха в зданиях в конце периода восстановления теплоснабжения. По их значениям определяются элементы сети, отказ которых нарушает расчетный уровень теплоснабжения потребителей, и формируются множества.

В части 5, по рассчитываются коэффициенты готовности ТС к обеспечению расчетного теплоснабжения потребителей и вероятности обеспечения пониженного уровня теплоснабжения потребителей.

Работа содержит 28 страниц текста, 3 таблицы. Графическая часть выполнена на одном листе формата А1.

## Содержание

Содержание предпочтительно выполняется с функцией автособирания.

## Введение

Надежность систем централизованного теплоснабжения определяется структурой, параметрами, степенью резервирования и качеством элементов всех ее подсистем – источников тепловой энергии, тепловых сетей (ТС), узлов потребления, систем автоматического регулирования, а также уровнем эксплуатации и строительно-монтажных работ.

В силу ряда как удаленных по времени, так и действующих сейчас причин положение в централизованном теплоснабжении характеризуется неудовлетворительным техническим уровнем и низкой экономической эффективностью систем, изношенностью оборудования, недостаточными надежностью теплоснабжения и уровнем комфорта в зданиях, большими потерями тепловой энергии.

Наиболее ненадежным звеном систем теплоснабжения являются тепловые сети, особенно при их подземной прокладке. Это, в первую очередь, обусловлено низким качеством применяемых ранее конструкций теплопроводов, тепловой изоляции, запорной арматуры, недостаточным уровнем автоматического регулирования процессов передачи, распределения и потребления тепловой энергии, а также все увеличивающимся моральным и физическим старением теплопроводов и оборудования из-за хронического недофинансирования работ по их модернизации и реконструкции. Кроме того, структура тепловых сетей в крупных системах не соответствует их масштабам.

Вместе с тем сфера теплоснабжения в нашей стране имеет высокую социальную и экономическую значимость, поскольку играет ключевую роль в жизнеобеспечении населения и потребляет около 40% первичных топливных ресурсов, более 60% которых составляет природный газ.

Таким образом, при разработке схем теплоснабжения решаются два типа задач, связанных с расчетами надежности:

1. Расчет показателей надежности теплоснабжения потребителей по характеристикам надежности элементов при заданной схеме и параметрах системы (задачи анализа надежности).

2. Выбор (корректировка) схемы и параметров системы в рассматриваемой перспективе ее развития с учетом нормативных требований к надежности теплоснабжения потребителей (задачи синтеза (построения) надежной системы).

Существенную методическую сложность в решение этих задач вносят тепловые сети – нелинейные пространственные сетевые структуры с произвольной топологией, которые в расчетах надежности должны рассматриваться как системы с произвольными монотонными структурами, пропускные способности связей которых различны в различных режимах.

## **1 Определение характеристик надежности элементов тепловой сети**

Источником теплоты является районная котельная с присоединенной тепловой нагрузкой 401,5 Гкал/ч. Расчетная температура наружного воздуха:  $t^{HP} =$  минус  $31^{\circ}\text{C}$  (г. Екатеринбург). Продолжительность отопительного периода:  $\tau^{OT} = 5472 \text{ ч} = 228 \text{ суток} = 0,625 \text{ года}$ . Средняя температура отопительного периода:  $t^{HCP} =$  минус  $4,8^{\circ}\text{C}$ . Тепловая энергия подается потребителям по двухтрубным водяным ТС, проложенным преимущественно в непроходных каналах. ТС тупиковая без колец. Схема ТС, приведенная на листе 1, включает 50 участков, 15 потребителей. Общая длина сети 9,8 км. Диаметр головного участка 1000 мм, длина 1,6 км. Наиболее удаленным от ИТ является потребитель в узле 12-13 (5,7 км).

Статистические данные по отказам элементов ТС отсутствуют, поэтому интенсивности отказов участков сети со сроком эксплуатации не более 25 лет определялись по формуле (1) при начальной интенсивности отказов теплопроводов  $\lambda^{нач} = 5,7 \times 10^{-6} \text{ 1/км}\cdot\text{ч}$ . Интенсивность отказов ЗРА (запорно-регулирующей армату-

ры)  $\lambda_{\text{эра}}$  в соответствии с [1] приняты равными  $2,28 \times 10^{-7}$  1/ч. Участков сети, работающих более 25 лет, в сети нет.

### 1.1 Расчет интенсивности отказов тепловой сети

Интенсивность отказов теплопровода  $\lambda$ , 1/(км·ч) с учетом времени его эксплуатации [2] определим по формуле:

$$\lambda = \lambda^{\text{нач}} \cdot (0,1 \cdot \tau^{\text{экспл}})^{\alpha-1}, \quad (1)$$

где  $\lambda^{\text{нач}}$  – начальная интенсивность отказов теплопровода, соответствующая периоду нормальной эксплуатации, 1/(км·ч);

$\tau^{\text{экспл}}$  – продолжительность эксплуатации участка, лет;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий продолжительность эксплуатации участка:

$$\alpha = \begin{cases} 0,8 & \text{при } 0 < \tau^{\text{экспл}} \leq 3 \\ 1 & \text{при } 3 < \tau^{\text{экспл}} \leq 17 \\ 0,5 \cdot e^{\left(\frac{\tau^{\text{экспл}}}{20}\right)} & \text{при } \tau^{\text{экспл}} > 17 \end{cases} \quad (2)$$

Значения интенсивностей отказов элементов ТС приведены на рисунке А.1 и в таблице А.1 приложения А.

Большие значения интенсивностей отказов участков 9-10, 10-11 и 11-12 обусловлены длительным сроком их эксплуатации 20-25 лет и наибольшими пропускными объемами.

### 1.2 Расчет параметров потока отказов элементов тепловой сети

Значения параметра потока отказов элементов ТС формулы (3) и (4), приведены на рисунке А.2 и в таблице А.1 приложения А.

Параметр потока отказов участков ТС  $\omega$ , 1/ч:

$$\omega = \lambda \cdot L, \quad (3)$$

где  $L$  – длина участка ТС, км.

Параметр потока отказов ЗРА  $\omega_{\text{зра}}$ , 1/ч:

$$\omega_{\text{зра}} = \lambda_{\text{зра}} = 2,28 \cdot 10^{-7}, \quad (4)$$

### 1.3 Расчет среднего времени до восстановления элементов тепловой сети

Значения данного параметра приведены в таблице А.1 приложения А.

Среднее время до восстановления участков ТС  $z^B$ , ч /3/:

$$z^B = a \cdot [1 + (b + c \cdot L_{\text{сз}}) \cdot d^{1,2}], \quad (5)$$

где  $L_{\text{сз}}$  – расстояние между секционирующими задвижками, км;

$d$  – диаметр теплопровода, м.

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для формулы (5), приведенные в таблице 1, получены на основе численных значений времени восстановления теплопроводов в зависимости от их диаметров, рекомендуемых [3].

Расстояния  $L_{\text{сз}}$  между секционными задвижками (СЗ) должны соответствовать требованиям [3] и принимается в соответствии с таблицей 2.

Таблица 1 – Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$

Коэффициент	$a$	$b$	$c$
Значение	2.91256074780734	20.8877641154199	-1.87928919400643

Полученные данные сведены в таблицу А.1 приложения А.



1.4 Расчет интенсивность восстановления элементов тепловой сети  $\mu$ , 1/ч

$$\mu = \frac{1}{z^B}, \quad (6)$$

Полученные данные сведены в таблицу А.1 приложения А.

Таблица 2 – Расстояния между СЗ в метрах и место их расположения

Диаметр теплопровода, м	Диаметр не изменяется		Диаметр изменяется	
	ответвлений нет	ответвления есть	ответвлений нет	ответвления есть
1	2	3	4	5
до 0,4	1000	Непосредственно за ответвлением, расстояние до ближайшей СЗ не более 1000 м	Непосредственно за местом изменения диаметра, расстояние до ближайшей СЗ не более 1000 м	Непосредственно за ответвлением, на теплопроводе меньшего диаметра, расстояние до ближайшей СЗ не более 1000 м
от 0,4 до 0,6	1500	Непосредственно за ответвлением, расстояние до ближайшей СЗ не более 1500 м	Непосредственно за местом изменения диаметра, расстояние до ближайшей СЗ не более 1000 м	Непосредственно за ответвлением, на теплопроводе меньшего диаметра, расстояние до ближайшей СЗ не более 1000 м
от 0,6 до 0,9	3000	Непосредственно за ответвлением, расстояние до ближайшей СЗ не более 3000 м	Непосредственно за местом изменения диаметра, расстояние до ближайшей СЗ в соответствии с меньшим диаметром (не более 1000 м, 1500 м)	Непосредственно за ответвлением, на теплопроводе меньшего диаметра, расстояние до ближайшей СЗ в соответствии с меньшим диаметром (не более 1000 м, 1500 м)

Продолжение таблицы 2 – Расстояния между СЗ в метрах и место их расположения

1	2	3	4	5
более 0,9	5000	Непосредственно за ответвлением, расстояние до ближайшей СЗ не более 5000 м	Непосредственно за местом изменения диаметра, расстояние до ближайшей СЗ в соответствии с меньшим диаметром (не более 1000 м, 1500 м, 3000 м)	Непосредственно за ответвлением, на теплопроводе меньшего диаметра, расстояние до ближайшей СЗ в соответствии с меньшим диаметром (не более 1000 м, 1500 м, 3000 м)

## 2 Определение вероятности рабочего состояния сети и вероятности состояний сети с отказом одного из элементов

### 2.1 Расчет стационарной вероятности рабочего состояния сети

$$p_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{\mu_i}\right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $N$  – число элементов ТС (участков и ЗРА).

### 2.2 Расчет вероятности состояния сети, соответствующая отказу $f$ -го элемента

Вероятности состояния  $p_f$ , соответствующие отказам одного из элементов ТС и рассчитанные по формуле (8), приведены на рисунке А.3 и в таблице А.1 приложения А.

$$p_f = \frac{\omega_f}{\mu_f} \cdot p_0. \quad (8)$$

При вычислении вероятностей состояния ТС, кроме срока службы и длины участка, учитывается его диаметр и время восстановления после отказа. Наибольший вклад в состояния ТС с отказами вносят участки 9-10, 10-11 и 11-12.

### **3 Постановка соответствия количества тепловой энергии, подаваемой каждому потребителю в этих состояниях**

3.1 Расчет коэффициента готовности к обеспечению расчетного теплоснабжения  $j$ -го потребителя

$$K_j = p_0 + \sum_{f \in F_j} p_f, \quad (9)$$

где  $F_j$  – множество элементов ТС, выход которых в аварию не нарушает расчетный уровень теплоснабжения  $j$ -го потребителя.

Полученные данные сведены в таблицу 3.

3.2 Расчет вероятности безотказного теплоснабжения  $j$ -го потребителя

Расчет вероятности безотказного теплоснабжения  $j$ -го потребителя – вероятность обеспечения в течение отопительного периода температуры воздуха в здании  $j$ -го потребителя не ниже минимально допустимого значения (определяется для каждого потребителя расчетной схемы ТС /3/).

$$P_j = e^{-[p_0 \cdot \sum_f (\omega_f \cdot \tau_{j,f}^{пав})]}, \quad (10)$$

где  $\tau_{j,f}^{\text{pав}}$  – продолжительность (число часов) стояния в течение отопительного периода температуры наружного воздуха  $t^{\text{H}}$  ниже  $t_{j,f}^{\text{pав}}$  – температура наружного воздуха, при которой время восстановления  $f$ -го элемента  $z_f^{\text{B}}$  равно временному резерву  $j$ -го потребителя, т.е. времени снижения температуры воздуха в здании  $j$ -го потребителя до минимально допустимого значения  $t_{j,f}^{\text{B min}}$ .

С помощью величин  $t_{j,f}^{\text{pав}}$  и  $\tau_{j,f}^{\text{pав}}$  выделяется доля отопительного сезона, в течение которой выход в аварию  $f$ -го элемента влияет на величину  $P_j$ .

Полученные данные сведены в таблицу 3.

#### 4 Определение температуры воздуха в зданиях в конце периода восстановления теплоснабжения

4.1 Расчет температуры воздуха в здании  $j$ -го потребителя в конце периода восстановления  $f$ -го элемента

Для определения по формуле (10) величин  $P_j$  – вероятностей безотказного теплоснабжения потребителей по отношению к пониженному уровню сначала рассчитываются температуры наружного воздуха  $t_{j,f}^{\text{pав}}$  (формулы (12) и (12а)), при которых время восстановления  $f$ -го элемента равно временному резерву  $j$ -го потребителя (таблица А.2). Продолжительности стояния этих температур  $\tau_{j,f}^{\text{pав}}$  приведены в таблице А.3 приложения А.

$$t_{j,f}^{\text{B}} = t^{\text{HP}} + \frac{t_j^{\text{BP}} - t^{\text{HP}} - \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{\text{BP}} - t^{\text{HP}})}{e^{\left(\frac{z_f^{\text{B}}}{\beta_j}\right)}} + \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{\text{BP}} - t^{\text{HP}}), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (11)$$

где  $t_j^{\text{BP}}$  – расчетная температура воздуха в здании  $j$ -го потребителя,  $^\circ\text{C}$ ;

$t^{\text{HP}}$  – расчетная для отопления температура наружного воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;

$\bar{q}_{j,f}$  – часовой расход тепла у  $j$ -го потребителя при отказе  $f$ -го элемента при  $t^{\text{HP}}$ ,

Гкал/ч;

$q_j^p$  – расчетная часовая нагрузка  $j$ -го потребителя при  $t^{HP}$ , Гкал/ч;

$\bar{q}_{j,f} = \frac{q_{j,f}}{q_j^p}$  – относительный часовой расход тепла у  $j$ -го потребителя при отказе

$f$ -го элемента при  $t^{HP}$ ;

$z_f^B$  – время восстановления  $f$ -го элемента ТС, ч;

$\beta_j$  – коэффициент тепловой аккумуляции здания  $j$ -го потребителя, ч.

4.2 Расчет температуры наружного воздуха, при которой время восстановления  $f$ -го элемента равно временному резерву  $j$ -го потребителя

При  $\bar{q}_{j,f} = 0$  ( $j$ -ый потребитель при аварии на  $f$ -ом участке не получает тепло):

$$t_{j,f}^{рав} = \frac{t_j^{BP} - t_{j,min}^B \cdot e^{\left(\frac{z_f^B}{\beta_j}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{z_f^B}{\beta_j}\right)}} \quad (12)$$

При  $\bar{q}_{j,f} > 0$ :

$$t_{j,f}^{рав} = \frac{t_j^{BP} - \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{BP} - t^{HP}) - (t_{j,min}^B - \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{BP} - t^{HP})) \cdot e^{\left(\frac{z_f^B}{\beta_j}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{z_f^B}{\beta_j}\right)}} \quad (12a)$$

Здесь  $t_{j,min}^B$  – минимально допустимая температура воздуха в здании  $j$ -го потребителя, °С.

Численные значения коэффициентов тепловой аккумуляции зданий различных типов принимаются в соответствии с рекомендациями [5].

Расчетные температуры воздуха в зданиях принимаются в соответствии с требованиями [6],  $t_{j,min}^B$  – по [4].

Продолжительности стояния температур наружного воздуха принимаются по [7].

Результаты расчета приведены в таблице А.3 приложения А.

### 4.3 Расчет определения $\tau_{j,f}^{\text{рав}}$ числа часов стояния температуры наружного воздуха ниже $t_{j,f}^{\text{рав}}$

В нашем случае возможно несколько вариантов, а именно:

Если  $t_{j,f}^{\text{рав}} < t^{\text{мин}}$  (минимальная температура наружного воздуха), отказ  $f$ -го элемента не влияет на теплоснабжение  $j$ -го потребителя и в формуле (10)  $\tau_{j,f}^{\text{рав}}$  берется равной нулю.

Если  $t^{\text{мин}} < t_{j,f}^{\text{рав}} < t^{\text{нр}}$ , то  $\tau_{j,f}^{\text{рав}} = \frac{t^{\text{нр}} - t_{j,f}^{\text{рав}}}{t^{\text{нр}} - t^{\text{мин}}} \times \tau^{\text{мин}}$ .

Если  $t^{\text{нр}} < t_{j,f}^{\text{рав}} < +8 \text{ }^\circ\text{C}$ , то  $0 < \tau_{j,f}^{\text{рав}} < \tau^{\text{от}}$  и значение  $\tau_{j,f}^{\text{рав}}$  определяется по графику продолжительностей стояния температур (график Россандера) /7/ или по формуле (13).

$$\tau_{j,f}^{\text{рав}} = \tau^{\text{хол}} + (\tau^{\text{от}} - \tau^{\text{хол}}) \cdot \left( \frac{t_{j,f}^{\text{рав}} - t^{\text{нр}}}{8 - t^{\text{нр}}} \right)^{\frac{t^{\text{н ср}} - t^{\text{нр}}}{8 - t^{\text{н ср}}}}, \quad (13)$$

где  $\tau^{\text{хол}}$  – продолжительность стояния температуры наружного воздуха ниже расчетной для отопления, ч;

$\tau^{\text{от}}$  – продолжительность отопительного периода, ч;

$t^{\text{н ср}}$  – средняя за отопительный период температура наружного воздуха,  $^\circ\text{C}$ .

Результаты расчета приведены в таблице А.3 приложения А.

Таким образом, автоматически выделяются:

а) элементы, отказы которых нарушают и не нарушают пониженный уровень теплоснабжение потребителя;

б) доля отопительного периода, в течение которой нарушение имеет место.

## 5 Расчёт коэффициентов готовности тепловой сети к обеспечению расчетного теплоснабжения потребителей и вероятности обеспечения пониженного уровня теплоснабжения потребителей

5.1 Средний суммарный недоотпуск теплоты  $j$ -му потребителю в течение отопительного периода  $Q_j^-$ , Гкал

$$Q_j^- = (g_j^p - \sum_{f=0} p_f g_{j,f}) \cdot (\tau_1^p - \tau_2^p) \cdot \frac{t_j^{BP} - t^{HCP}}{t_j^{BP} - t^{HP}} \cdot \tau^{OT} \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где  $g_j^p$  – расчетный при  $t^{HP}$  часовой расход теплоносителя у  $j$ -го потребителя, т/ч;

$g_{j,f}$  – часовой расход теплоносителя у  $j$ -го потребителя при отказе  $f$ -го элемента, т/ч;

$\tau_1^p$  и  $\tau_2^p$  – расчетные (при  $t^{HP}$ ) температуры воды в подающей и обратной магистралях ТС, °С.

Результаты расчета ПН теплоснабжения потребителей, а также среднего суммарного недоотпуска теплоты каждому потребителю за отопительный период приведены в таблице 3.

Сопоставление полученных значений показателей надежности с нормативными значениями показывает, что показатель надежности (ПН) теплоснабжения всех потребителей существенно выше нормативных значений (рисунки 1 и 2).

Таблица 3 – Показатели надежности теплоснабжения потребителей

№ потреби- теля	Нагрузка отопления, $q_j^p$	$\beta_j$ ,	$t_{jmin}^p$ ,	$P_j$	$K_j$	Средний суммарный недоотпуск теплоты за отопительный период, $Q_j^-$
$j$	Гкал/ч	ч	°С	-	-	Гкал
1-5	0,2	77	12	0,90	0,998	9,75
2-6	0,2	77	12	0,89	0,998	6,97
3	0,2	77	12	0,89	0,997	3,51
7-4	0,2	77	12	0,89	0,997	3,79

Продолжение аблицы 3 – Показатели надежности теплоснабжения потребителей

№ потреби- теля	Нагрузка отопления, $q_j^p$	$\beta_j$ ,	$t_{j_{min}}^B$ ,	$P_j$	$K_j$	Средний суммарный недоотпуск теплоты за отопительный период, $Q_j^-$
9-10	0,2	77	12	0,89	0,997	4,85
12-13	0,2	77	12	0,76	0,997	7,90
14	0,2	77	12	0,77	0,997	3,07
11-15	0,2	77	12	0,77	0,997	7,29
8	0,2	77	12	0,78	0,997	3,33
16	0,2	77	12	0,79	0,997	3,24
17	0,2	77	12	0,80	0,997	3,73
18-19	0,2	77	12	0,81	0,997	11,46
20-21	0,2	77	12	0,82	0,998	8,58
22	0,2	77	12	0,83	0,998	2,77
23-24	0,2	77	12	0,93	0,999	6,08

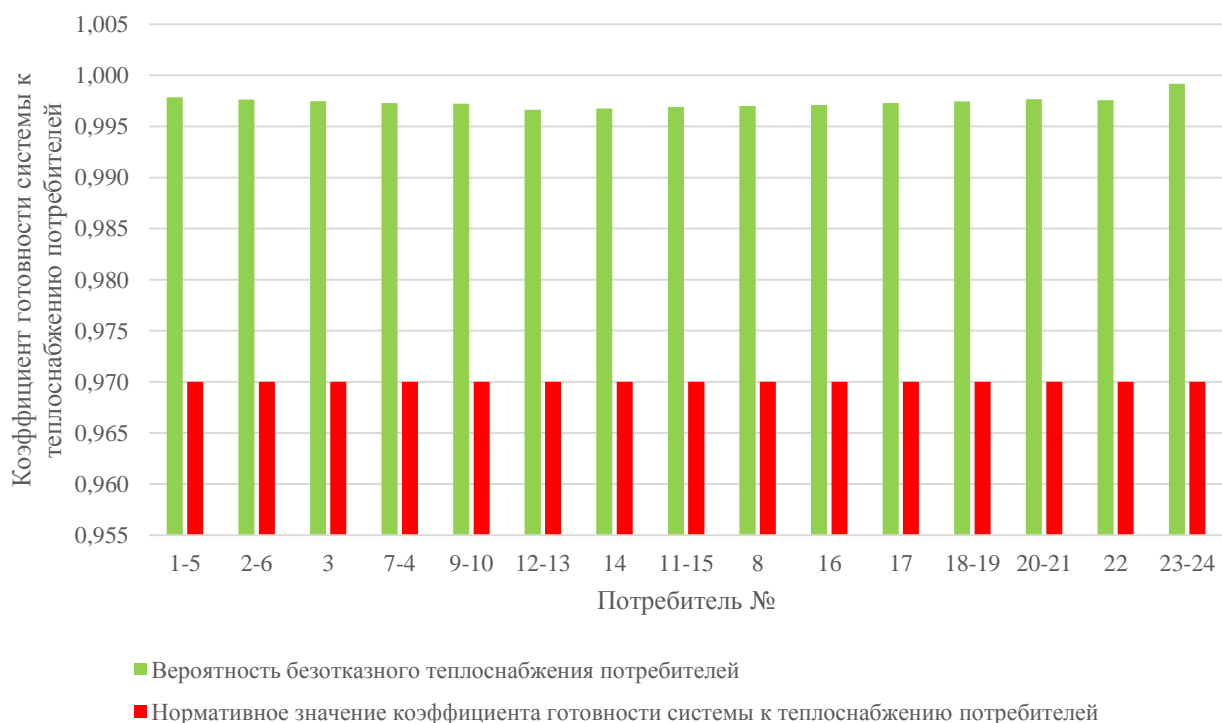


Рисунок 1 – Сопоставление коэффициентов готовности  $K_j$  с нормативным значением





Рисунок 2 – Сопоставление вероятностей  $P_j$  с нормативным значением

Таким образом, надежность теплоснабжения потребителей в рассматриваемой ТС обеспечиваются, как для расчетного, так и для пониженного уровня теплоснабжения.

Средний суммарный недоотпуск теплоты каждому потребителю за отопительный период определяется в соответствии с (9) при следующих исходных данных:

- расчетный при  $t^{HP}$  часовой расход теплоносителя у  $j$ -го потребителя:  
 $g_j^p = 4,5$  т/ч;
- расчетная (при  $t^{HP}$ ) температура воды в подающей магистрали ТС:  
 $\tau_1^p = 125$  °С;
- расчетная (при  $t^{HP}$ ) температура воды в обратной магистрали ТС:  
 $\tau_2^p = 70$  °С;
- часовой расход теплоносителя у  $j$ -го потребителя при отказе  $f$ -го элемента  $g_{j,f}$  – в соответствии с результатами моделирования послеаварийных гидравличе-

ских режимов (таблица А.4 приложения А). Результаты расчета приведены в таблице А.4 приложения А и на рисунке 3.

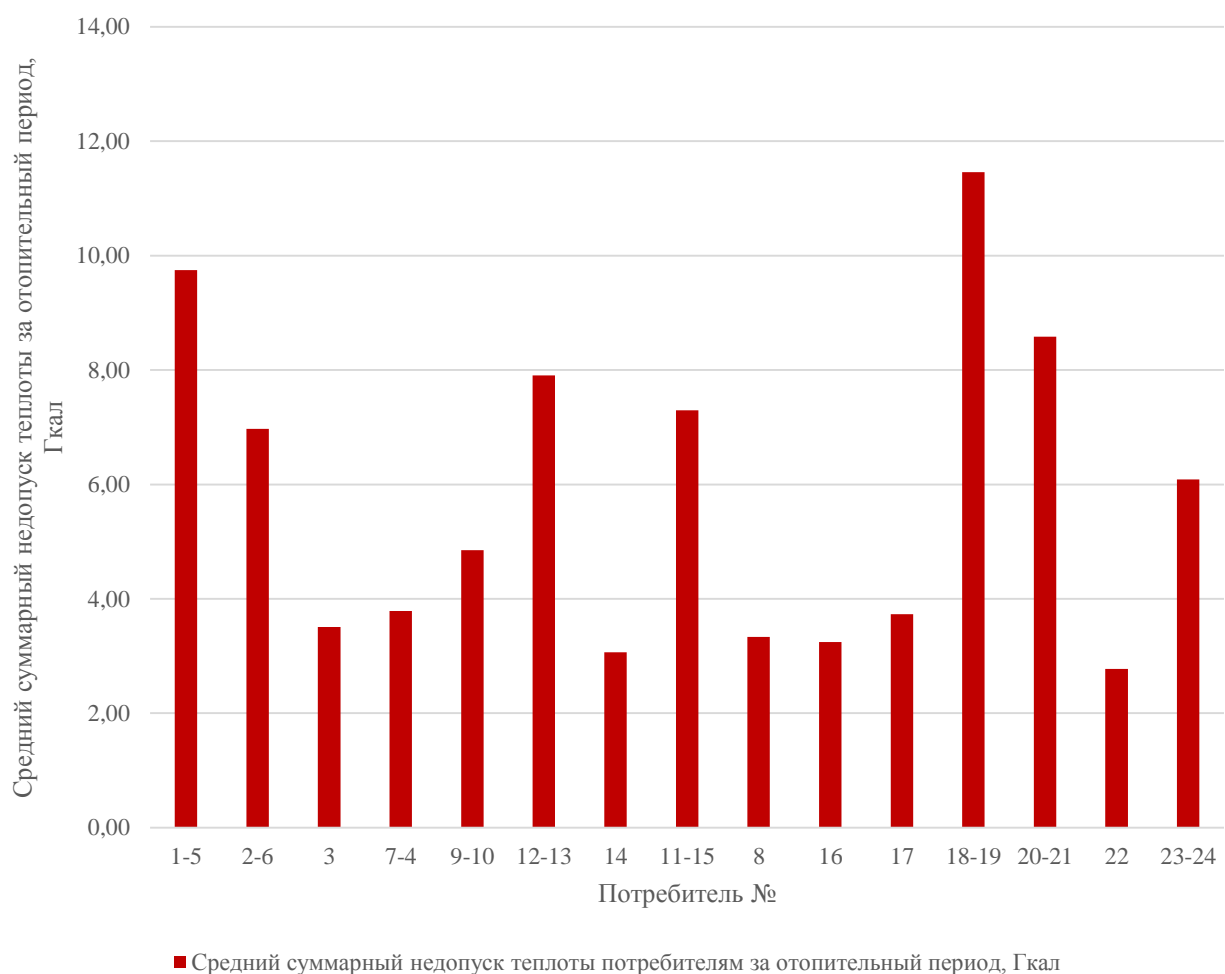


Рисунок 3 – Средний суммарный недоотпуск теплоты потребителям за отопительный период

### Список использованных источников

1 Сеннова, Е.В. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справочное издание в 4 т. под ред. акад. Ю.Н. Руденко. Т. 4. Надежность систем теплоснабжения / Е.В. Сеннова, А.В. Смирнов, А.А. Ионин и др. – Новосибирск: Наука, 2000. – 351 с. – ISBN 5-247-03375-2.

2 Методические рекомендации по разработке схем теплоснабжения [Электронный ресурс].: совместный приказ Министерства энергетики РФ и Мини-

стерства регионального развития РФ от 29.12.2012 № 565/667 // Гарант : Информационно-правовой портал / Гарант, – Режим доступа : <http://www.garant.ru>. – 02.10.2018.

3 Беляев, Ю.К. Надежность технических систем: Справочник под ред. И.А. Ушакова. Надежность технических систем / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др. – Москва: Радио и связь, 1985. – 608 с.

4 СП 124.13330.2012 Тепловые сети (актуализированная редакция СНиП 41-02-2003). – Введ. 01.01.2013. – Москва, 2013. – 78 с.

5 МДС 41-6.2000 «Организационно-методические рекомендации по подготовке к проведению отопительного периода и повышению надежности систем коммунального теплоснабжения в городах и населенных пунктах РФ [Электронный ресурс].: Утверждены приказом Госстроя России от 06.09.2000 № 203 // Гарант : Информационно-правовой портал / Гарант, – Режим доступа : <http://www.garant.ru>. – 02.10.2018.

6 Об утверждении СанПиН 2.1.2.2645-10 [Электронный ресурс].: Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27.12.2010 № 175 // Гарант : Информационно-правовой портал / Гарант, – Режим доступа : <http://www.garant.ru>. – 03.10.2018.

7 СП 131.13330.2012. Строительная климатология (актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*). – Взамен СНиП 23-01-99\*; Введ. 01.01.2012. – Москва, 2012. – 111 с.

**Приложение А**  
**(обязательное)**

**Интенсивность отказов тепловой сети**

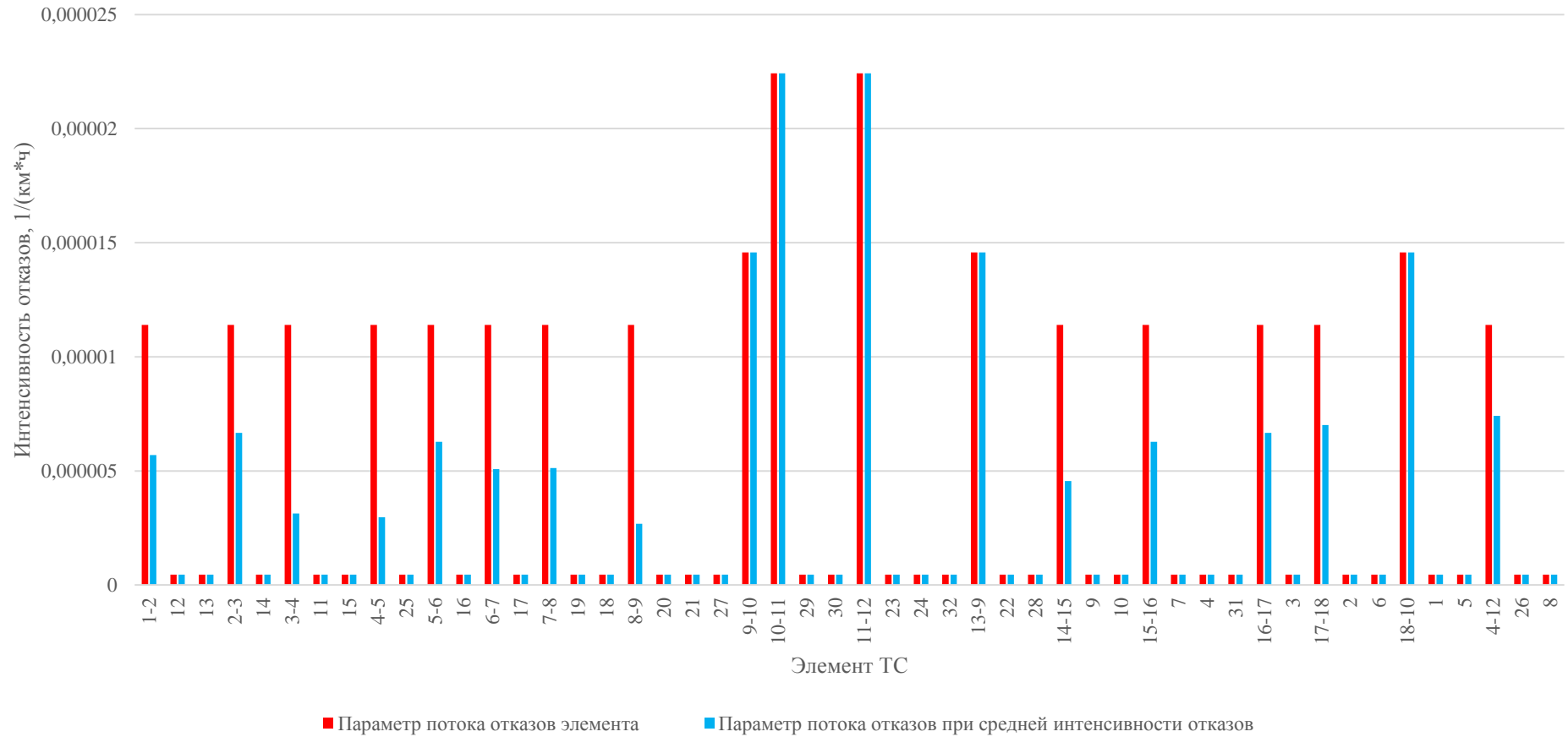


Рисунок А.1 – Интенсивность отказов элементов тепловой сети

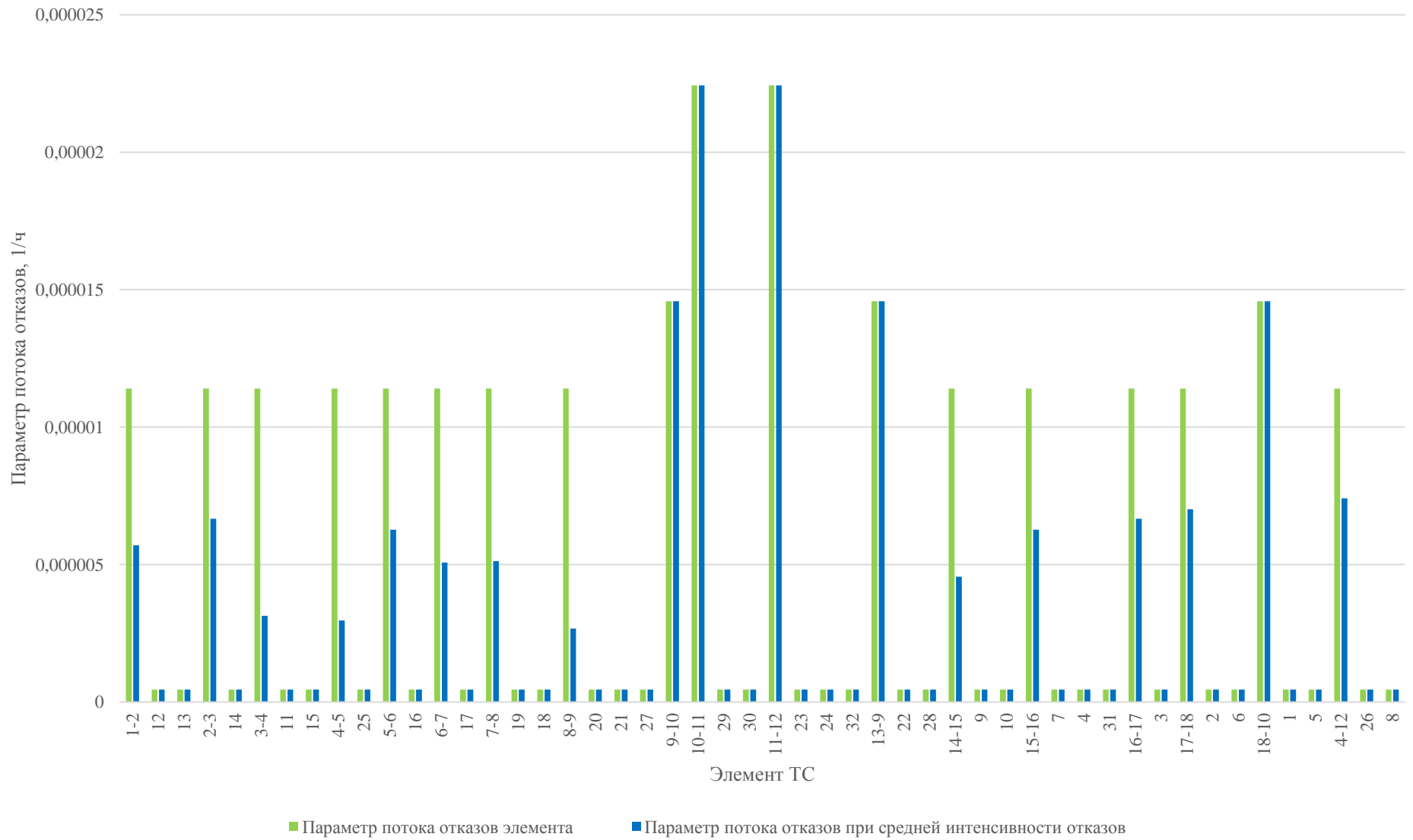


Рисунок А.2 – Параметр потока отказов элементов тепловой сети

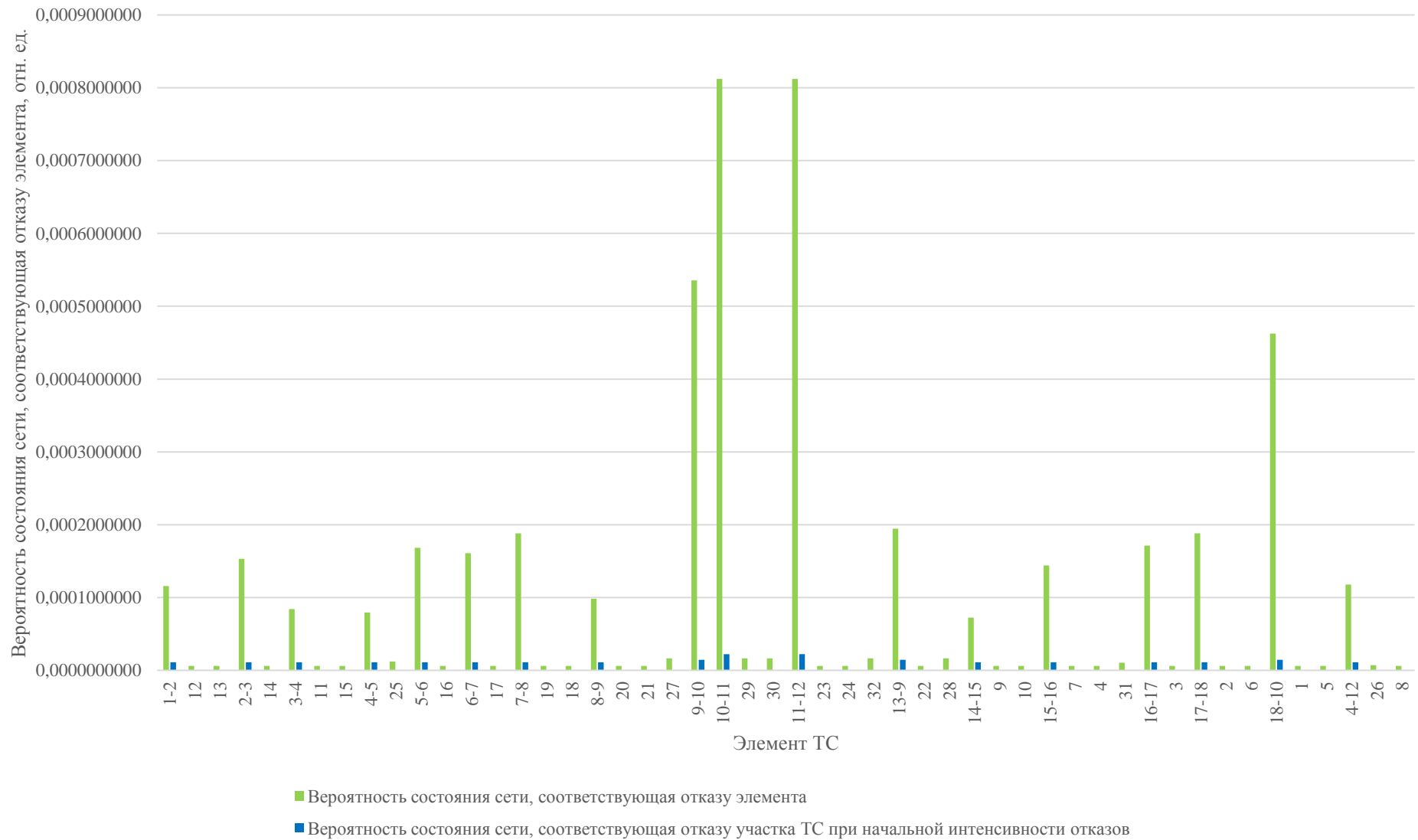


Рисунок А.3 – Вероятности состояния тепловой сети, соответствующие отказам ее элементов

Таблица А.1 – Интенсивность отказов элементов тепловой сети

№ элемента или участка	Длина участка	$d_{вн}$	$\tau_{\text{экспл}}$	$\lambda$	$\omega$	$z^B$	$\mu$	Вероятность состояния ТС с отказом элемента $f$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$	м	м	лет	1/(км·ч)	1/ч	ч	1/ч	$P_f$
1-2	500	400	5	0,0000114	0,0000057	20,44	0,05	0,0001159610
12	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
13	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
2-3	585	450	5	0,0000114	0,0000067	23,10	0,04	0,0001533368
14	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
3-4	275	600	5	0,0000114	0,0000031	26,98	0,04	0,0000841695
11	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
15	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
4-5	260	600	10	0,0000114	0,0000030	26,98	0,04	0,0000795784
25	-	600	10	0,000000456	0,000000456	26,98	0,04	0,0000122428
5-6	550	600	10	0,0000114	0,0000063	26,98	0,04	0,0001683390
16	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
6-7	445	700	10	0,0000114	0,0000051	31,87	0,03	0,0001608888
17	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
7-8	450	800	10	0,0000114	0,0000051	36,90	0,03	0,0001883870
19	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
18	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
8-9	235	800	10	0,0000114	0,0000027	36,90	0,03	0,0000983799
20	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
21	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
27	-	800	15	0,000000456	0,000000456	36,90	0,03	0,0000167455
9-10	550	800	20	1,45804E-05	1,45804E-05	36,90	0,03	0,0005354317
10-11	225	1000	25	2,24282E-05	2,24282E-05	36,38	0,03	0,0008120816
29	-	800	25	0,000000456	0,000000456	36,90	0,03	0,0000167455

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
30	-	1000	25	0,000000456	0,000000456	36,38	0,03	0,0000165109
11-12	1655	1000	25	2,24282E-05	2,24282E-05	36,38	0,03	0,0008120816
23	-	250	25	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
24	-	250	25	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
32	-	1000	25	0,000000456	0,000000456	36,38	0,03	0,0000165109
13-9	355	250	20	1,45804E-05	1,45804E-05	13,40	0,07	0,0001945062
22	-	250	20	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
28	-	800	20	0,000000456	0,000000456	36,90	0,03	0,0000167455
14-15	400	300	5	0,0000114	0,0000046	15,97	0,06	0,0000724756
9	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
10	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
15-16	550	450	5	0,0000114	0,0000063	23,10	0,04	0,0001441628
7	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
4	-	250	5	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
31	-	450	5	0,000000456	0,000000456	23,10	0,04	0,0000104846
16-17	585	500	10	0,0000114	0,0000067	25,82	0,04	0,0001713969
3	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
17-18	615	600	15	0,0000114	0,0000070	26,98	0,04	0,0001882336
2	-	250	15	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
6	-	250	15	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
18-10	1000	700	20	1,45804E-05	0,0000146	31,87	0,03	0,0004624145
1	-	250	20	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
5	-	250	20	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831
4-12	650	300	10	0,0000114	0,0000074	15,97	0,06	0,0001177729
26	-	300	10	0,000000456	0,000000456	15,97	0,06	0,0000072476
8	-	250	10	0,000000456	0,000000456	13,40	0,07	0,0000060831



Таблица А.2 – Температуры наружного воздуха, при которых время восстановления  $f$ -го элемента равно временному резерву  $j$ -го потребителя

№ отказавшего эл. ТС, $f$	для потребителя, расположенного в узле № ( $j$ ), °С														
	1-5	2-6	3	7-4	9-10	12-13	14	11-15	8	16	17	18-19	20-21	22	23-24
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$K$	0,997	0,9976	0,997	0,9973	0,997	0,996	0,996	0,996	0,9970	0,997	0,9973	0,9975	0,9977	0,997	0,999
$\bar{q}_{j,f}$	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
1-2	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-14,3	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5	-24,5
12	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
13	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
2-3	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-10,9	-10,9	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1
14	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
3-4	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-7,1	-7,1	-7,1	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3
11	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
15	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
4-5	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-7,1	-7,1	-7,1	-7,1	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3
25	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-7,1	-7,1	-7,1	-7,1	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3
5-6	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-7,1	-7,1	-7,1	-7,1	-7,1	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3
16	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
6-7	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8
17	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
7-8	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-11,2	-11,2	-11,2
19	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3
18	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3

Продолжение таблицы А.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
8-9	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-11,2	-11,2
20	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3
21	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3
27	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-11,2	-11,2
9-10	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-11,2
10-11	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-11,4
29	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-11,2
30	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-11,4
11-12	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2
23	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1
24	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1
32	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2
13-9	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-40,3
22	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-40,3
28	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-11,2	-1,0	-11,2
14-15	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-22,7	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9
9	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-22,7	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
10	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
15-16	-21,1	-21,1	-21,1	-10,9	-30,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1
7	-40,3	-40,3	-40,3	-10,9	-10,9	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
4	-40,3	-40,3	-40,3	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
31	-21,1	-21,1	-21,1	-30,1	-30,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1	-21,1
16-17	-18,3	-18,3	-8,1	-10,9	-10,9	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3	-18,3
3	-40,3	-40,3	-8,1	-8,1	-8,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
17-18	-17,3	-7,1	-30,1	-30,1	-30,1	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3	-17,3
2	-40,3	-7,1	-7,1	-7,1	-7,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
6	-40,3	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3

Продолжение таблицы А.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
18-10	-3,6	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8	-13,8
1	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-3,6	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
5	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-30,1	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3
4-12	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-22,7	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9
26	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-22,7	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9	-32,9
8	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-22,7	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3	-40,3

Таблица А.3 – Продолжительности стояния температур в течение отопительного периода

№ отказав- шего эл. ТС, <i>f</i>	Продолжительности стояния $\tau_{j,f}^{pав}$ температур $t_{j,f}^{pав}$ в течение отопительного периода														
	1-5	2-6	3	7-4	9-10	12-13	14	11-15	8	16	17	18-19	20-21	22	23-24
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1-2	146	146	146	146	146	968	146	146	146	146	146	146	146	146	146
12	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2-3	340	340	340	340	340	1419	1419	340	340	340	340	340	340	340	340
14	0	0	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0
3-4	652	652	652	652	652	2018	2018	2018	652	652	652	652	652	652	652
11	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0
4-5	652	652	652	652	652	2018	2018	2018	2018	652	652	652	652	652	652
25	652	652	652	652	652	2018	2018	2018	2018	652	652	652	652	652	652
5-6	652	652	652	652	652	2018	2018	2018	2018	2018	652	652	652	652	652
16	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0
6-7	1029	1029	1029	1029	1029	2659	2659	2659	2659	2659	2659	1029	1029	1029	1029
17	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0
7-8	1370	1370	1370	1370	1370	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	1370	1370	1370
19	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
18	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
8-9	1370	1370	1370	1370	1370	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	1370	1370
20	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0
21	0	0	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0
27	1370	1370	1370	1370	1370	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	1370	1370
9-10	1370	1370	1370	1370	1370	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	1370
10-11	3198	3198	3198	3198	3198	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	1337

Продолжение таблицы А.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
29	3148	3148	3148	3148	3148	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	3198	1370
30	3198	3198	3198	3198	3198	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	1337
11-12	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148
23	3148	3148	3148	3148	3148	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
24	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
32	10	10	10	10	10	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148	3148
13-9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
28	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	1370	3198	1370
14-15	3	3	3	3	236	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
9	0	0	0	0	236	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15-16	340	340	340	1419	10	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340
7	0	0	0	1419	1419	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	340	340	340	10	10	340	340	340	340	340	340	340	340	340	340
16-17	559	559	1848	1419	1419	559	559	559	559	559	559	559	559	559	559
3	0	0	1848	1848	1848	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17-18	652	2018	10	10	10	652	652	652	652	652	652	652	652	652	652
2	0	2018	2018	2018	2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18-10	2659	10	10	10	10	1029	1029	1029	1029	1029	1029	1029	1029	1029	1029
1	2659	2659	2659	2659	2659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-12	3	3	3	3	3	3	3	3	236	3	3	3	3	3	3
26	3	3	3	3	3	3	3	3	236	3	3	3	3	3	3
8	0	0	0	0	0	0	0	0	236	0	0	0	0	0	0

Таблица А.4 – Часовой расход теплоносителя у  $j$ -го потребителя при отказе  $f$ -го элемента

№ отказав- шего эл. ТС, $f$	для потребителя, расположенного в узле $j$ , т/ч														
	1-5	2-6	3	7-4	9-10	12-13	14	11-15	8	16	17	18-19	20-21	22	23-24
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1-2	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	0,0	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
12	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	0,0	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
13	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	0,0	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6
2-3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0	0,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
14	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	0,0	0,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
3-4	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	0,0	0,0	0,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
11	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	0,0	0,0	0,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
15	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	0,0	0,0	0,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
4-5	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
25	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
5-6	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
16	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
6-7	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	6,0	6,0	6,0
17	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	6,0	6,0	6,0
7-8	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9	16,9	16,9
19	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9	16,9	16,9
18	16,9	16,9	16,9	16,9	16,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9	16,9	16,9
8-9	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9	12,9
20	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9	12,9
21	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9	12,9
27	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9	12,9
9-10	12,9	12,9	12,9	12,9	12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9
10-11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9

Продолжение таблицы А.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9
30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,9
11-12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13-9	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	0,0	4,5
22	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	0,0	4,5
28	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	0,0	4,5
14-15	7,5	7,5	7,5	7,5	0,0	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
9	7,5	7,5	7,5	7,5	0,0	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
10	7,5	7,5	7,5	7,5	0,0	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
15-16	6,1	6,1	6,1	0,0	0,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
7	6,1	6,1	6,1	0,0	0,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
4	6,1	6,1	6,1	0,0	0,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
31	6,1	6,1	6,1	0,0	0,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
16-17	5,7	5,7	0,0	0,0	0,0	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
3	5,7	5,7	0,0	0,0	0,0	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
17-18	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
2	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
6	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
18-10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6
4-12	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
26	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
8	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	0,0	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3

## Список использованных источников

1. ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения». – Взамен ГОСТ 27.002-89 ; введ. 2017–03–01.
2. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – М. : Изд-во МЭИ, 2001. – 473 с.
3. ГОСТ 28.74-82. Вода питьевая. – Госстандарт, 1982 (СанПин 2.1.4.107-49-01).
4. Шубин Е. П. Основные вопросы проектирования систем теплоснабжения городов / Е. П. Шубин. – М. : Энергия, 1979.
5. СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий. – М. : Госстрой РФ, 1997.
6. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. – М.: Госстандарт, 1984.
7. Хасимов В. Я. Вопросы методики расчета надежности и резервирования трубопроводных систем / В. Я. Хасимов, В. С Маренков. – М. : АН ССР, 1973.
8. Иосилевич Г. Б. Детали машин / Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1988. – 367 с.
9. Поливода Ф. А. Надежность систем теплоснабжения городов и предприятий легкой промышленности / Ф. А. Поливода. – М. : ИНФРА-М, 2017. – 170 с.
10. Поливода Ф. А. Оптимизация КПД системы теплоснабжения / Ф. А. Поливода // Промышленная энергетика. – 2009. – № 5. – С. 31–38.
11. Поливода Ф. А. КПД теплосети на примере трубопроводов с ППУ-изоляцией / Ф. А. Поливода // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 11. – С. 43–46.
12. Маргулова Т. Х. Применение комплексонов в теплоэнергетике / Т. Х. Маргулова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 213 с.
13. Концепция автономного городского района энергоснабжения с системой распределенной электрогенерации на базе низкопотенциальных установок и гидротурбин / Ф. А. Поливода [и др.] // Промышленная энергетика. – 2013. – № 7. – С. 5–8.
14. СТО 02069024. 101-2015 Работы студенческие : Общие требования и правила оформления. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 85 с.



15. СНиП 2.04.05-91\*. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: ГУП ЦПП, 2003.

16. Брух С. В. Вероятностный метод выбора расчетной температуры внутреннего воздуха при проектировании многозональных систем кондиционирования / С. В. Брух // Арктический СНиП. – 2003. – № 1.

17. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности.

18. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.