Планирование замены участков тепловых сетей

Кирюхин С.Н. - к.т.н., зав. лабораторией ОАО «Газпром промгаз»
Сеннова Е.В. - д.т.н., главный специалист ЗАО «ЛОРЕС»
Шиманская А.О. - к.т.н., доцент кафедры ДТУ, ВИ(ИТ) ВАМТО им. Хрулева

В настоящее время планирование замены участков тепловых сетей, выработавших эксплуатационный ресурс, выполняется в зависимости от продолжительности эксплуатации. Однако, в условиях постоянной модернизации конструкции элементов тепловых сетей, использования новых материалов и технологий изготовления, их технические характеристики и, в частности, показатели надежности, непрерывно улучшаются. Одновременно с этим в развивающихся городских тепловых сетях количество новых элементов и участков постоянно увеличивается. Вместе с тем, как показывает статистика отказов и восстановлений участков существующих тепловых сетей (особенно их магистральных частей), условия и организация их эксплуатации осуществляется на высоком уровне, что позволяет эксплуатировать «старые» теплопроводы за пределами паспортных сроков службы. Наличие большого числа факторов, характеризующих техническое состояние участков тепловых сетей, затрудняет их учет при планировании замены теплопроводов.

Целью разработки является обеспечение эффективного планирования замены теплопроводов путем оптимального выбора (определения оптимальной очередности) подлежащих замене участков тепловой сети в условиях ограничения финансовых (и/или временных) затрат.

Математическая формулировка задачи и основные расчетные зависимости

Если принять допущение о том, что участок теплопровода n_j в один и тот же момент времени может находиться только в одном из двух возможных состояний: исправен - замена не требуется или неисправен - требуется замена, то математически, планирование замены участков тепловой сети может быть сформулировано как задача оптимального выбора, в которой переменные n_j принимают значения 0 или 1. При этом на характер целевой функции и ограничений в общем случае не накладывается никаких требований, и математическая постановка задачи оптимизации с бинарными (булевыми) переменными может быть представлена в общем виде:

$$f(n_1, n_2, \dots, n_j) \to max_{n \in \Delta_\beta}, \quad (1)$$

где

$$\Delta_\beta = \left\{ \Delta \middle| \begin{matrix} g_k(n_1, n_2, \dots, n_j) \le (=) b_k; \\ n_1, n_2, \dots, n_j \in \{0,1\}, (k \in \{1,2, \dots, m\}) \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

При таком типе переменных задача оптимального планирования становится задачей целочисленного (булева) программирования с дискретной целевой функцией. В этой постановке множество ее допустимых решений Δ_β всегда имеет конечную мощность (при условии, что мощность пустого множества равна 0), но дополнительное требование к целочисленности значений приводит к необходимости выбора метода решения.

Анализ множества допустимых решений Δ_β общей задачи (1) и (2) показывает возможность одной из двух альтернатив:

1. Система ограничений (2) противоречива или несовместна, т.е. не существует такого набора значений $n_1, n_2, \dots, n_j$, которые удовлетворяют ограничениям (2). В этом случае задача не имеет решения.

2. Система ограничений (2) не является противоречивой. В этом случае задача имеет решение, которое, в общем случае, может быть не единственным.

Аналитические методы (например, метод множителей Лагранжа) в решении задачи булева программирования не используются, поскольку дифференциал целевой функции и ее ограничений, найденный без учета требования к целочисленности значений переменных и последующим округлением до ближайшего булевого значения, даже локально не дает оптимального решения. Графические методы решения, также не используются, так как при небольшом количестве переменных (участков сети) оптимальное решение может быть найдено и простым перебором значений переменных. При большом числе переменных и ограничений используются специальные алгоритмы поиска приближенного целочисленного решения, которые позволяют находить одно или несколько локально-оптимальных решений. Но использование приближенных методов оправдано только в том случае, когда по тем или иным причинам поиск точного решения задачи булева программирования оказывается невозможным. Вместе с тем, свойство конечности множества допустимых решений Δ_β общей задачи булева программирования, является основанием для потенциально возможного полного перебора всех допустимых значений переменных с целью выбора из них оптимального решения исходной задачи (1) и (2). Однако данный метод, являясь наиболее простым в своей реали-

зации, при большом количестве переменных не гарантирует нахождения оптимального решения. В связи с этим задача булева программирования чаще всего решается алгоритмическими методами, которые учитывают специфику, особенности и конечную мощность множества допустимых решений. Из алгоритмических методов, обеспечивающих нахождение точного решения общих задач (1) и (2), традиционно используется метод ветвей и границ или метод динамического программирования.

Решение общей задачи булева программирования (1) с ограничениями (2) связано с поиском максимума целевой функции переменных $n_1, n_2, \dots, n_j \in \{0,1\}$:

$$z_1 \cdot n_1 + z_2 \cdot n_2 + \dots + z_j \cdot n_j \to max_{n \in \Delta_\beta}, \quad (3)$$

где множество допустимых решений Δ_β формируется системой ограничений типа равенств и неравенств:

$$\begin{cases} c_{i1} \cdot n_1 + c_{i2} \cdot n_2 + \dots + c_{ij} \cdot n_j = b_i \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, q\}); & (4) \\ c_{k1} \cdot n_1 + c_{k2} \cdot n_2 + \dots + c_{kj} \cdot n_j \le b_k \quad (\forall k \in \{q+1, \dots, m\}). & (5) \end{cases}$$

Постоянные величины z_i, c_{ki}, b_k $(\forall i \in \{1, 2, \dots, q\}, \forall k \in \{1, 2, \dots, m\})$ в общем случае могут принимать произвольные значения, а в частном - являются параметрами, характеризующими как техническое состояние участков тепловой сети, так и любые другие технические, экономические, временные или социально – значимые параметры функционирования тепловой сети. В случае отсутствия ограничений типа равенств (4) (т.е. при q = 0), задача оптимального планирования становится задачей с ограничениями типа неравенств. В случае отсутствия ограничений типа неравенств (5) (т.е. при $q = m$), задача становится задачей с ограничениями типа равенств. Посредством введения дополнительных булевых переменных одна из этих задач может быть преобразована в другую.

Если в качестве постоянных величин целевой функции (3) использовать нормированную суммарную относительную оценку $\bar{Z}_j$ вклада технического состояния j-го участка в техническое состояние тепловой сети в целом, а в качестве постоянных величин C_j ограничений (4, 5) финансовые (и/или временные) затраты, тогда целевая функция (3) примет вид:

$$f(n) = \sum_{j=1}^{J} \bar{Z}_j \cdot n_j \to max_{n \in \Delta_\beta}, \quad (6)$$

с ограничением:

$$\sum_{j=1}^{J} C_j \cdot n_j \leq C_\Sigma. \quad (7)$$

Здесь n_j – переменная выбора теплопровода для замены, $n_1, n_2, \dots, n_j \in \{0,1\}$;

$\bar{Z}_j$ - нормированная суммарная относительная оценка вклада технического состояния j-го участка в техническое состояние тепловой сети в целом, от. ед.;

C_j – стоимость работ по замене $\boldsymbol{j}$-го участка, руб.;

C_Σ – сумма, выделяемая на выполнение работ по замене всех участков, руб.

В ограничении (7) стоимость работ по замене участков тепловой сети C_j определяется либо по сметным нормативам, установленным Приказом Минрегионразвития № 643 от 30.12.2011 г., либо по укрупненным нормативам стоимости строительства и реконструкции тепловых сетей, принятых в теплоснабжающей организации, либо по результатам оценки проектов-аналогов.

Сумма, выделяемая на выполнение работ по замене всех участков C_Σ, задается исходя из принятых в теплоснабжающей организации инвестиционных программ развития или других документов, регламентирующих выполнение работ по плановым заменам теплопроводов. Значения этих расчетных величин, могут определяться по материальным характеристикам теплопроводов и уточняться (изменяться) в ходе решения задачи.

Нормированная суммарная относительная оценка $\bar{Z}_j$ вклада технического состояния участка, характеризует техническое состояние j-го участка относительно технического состояния тепловой сети в целом и определяется как:

$$\bar{Z}_j = \frac{\bar{p}_j^d}{\sum_{j=1}^{J} \bar{p}_j^d}, \text{ от. ед.} \quad (8)$$

где $\bar{p}_j^d$ - суммарная относительная оценка технического состояния j-го участка тепловой сети:

$$\bar{p}_j^d = w_{jn_{d_j}}^d \cdot \sum_{i=1}^{I} p_{ij} \cdot w_{ij}, \text{от. ед.} \quad (9)$$

где p_{ij} – относительная оценка значения i-го технологического параметра, характеризующего техническое состояние j-го участка, от. ед.;

w_{ij} – вес i-го технологического параметра в оценке технического состояния j-го участка, от. ед.;

$w^{d}_{jn_{d_j}}$ – приоритет замены j-го участка диаметром d группы диаметров n_{dj}, от. ед.

Суммарная относительная оценка технического состояния j-го участка тепловой сети $\bar{p}^{d}_{j}$ является аддитивной сверткой значений относительных оценок группы технологических параметров p_{ij}, наиболее вероятно характеризующих такое технического состояние участка, при котором требуется его замена. Относительные оценки технологических параметров p_{ij} в этом случае могут рассматриваться как байесовские оценки частоты повторения значения параметра в вероятном (допустимом) диапазоне значений. Состав технологических параметров и их значимость (вес) в общем объеме информации о техническом состоянии участка, устанавливается по результатам анализа статистики отказов и восстановлений этого участка с учетом результатов диагностических обследований, выполняемых в процессе эксплуатации тепловой сети. По многочисленным данным теплоснабжающих и научно-исследовательских организаций [3, 8, 9, 13] установлено, что при оценке технического состояния теплопровода и положения участка в структуре тепловой сети, наиболее информативными параметрами являются:

- интенсивность (удельное количество) отказов;
- среднее время восстановления;
- продолжительность (период) эксплуатации;
- расход теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования;
- отключаемая при отказе участка суммарная тепловая мощность нагрузки.

Первые три параметра характеризуют надежность теплопроводов, как элементов тепловой сети. Четвертый и пятый характеризуют положение участка в структуре тепловой сети. Если каждому параметру присвоить соответствующую переменную, тогда относительные оценки их значений p_{ij} примут вид, указанный в таблице 1.

Таблица 1 – Переменные относительных оценок значений технологических параметров

Относительная оценка p_{ij}	Параметр	Переменная параметра	Единицы измерения параметра	Переменная относительной оценки
p_{1j}	Удельное количество отказов	λ_{1j}	(км · год) $^{-1}$	$\bar{\lambda}_{1j}^{d}$
p_{2j}	Среднее время восстановления	t_{2j}	ч	$\bar{t}_{2j}^{d}$
p_{3j}	Продолжительность эксплуатации теплопровода	τ_{3j}	лет	$\bar{\tau}_{3j}$
p_{4j}	Расход теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования	g_{4j}	т/ч	$\bar{g}_{4j}$
p_{5j}	Отключаемая при отказе участка суммарная тепловая мощность нагрузки	q_{5j}	Гкал/ч	$\bar{q}_{5j}$

Выражение (9) при таком составе параметров, преобразуется в форму:

$$\bar{p}_j^d = w_{jn_{d_j}}^d \cdot \left(\bar{\lambda}_{1j}^d \cdot w_{1j} + \bar{t}_{2j}^d \cdot w_{2j} + \bar{\tau}_{3j} \cdot w_{3j} + \bar{g}_{4j} \cdot w_{4j} + \bar{q}_{5j} \cdot w_{5j}\right), \text{ от. ед.} \qquad (10)$$

где $\bar{\lambda}_{1j}^d$ - относительная оценка интенсивности (удельного количества) отказов j-го участка d-го диаметра вычисляется относительно начального (паспортного) значения интенсивности отказов этих участков:

$$\bar{\lambda}_{1j}^d = \frac{\lambda_{1j}^d}{\lambda_{\text{доп}}^d}, \text{ от. ед.} \qquad (11)$$

λ_j^d - интенсивность отказов j-го участка тепловой сети d-го диаметра, (км · ч) $^{-1}$;

$\lambda_{\text{доп}}^d$ – начальное (допустимое, паспортное) значение интенсивности отказов теплопроводов d-го диаметра (группы диаметров), (км · ч) $^{-1}$;

$\bar{t}_{2j}^d$ - относительная оценка среднего времени восстановления j-го участка вычисляется относительно значений, нормированных СНиП 41-02-2003 [15] для теплопроводов d-го диаметра (группы диаметров):

$$\bar{t}_{2j}^d = \frac{t_{2j}^d}{T_{\text{доп}}^d}, \text{ от. ед.} \qquad (12)$$

t_j^d - среднее время восстановления j-го участка тепловой сети d-го диаметра (группы диаметров), час;

$T_{\text{доп}}^d$ - нормированное значение среднего времени восстановления теплопроводов d-го диаметра (группы диаметров), час;

$\bar{\tau}_{3j}$ - относительная оценка продолжительности эксплуатации j-го участка вычисляется относительно его паспортного срока службы:

$$\bar{\tau}_{3j} = \frac{\tau_{3j}}{T_j^{CC}}, \text{ от. ед.} \qquad (13)$$

τ_j - продолжительность эксплуатации j-го участка тепловой сети, лет;

T_j^{CC} - паспортный срок службы j-го участка тепловой сети, лет;

$\bar{g}_{4j}$ - относительная оценка расхода теплоносителя через j-й участок вычисляется относительно суммарного расхода теплоносителя в тепловой сети в расчетном режиме ее функционирования:

$$\bar{g}_{4j} = \frac{g_{4j}}{G_{\text{ТС}}}, \text{ от. ед.} \quad (14)$$

g_j - расход теплоносителя через j-й участок тепловой сети в расчетном режиме ее функционирования, т/ч;

$G_{\text{ТС}}$ - суммарный расход теплоносителя в тепловой сети при расчетном режиме ее функционирования, т/ч;

$\bar{q}_{5j}$ - относительная оценка отключаемой при отказах j-го участка суммарной тепловой мощности нагрузки вычисляется относительно суммарной тепловой мощности нагрузки сети в целом:

$$\bar{q}_{5j} = \frac{\sum q_{5j}}{Q_{\text{ТС}}}, \text{ от. ед.} \quad (15)$$

$\sum q_{5j}$ - суммарная тепловая мощность нагрузки, отключаемая при отказах j-го участка, Гкал/ч;

$Q_{\text{ТС}}$ - суммарная тепловая мощность нагрузки сети в целом, Гкал/ч.

В качестве исходных данных при планировании замены участков тепловой сети используются:

- результаты диагностических обследований теплопроводов;
- статистические данные об отказах и восстановлениях участков тепловой сети;
- результаты расчета показателей надежности, характеризующих техническое состояние участков тепловой сети;
- данные бухгалтерского учета теплоснабжающей организации.

Вес (значимость) w_{ij} каждого i-го параметра в общем объеме технологической информации о состоянии j-го участка тепловой сети может определяться различными способами в зависимости от полноты и качества исходных данных.

Наиболее достоверно состав параметров, характеризующих техническое состояние участков и их вес, может быть определен по результатам анализа статистики отказов и восстановлений участков тепловой сети с учетом результатов диагностических обследований, выполняемых в процессе эксплуатации. Так, напри-

мер, значение коэффициента парной корреляции r_{ij} характеризует статистическую связь значения i-го параметра с состоянием j-го участка тепловой сети, при котором требуется замена. Значения r_{ij}, приближающиеся к 1, характеризуют наиболее вероятную связь. При значениях r_{ij} близких или равных нулю, статистическая связь отсутствует. Значения r_{ij}, приближающиеся к -1, характеризуют наиболее вероятную обратно пропорциональную связь. Если значения r_{ij}, принадлежащие диапазонам $r_i \in$ (-1...-0,5; 0,5…1) принять за условную границу наличия такой связи, тогда вес параметра w_{ij}, может быть определен путем нормирования значения r_{ij} по сумме модулей $\sum|r_{ij}|$:

$$w_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum|r_{ij}|}, \text{ от. ед.} \quad (16)$$

Пример определения значения веса i-го параметра по значениям r_{ij} приведен в таблице 2.

Таблица 2 - Пример определения значения веса параметра w_{ij} по результатам анализа статистики отказов и восстановлений участков тепловой сети

Параметр	Переменная	Коэффициент корреляции (по результатам статистического анализа)	Вес параметра
	i	r_{ij}	$w_{ij} = r_{ij} / \sum \|r_{ij}\|$
Удельное количество отказов	λ_{1j}	0,8	0.24
Среднее время восстановления	t_{2j}	-0,68	0.21
Продолжительность эксплуатации теплопровода	τ_{3j}	0,71	0.22
Расход теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования	g_{4j}	0,6	0.18
Отключаемая при отказе участка суммарная тепловая мощность нагрузки	q_{5j}	0,5	0.15
Сумма модулей	$\sum \|r_{ij}\|$	3,29	1

Если при определении веса параметра (или относительной оценки его значений) w_{ij} исходных данных для статистического анализа недостаточно или данные отсутствуют вовсе, то состав параметров задается из тех, которые есть в наличии и предположительно наиболее значимы, а их вес (в общем объеме информации) принимается одинаковым (т.е. равнозначным). Пример определения веса параметра w_{ij} для этого случая приведен в таблице 3.

Таблица 3 - Пример определения значения веса параметра w_{ij} в общем объеме технологической информации при отсутствии исходных данных для статистического анализа

Параметр	Переменная	Коэффициент корреляции (по результатам статистического анализа)	Вес параметра
	i	r_{ij}	$w_{ij} = 1 / K_i$*
Удельное количество отказов	λ_{1j}	-	0.2
Среднее время восстановления	t_{2j}	-	0.2
Продолжительность эксплуатации теплопровода	τ_{3j}	-	0.2
Расход теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования	g_{4j}	-	0.2
Отключаемая при отказе участка суммарная тепловая мощность нагрузки	q_{5j}	-	0.2
Сумма модулей	$\sum \lvert r_{ij} \rvert$	-	1

* K_i – количество используемых параметров

Альтернативным предыдущему способу определения веса параметра w_{ij} в общем объеме технологической информации, является способ, в котором используется метод экспертных оценок или метод анализа иерархий. В ходе реализации этих методов группой экспертов (или лицом, принимающим решение) каждому технологическому параметру вес назначается, исходя из опыта и квалификации каждого эксперта (или лица, принимающего решение) [10]. Пример определения веса параметра w_{ij} для этого случая приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Пример определения значения веса параметра w_{ij} в общем объеме технологической информации методом экспертных оценок

Параметр	Переменная	Коэффициент корреляции (по результатам статистического анализа)	Вес параметра
	i	r_{ij}	$\sum w_{ij} = 1$
Удельное количество отказов	λ_{1j}	-	0.3
Среднее время восстановления	t_{2j}	-	0.1
Продолжительность эксплуатации теплопровода	τ_{3j}	-	0.15
Расход теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования	g_{4j}	-	0.3
Отключаемая при отказе участка суммарная тепловая мощность нагрузки	q_{5j}	-	0.15
Сумма модулей	$\sum \lvert r_{ij} \rvert$	-	1

Теплопроводы различных диаметров, в силу специфики их производства и изготовления, имеют различные показатели элементной надежности, и, как следствие, различную статистику отказов и восстановлений. По результатам ее анализа установлено, что теплопроводы диаметром 300 мм и менее могут отказывать на порядок чаще, чем теплопроводы, диаметром более 300 мм [13]. Поэтому в первую очередь определяется последовательность замены теплопроводов одинакового диаметра (т.е. в одной группе диаметров).

Теплопроводы различных диаметров, в силу специфики их положения в структуре тепловой сети, вносят различный вклад в обеспечение надежности сети в целом. Известно, что отказы теплопроводов распределительных и магистраль-

ных сетей влекут за собой ущербы и последствия различного объема и качества. Поэтому определение последовательности замены теплопроводов всех диаметров (групп диаметров) с учетом технологических и социальных приоритетов замены теплопроводов магистральной части сетей, выполняется во вторую очередь.

Технологический и социальный приоритет замены теплопроводов разных диаметров (групп диаметров) в тепловой сети $w_{jn_{d_j}}^{d}$ определяется простым отношением: чем больше диаметр теплопровода – тем выше его приоритет при замене, который рассчитывается путем нормирования номера группы диаметров n_{d_j} количеством этих групп $K_{n_{d_j}}$:

$$w_{jn_{d_j}}^{d} = \frac{n_{d_j}}{K_{n_{d_j}}}, \text{ от. ед.} \qquad (17)$$

Пример определения значений $w_{jn_{d_j}}^{d}$ теплопроводов различных групп диаметров приведен в таблице 5.

Таблица 5 - Пример определения значений приоритета замены теплопроводов различных диаметров (групп диаметров)

Диаметр теплопровода	Номер группы диаметров	Приоритет замены группы
d_j, мм	n_{dj}	$w_{jn_{d_j}}^{d} = n_{d_j} / K_{n_{d_j}}$
80	1	0.09
100	2	0.18
200	3	0.27
300	4	0.36
400	5	0.45
500	6	0.55
600	7	0.64
700	8	0.73
800	9	0.82
900	10	0.91
1000	11	1
	Всего групп: $K_{n_{d_j}} = 11$	

В приведенном примере наиболее высокий приоритет замены $w_{jn_{d_j}}^{d}$ имеют теплопроводы диаметром 1000 мм ($w_j^{11} = 1$).

Алгоритм планирования замены участков тепловой сети представлен на рисунке 1.

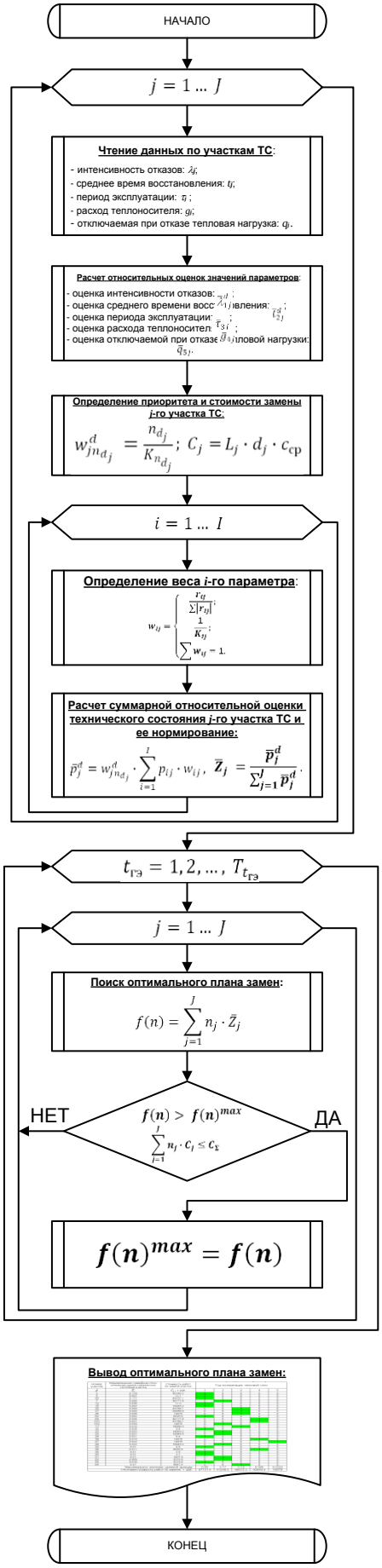


Рисунок 1. Алгоритм планирования замены теплопроводов

Пример планирования замены участков резервированной тепловой сети котельной, мощностью 4,8 Гкал/ч

Источником теплоты является районная котельная с присоединенной тепловой нагрузкой 4,8 Гкал/ч. Расчетная температура наружного воздуха: $t^{\text{нр}} = -30$ °С (г. Нижний Новгород). Продолжительность отопительного периода: $\tau^{\text{от}}$ = 5232 ч = 218 суток = 0,597 года. Средняя температура отопительного периода: $t^{\text{н ср}}$ =–4,7°С. Тепловая энергия подается потребителям по двухтрубным водяным тепловым сетям, проложенным преимущественно в непроходных каналах. Тепловая сеть резервированная с кольцами. Характеристики участков тепловой сети приведены в таблице 6. Схема тепловых сетей, приведенная на рисунке 2, включает один источник теплоснабжения, 29 участков, 14 тепловых камер, 7 задвижек и 6 потребителей: 31, 35, 37, 41, 61, 63. Общая длина сети 12,2 км. Суммарный расход теплоносителя в тепловой сети при расчетном режиме ее функционирования $G_{\text{ТС}}$ = 60 т/ч. Суммарная тепловая мощность нагрузки $Q_{\text{ТС}}$ = 4,8 Гкал/ч. Диаметр головного участка 300 мм, длина 500,2 м. Наиболее удаленным от источника теплоснабжения является потребитель в узле 35 (6,9 км).

В примере не используются результаты диагностических обследований участков тепловой сети. Поэтому состав параметров, характеризующих техническое состояние и их вес w_{ij} в общем объеме технологической информации, принят по данным таблицы 3.

Результаты планирования замены участков резервированной тепловой сети котельной, мощностью 4,8 Гкал/ч

1. Расчет относительных оценок значений параметров.

1.1. Значения относительных оценок интенсивности отказов участков диаметром 300 мм вычисляются по формуле (11) при допустимом (паспортном) удельном количество отказов $\lambda_{\text{доп}}^{300} = 1.14 \cdot 10^{-5}, \frac{1}{\text{км} \cdot \text{ч}}$:

$$\bar{\lambda}_{1\,3}^{300} = \frac{\lambda_{1\,3}^{300}}{\lambda_{\text{доп}}^{300}} = \frac{2.26 \cdot 10^{-5}}{1.14 \cdot 10^{-5}} = 1{,}98\,;$$

$$\bar{\lambda}_{1\,5}^{300} = \frac{\lambda_{1\,5}^{300}}{\lambda_{\text{доп}}^{300}} = \frac{1.14 \cdot 10^{-5}}{1.14 \cdot 10^{-5}} = 1\,;$$

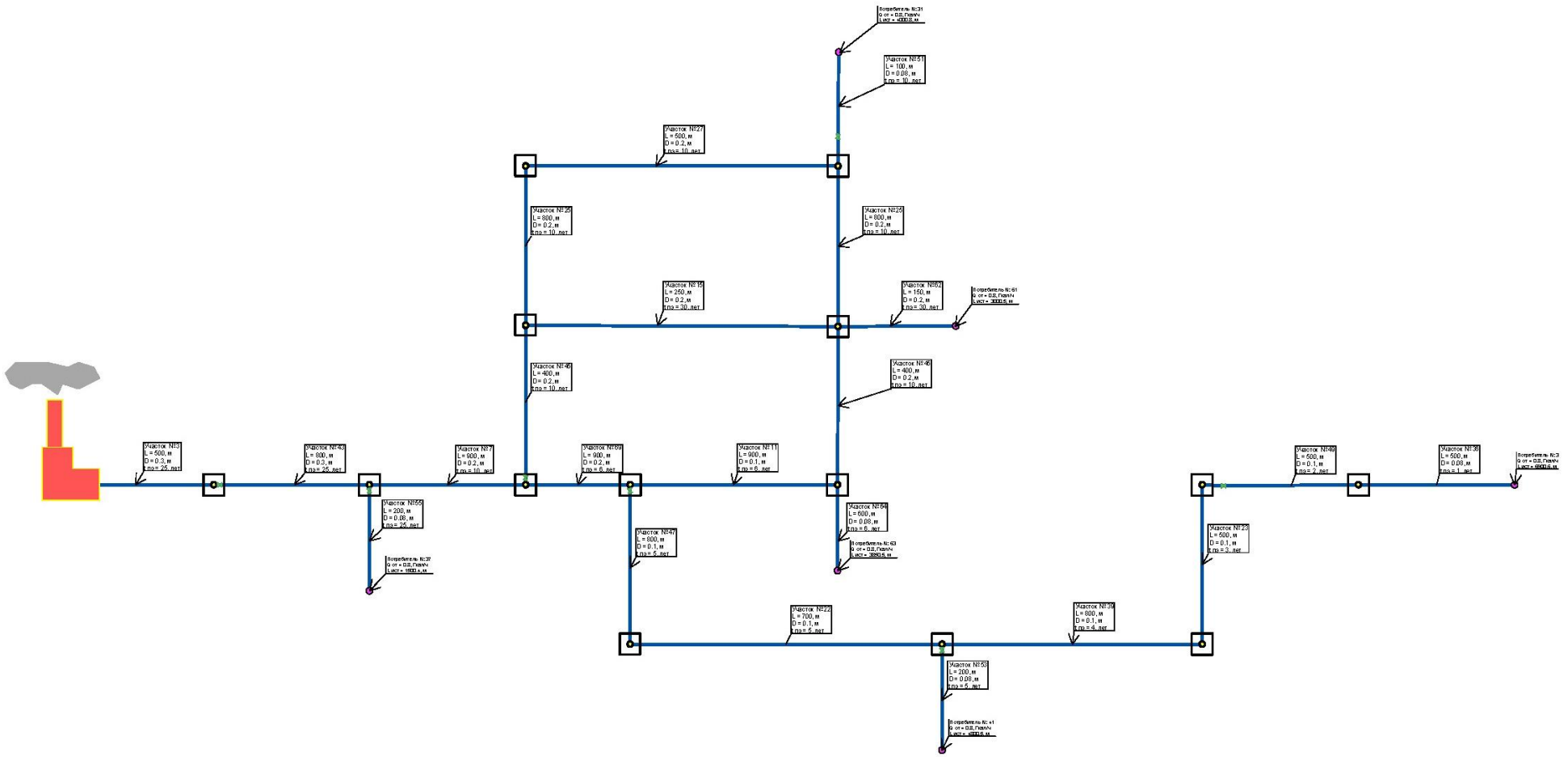


Рисунок 2. Схема системы теплоснабжения котельной, мощностью 4,8 Гкал/ч

Таблица 6 – Характеристики участков тепловой сети котельной, мощностью 4,8 Гкал/ч

Уча-сток	Длина участка	Диаметр теплопровода	Вид прокладки участка тепловой сети	Расход теплоносителя	Период эксплуатации	Интенсивность отказов	Поток отказов	Вероятность отказа	Время восстановления	Интенсивность восстановления
j	м	м	-	т/ч	лет	1/(км*ч)	1/ч	-	ч	1/ч
3	500	0.3	Подземная бесканальная	60.00	25	2.26E-05	1.13E-05	1.87E-04	16.61	0.06
5	0.2	0.3	Подземная бесканальная	60.00	10	1.14E-05	0	0	15.97	0.06
7	900	0.2	Подземная бесканальная	50.00	10	1.14E-05	1.03E-05	1.12E-04	10.94	0.09
11	900	0.1	Подземная бесканальная	1.24	6	1.14E-05	1.03E-05	6.60E-05	6.44	0.16
13	0.28	0.2	Подземная бесканальная	28.76	10	1.14E-05	0	0	10.94	0.09
15	250	0.2	Подземная бесканальная	20.01	30	2.26E-05	5.60E-06	6.16E-05	10.94	0.09
20	0.17	0.1	Подземная бесканальная	20.00	10	1.14E-05	0	0	6.41	0.16
22	700	0.1	Подземная бесканальная	20.00	5	1.14E-05	8.00E-06	5.10E-05	6.41	0.16
23	500	0.1	Подземная бесканальная	10.00	3	1.45E-05	7.30E-06	4.64E-05	6.41	0.16
25	800	0.2	Подземная бесканальная	8.75	10	1.14E-05	9.10E-06	9.96E-05	10.94	0.09
27	500	0.2	Подземная бесканальная	8.75	10	1.14E-05	5.70E-06	6.22E-05	10.94	0.09
32	0.28	0.08	Подземная бесканальная	10.00	10	1.14E-05	0	0	5.82	0.17
34	0.22	0.1	Подземная бесканальная	10.00	10	1.14E-05	0	0	6.41	0.16
36	500	0.08	Подземная бесканальная	10.00	1	1.81E-05	9.00E-06	5.16E-05	5.72	0.17
38	0.18	0.08	Подземная бесканальная	10.00	10	1.14E-05	0	0	5.8	0.17
39	800	0.1	Подземная бесканальная	10.00	4	1.14E-05	9.10E-06	5.83E-05	6.41	0.16
42	0.17	0.08	Подземная бесканальная	10.00	10	1.14E-05	0	0	5.8	0.17
43	800	0.3	Подземная бесканальная	60.00	25	2.26E-05	1.81E-05	0.0002878	15.97	0.06
45	400	0.2	Подземная бесканальная	28.76	10	1.14E-05	4.60E-06	4.98E-05	10.94	0.09
47	800	0.1	Подземная бесканальная	20.00	5	1.14E-05	9.10E-06	5.83E-05	6.41	0.16
49	500	0.1	Подземная бесканальная	10.00	2	1.57E-05	7.90E-06	5.03E-05	6.41	0.16
51	100	0.08	Подземная бесканальная	10.00	10	1.14E-05	1.10E-06	6.60E-06	5.82	0.17
53	200	0.08	Подземная бесканальная	10.00	5	1.14E-05	2.30E-06	1.32E-05	5.8	0.17
55	200	0.08	Подземная бесканальная	10.00	25	2.26E-05	4.50E-06	2.61E-05	5.8	0.17
62	150	0.2	Подземная бесканальная	10.00	30	2.26E-05	3.40E-06	3.70E-05	10.94	0.09
64	600	0.08	Подземная бесканальная	10.00	6	1.14E-05	6.80E-06	3.89E-05	5.69	0.18
69	900	0.2	Подземная бесканальная	21.24	6	1.14E-05	1.03E-05	0.000112	10.94	0.09
101	800	0.2	Подземная бесканальная	1.25	10	1.14E-05	9.10E-06	9.96E-05	10.94	0.09
102	400	0.2	Подземная бесканальная	8.76	10	1.14E-05	4.60E-06	4.98E-05	10.94	0.09

$$\bar{\lambda}_{1\,43}^{300} = \frac{\lambda_{1\,43}^{300}}{\lambda_{\text{доп}}^{300}} = \frac{2.26 \cdot 10^{-5}}{1.14 \cdot 10^{-5}} = 1{,}98\,.$$

Результаты расчетов относительных оценок интенсивности отказов всех остальных участков тепловой сети представлены в таблице 9.

1.2. Значения относительных оценок среднего времени восстановления участков тепловой сети диаметром 300 мм вычисляются по формуле (12) при допустимом в соответствии с [15] $T_{\text{доп}}^{300} = 15$ ч:

$$\bar{t}_{2\,3}^{300} = \frac{t_{2\,3}^{300}}{T_{\text{доп}}^{300}} = \frac{16{,}61}{15} = 1{,}11;$$

$$\bar{t}_{2\,5}^{300} = \frac{t_{2\,5}^{300}}{T_{\text{доп}}^{300}} = \frac{15{,}97}{15} = 1{,}06;$$

$$\bar{t}_{2\,43}^{300} = \frac{t_{2\,43}^{300}}{T_{\text{доп}}^{300}} = \frac{15{,}97}{15} = 1{,}06.$$

Результаты расчетов относительных оценок среднего времени восстановления всех остальных участков тепловой сети представлены в таблице 9.

1.3. Значения относительных оценок продолжительности эксплуатации участков тепловой сети диаметром 300 мм вычисляются по формуле (13) в соответствии с принятым в таблице 6 паспортном сроке службы $T_j^{CC} = 25$ лет:

$$\bar{\tau}_{3\,3} = \frac{\tau_{33}}{T_3^{CC}} = \frac{25}{25} = 1;$$

$$\bar{\tau}_{3\,5} = \frac{\tau_{35}}{T_5^{CC}} = \frac{10}{25} = 0{,}4;$$

$$\bar{\tau}_{3\,43} = \frac{\tau_{3\,43}}{T_{43}^{CC}} = \frac{25}{25} = 1.$$

Результаты расчетов относительных оценок продолжительности эксплуатации всех остальных участков тепловой сети представлены в таблице 9.

1.4. Значения относительных оценок расходов теплоносителя в расчетном режиме функционирования участков тепловой сети диаметром 300 мм вычисляются по формуле (14) при суммарном расходе теплоносителя в расчетном режиме функционирования тепловой сети $G_{\text{ТС}}$ = 60 т/ч:

$$\bar{g}_{4\,3} = \frac{g_{4\,3}}{G_{\text{ТС}}} = \frac{60}{60} = 1;$$

$$\bar{g}_{4\,5} = \frac{g_{4\,5}}{G_{\text{ТС}}} = \frac{60}{60} = 1;$$

$$\bar{g}_{4\,43} = \frac{g_{4\,43}}{G_{\text{ТС}}} = \frac{60}{60} = 1.$$

Результаты расчетов относительных оценок расходов теплоносителя в расчетных режимах функционирования всех остальных участков тепловой сети представлены в таблице 9.

1.5. Значения относительных оценок отключаемой суммарной тепловой мощности нагрузки при отказах участков тепловой сети диаметром 300 мм вычисляются по формуле (15) при суммарной тепловой мощности нагрузки сети в целом $Q_{\text{ТС}}$ = 4,8 Гкал/ч:

$$\bar{q}_{5\,3} = \frac{4{,}8}{4{,}8} = 1;$$

$$\bar{q}_{5\,5} = \frac{4{,}8}{4{,}8} = 1;$$

$$\bar{q}_{5\,43} = \frac{4{,}8}{4{,}8} = 1.$$

Результаты расчетов относительных оценок отключаемой суммарной тепловой мощности нагрузки при отказах всех остальных участков тепловой сети представлены в таблице 9.

2. Определение веса i-го параметра в общем объеме информации о техническом состоянии j-го участка тепловой сети и приоритета замены теплопроводов d-го диаметра (группы диаметров).

2.1. Так как в расчете результаты диагностических обследований участков тепловой сети не используются, вес параметров w_{ij} принимается по данным таблицы 3.

2.2. Приоритет замены теплопроводов d-го диаметра (группы диаметров) в рассматриваемой тепловой сети представлен в таблицах 7 и 9.

Таблица 7 - Приоритет замены теплопроводов разных диаметров (групп диаметров) тепловой сети районной котельной, мощностью 4,8 Гкал/ч

Диаметр теплопровода	Номер группы	Приоритет при замене
d_j , мм	n_{dj}	$w^d_{jn_{d_j}} = n_{d_j} / K_{n_{d_j}}$
80	1	0.25
100	2	0.5
200	3	0.75
300	4	1
	Всего групп: $K_{n_{d_j}}$ = 4	

3. Суммарная относительная оценка технического состояния j-го участка тепловой сети.

Значения суммарных относительных оценок технического состояния участков тепловой сети с учетом веса каждого параметра и приоритета группы диаметров 300 мм вычисляются по формуле (10) на основании результатов расчетов по п. 1 и 2:

$$\bar{p}_3^{300} = w_{3\,4}^{300} \cdot \sum_{i=1}^{I} p_{i\,3} \cdot w_{i\,3}$$

$$= w_{3\,4}^{300} \cdot \left(\bar{\lambda}_{1\,3}^{300} \cdot w_{1\,3} + \bar{t}_{2\,3}^{300} \cdot w_{2\,3} + \bar{\tau}_{3\,3} \cdot w_{3\,3} + \bar{g}_{4\,3} \cdot w_{4\,3} + \bar{q}_{5\,3} \cdot w_{5\,3}\right)$$

$$= 1 \cdot (1{,}98 \cdot 0{,}2 + 1{,}11 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2) = 1{,}218.$$

$$\bar{p}_5^{300} = w_{5\,4}^{300} \cdot \sum_{i=1}^{I} p_{i\,5} \cdot w_{i\,5}$$

$$= w_{5\,4}^{300} \cdot \left(\bar{\lambda}_{1\,5}^{300} \cdot w_{1\,5} + \bar{t}_{2\,5}^{300} \cdot w_{2\,5} + \bar{\tau}_{3\,5} \cdot w_{3\,5} + \bar{g}_{4\,5} \cdot w_{4\,5} + \bar{q}_{5\,5} \cdot w_{5\,5}\right)$$

$$= 1 \cdot (1 \cdot 0{,}2 + 1{,}07 \cdot 0{,}2 + 0{,}4 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2) = 0{,}894.$$

$$\bar{p}_{43}^{300} = w_{43\,4}^{300} \cdot \sum_{i=1}^{I} p_{i\,43} \cdot w_{i\,43}$$

$$= w_{43\,4}^{300} \cdot \left(\bar{\lambda}_{1\,43}^{300} \cdot w_{1\,43} + \bar{t}_{2\,43}^{300} \cdot w_{2\,43} + \bar{\tau}_{3\,43} \cdot w_{3\,43} + \bar{g}_{4\,3} \cdot w_{4\,43} + \bar{q}_{5\,43} \cdot w_{5\,43}\right)$$

$$= 1 \cdot (1{,}98 \cdot 0{,}2 + 1{,}07 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2 + 1 \cdot 0{,}2) = 1{,}21.$$

Результаты расчетов суммарных относительных оценок технического состояния всех остальных участков тепловой сети различных диаметров (групп диаметров), а также нормированные по формуле (8) оценки этих значений $\bar{Z}_j$, представлены в таблице 9.

4. Стоимость работ по замене j-го участка d-го диаметра (группы диаметров).

Стоимость работ по замене j-го участка d-го диаметра (группы диаметров) в примере расчета определяется по материальной характеристике этого участка ($\boldsymbol{M_j}$) и средней для всех диаметров стоимости подземной бесканальной прокладки теплопровода $\boldsymbol{c}_{\text{ср}}$ = 100,494 т.руб./м^2 (по данным теплоснабжающих организаций С. Петербурга в ценах 2014 г. Таблица 8):

$$C_j = M_j \cdot c_{\text{ср}} = L_j \cdot d_j \cdot c_{\text{ср}}\,, \text{т. руб.}$$

где L_j - длина $\boldsymbol{j}$-го участка тепловой сети, м;

d_j – диаметр j-го участка тепловой сети, м.

Таблица 8 – Средняя (для всех диаметров) стоимость работ по замене теплопроводов в зависимости от типа прокладки по данным теплоснабжающих организаций С. Петербурга в ценах 2014 г.

Тип прокладки	Тип изоляции	Стоимость замены
		т.руб./м^2
надземная	-	66
подземная бесканальная	ППУ	100,494

Стоимость работ по замене участков тепловой сети диаметром 300 мм (группы диаметров) с учетом одновременной замены прямого и обратного теплопроводов:

$$C_3 = M_3 \cdot c_{\text{ср}} \cdot 2 = L_3 \cdot d_3 \cdot c_{\text{ср}} \cdot 2 = 500 \cdot 0{,}3 \cdot 100,494 \cdot 2 = 30148{,}2 \text{ т. руб.}$$

$$C_5 = M_5 \cdot c_{\text{ср}} \cdot 2 = L_5 \cdot d_5 \cdot c_{\text{ср}} \cdot 2 = 0{,}2 \cdot 0{,}3 \cdot 100,494 \cdot 2 = 12{,}1 \text{ т. руб.}$$

$$C_{43} = M_{43} \cdot c_{\text{ср}} \cdot 2 = L_{43} \cdot d_{43} \cdot c_{\text{ср}} \cdot 2 = 800 \cdot 0{,}3 \cdot 100,494 \cdot 2 = 48237{,}1 \text{ т. руб.}$$

Результаты определения стоимости работ по замене всех остальных участков тепловой сети представлены в таблице 9.

5. Оптимальное планирование замены участков тепловой сети

5.1. В теплоснабжающих организациях, эксплуатирующих тепловые сети, задача оптимального планирования замены теплопроводов может быть решена следующим образом: к замене планируются только те участки тепловой сети, период эксплуатации которых превышает паспортный срок службы (и/или равен ему).

При такой формулировке задачи оптимального планирования из 29-ти участков тепловой сети районной котельной, мощностью 4,8 Гкал/ч, представленной на рисунке 1, выбираются только пять: №№ 3, 43, 15, 62 и 55. В соответствии с условием (7), замена этих участков может планироваться при равенстве или превышении суммы выделяемой на выполнение работ C_Σ над стоимостью замены самого «дорогого» участка тепловой сети C_j. В тепловой сети таким участком является участок № 43. Стоимость его замены равна 48237,1 т. руб. Если эту стоимость принять в качестве ограничения (т.е. в качестве суммы C_Σ, выделяемой на выполнение работ по замене участков в году периода планирования), то очередность замены участков, выработавших эксплуатационный ресурс, определится значением нормированной суммарной относительной оценкой технического состояния $\bar{Z}_j$ участков тепловой сети (таблица 10).

Таблица 9 – Результаты расчетов

Номер участка	Длина участка	Диаметр теплопровода	Интенсивность отказов участка	Допустимое (паспортное) значение интенсивности отказов участка	Относительная оценка интенсивности отказов	Время восстановления	Допустимое в соответствии со СНиП 41-02-2003 значение среднего времени восстановления	Относительная оценка среднего времени восстановления	Период эксплуатации участка	Паспортный срок службы теплопровода	Относительная оценка продолжительности эксплуатации теплопровода	Расход теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования	Суммарный расход теплоносителя в тепловой сети	Относительная оценка расхода теплоносителя через участок в расчетном режиме функционирования	Суммарная отключаемая при отказе участка нагрузка	Суммарная тепловая мощность нагрузки тепловой сети	Относительная оценка отключаемой при отказе участка суммарной тепловой мощности нагрузки	Номер группы диаметров теплопровода	Приоритет замены группы диаметров теплопроводов	Суммарная относительная оценка технического состояния участка	Нормированная суммарная относительная оценка технического состояния участка	Стоимость работ по замене участка
j	L_j	d_j	λ_{1j}^d	$\lambda_{\text{доп}}^d$	$\bar{\lambda}_{1j}^d$	t_{2j}^d	$T_{\text{доп}}^d$	$\bar{t}_{2j}^d$	τ_{3j}	T_j^{CC}	$\bar{\tau}_{3j}$	g_{4j}	$G_{\text{ТС}}$	$\bar{g}_{4j}$	$\sum q_{5j}$	$Q_{\text{ТС}}$	$\bar{q}_{5j}$	n_{dj}	$w_{jn_{dj}}^d$	$\bar{p}_j^d$	$\bar{Z}_j$	C_j
	м	м	1/(км*ч)	1/(км*ч)	отн. ед.	ч	ч	отн. ед.	лет	лет	отн. ед.	т/ч	т/ч	отн. ед.	Гкал/ч	Гкал/ч	отн. ед.			отн. ед.	отн. ед.	т. руб.
3	500	0.3	2.26E-05	1.14E-05	1.98	16.61	15	1.11	25	25	1	60.00	60	1	4.8	4.8	1	4	1	1.218	0.118	30148.2
5	0.2	0.3	1.14E-05	1.14E-05	1	15.97	15	1.06	10	25	0.4	60.00	60	1	4.8	4.8	1	4	1	0.892	0.087	12.1
43	800	0.3	2.26E-05	1.14E-05	1.98	15.97	15	1.06	25	25	1	60.00	60	1	4.8	4.8	1	4	1	1.208	0.117	48237.1
7	900	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	50.00	60	0.83	4	4.8	0.83	3	0.75	0.5685	0.055	36177.8
13	0.28	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	28.76	60	0.48	0	4.8	0	3	0.75	0.3915	0.038	11.3
15	250	0.2	2.26E-05	1.14E-05	1.98	10.94	15	0.73	30	25	1.2	20.01	60	0.33	0	4.8	0	3	0.75	0.636	0.062	10049.4
25	800	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	8.75	60	0.15	0	4.8	0	3	0.75	0.342	0.033	32158.1
27	500	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	8.75	60	0.15	0	4.8	0	3	0.75	0.342	0.033	20098.8
45	400	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	28.76	60	0.48	0	4.8	0	3	0.75	0.3915	0.038	16079
62	150	0.2	2.26E-05	1.14E-05	1.98	10.94	15	0.73	30	25	1.2	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	3	0.75	0.6375	0.062	6029.6
69	900	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	6	25	0.24	21.24	60	0.35	0	4.8	0	3	0.75	0.348	0.034	36177.8
101	800	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	1.25	60	0.02	0	4.8	0	3	0.75	0.3225	0.031	32158.1
102	400	0.2	1.14E-05	1.14E-05	1	10.94	15	0.73	10	25	0.4	8.76	60	0.15	0	4.8	0	3	0.75	0.342	0.033	16079
11	900	0.1	1.14E-05	1.14E-05	1	6.44	15	0.43	6	25	0.24	1.24	60	0.02	0	4.8	0	2	0.5	0.169	0.016	18088.9
20	0.17	0.1	1.14E-05	1.14E-05	1	6.41	15	0.43	10	25	0.4	20.00	60	0.33	1.6	4.8	0.33	2	0.5	0.249	0.024	3.4
22	700	0.1	1.14E-05	1.14E-05	1	6.41	15	0.43	5	25	0.2	20.00	60	0.33	1.6	4.8	0.33	2	0.5	0.229	0.022	14069.2
23	500	0.1	1.45E-05	1.14E-05	1.27	6.41	15	0.43	3	25	0.12	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	2	0.5	0.216	0.021	10049.4
34	0.22	0.1	1.14E-05	1.14E-05	1	6.41	15	0.43	10	25	0.4	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	2	0.5	0.217	0.021	4.4
39	800	0.1	1.14E-05	1.14E-05	1	6.41	15	0.43	4	25	0.16	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	2	0.5	0.193	0.019	16079
47	800	0.1	1.14E-05	1.14E-05	1	6.41	15	0.43	5	25	0.2	20.00	60	0.33	1.6	4.8	0.33	2	0.5	0.229	0.022	16079
49	500	0.1	1.57E-05	1.14E-05	1.38	6.41	15	0.43	2	25	0.08	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	2	0.5	0.223	0.022	10049.4
32	0.28	0.08	1.14E-05	1.14E-05	1	5.82	15	0.39	10	25	0.4	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.1065	0.01	4.5
36	500	0.08	1.81E-05	1.14E-05	1.59	5.72	15	0.38	1	25	0.04	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.1175	0.011	8039.5
38	0.18	0.08	1.14E-05	1.14E-05	1	5.8	15	0.39	10	25	0.4	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.1065	0.01	2.9
42	0.17	0.08	1.14E-05	1.14E-05	1	5.8	15	0.39	10	25	0.4	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.1065	0.01	2.7
51	100	0.08	1.14E-05	1.14E-05	1	5.82	15	0.39	10	25	0.4	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.1065	0.01	1607.9
53	200	0.08	1.14E-05	1.14E-05	1	5.8	15	0.39	5	25	0.2	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.0965	0.009	3215.8
55	200	0.08	2.26E-05	1.14E-05	1.98	5.8	15	0.39	25	25	1	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.1855	0.018	3215.8
64	600	0.08	1.14E-05	1.14E-05	1	5.69	15	0.38	6	25	0.24	10.00	60	0.17	0.8	4.8	0.17	1	0.25	0.098	0.01	9647.4
																			Итого:	10.288	1	393575.5

Таблица 10 – План замены участков резервированной тепловой сети котельной мощностью 4,8 Гкал/ч, выработавших эксплуатационный ресурс

Номер участка	Нормированная суммарная относительная оценка технического состояния участка	Стоимость работ по замене участка	Год планируемой замены участка		
j	$\bar{Z}_j$	C_j			
	от. ед.	т. руб.	1	2	3
3	0.118	30148.2	+		
43	0.117	48237.1		+	
15	0.062	10049.4			+
62	0.062	6029.6			+
55	0.018	3215.8			+

5.2. В организациях, проектирующих и разрабатывающих городские схемы теплоснабжения, задача оптимального планирования замены теплопроводов, может быть решена следующим образом. В перспективе к замене планируются все существующие, реконструированные и вновь построенные участки тепловой сети не зависимо от существующей на момент планирования выработки их эксплуатационного ресурса. В соответствии с формулой (9), для каждого года периода планирования формируется целевая функция:

$$f(n) = \sum_{j=1}^{J} \bar{Z}_j \cdot n_j := \bar{Z}_1 \cdot n_1 + \bar{Z}_2 \cdot n_2 + \cdots + \bar{Z}_J \cdot n_J \to max,$$

максимум которой, при выполнении условия (7), соответствует оптимальному плану замены участков тепловой сети. При этом не нулевые (равные единице) значения переменных n_j определят выбираемые к замене участки для каждого года перспективного планирования. Выбранные таким образом участки, исключаются из состава рассматриваемых для замены на следующем шаге расчета при формировании целевой функции на очередной год перспективного планирования. Если в условии (7) сумму, выделяемую на выполнение работ по замене всех участков C_Σ выразить как:

$$C_\Sigma = \sum_{t_{\text{гэ}}=1}^{T_{t_{\text{гэ}}}} C_{t_{\text{гэ}}} \cdot t_{\text{гэ}}, \text{ руб.},$$

где $C_{t_{гэ}}$ – сумма, выделяемая на выполнение работ по замене участков в текущем году эксплуатации, руб./год;

$t_{\text{гэ}}$ – год (его номер) в периоде планирования $T_{t_{гэ}}$, $t_{гэ} \in (1,\ 2, \ldots,\ T_{t_{гэ}})$, год,

то задаваясь продолжительностью периода $T_{t_{гэ}}$, в результате поиска оптимального решения формируется план замены участков тепловой сети на каждый год перспективного периода. Необходимо отметить, что если возникает необходимость

разработки годового плана, очередность замены по месяцам каждого года периода планирования может определяться по значениям нормированной суммарной относительной оценки технического состояния $\bar{Z}_j$ участков тепловой сети (таблица 12).

В такой постановке задачи, задавшись продолжительностью периода планирования $T_{t_{\text{гэ}}}$ = 5 лет (т.е. в перспективе замена всех участков выполняется за 5-ть лет) и суммой, выделяемой на выполнение работ по замене участков в каждом году этого периода:

$$C_{t_{\text{гэ}}} = \frac{\sum_{j=1}^{29} C_j}{T_{t_{\text{гэ}}} - 1} = \frac{393575{,}5}{5 - 1} = 98393{,}9 \text{ т. руб./год},$$

ограничение (7) примет вид:

$$\sum_{j=1}^{29} C_j \cdot n_j \leq 98393{,}9 \text{ т. руб.}$$

При таком ограничении оптимальный 5-ти летний план замены участков резервированной тепловой сети котельной мощностью 4,8 Гкал/ч будет соответствовать плану, представленному в таблице 11.

Таблица 11 – 5-ти летний план замены всех участков резервированной тепловой сети котельной мощностью 4,8 Гкал/ч

Номер участка	Нормированная суммарная относительная оценка технического состояния участка	Стоимость работ по замене участка	Год планируемой замены участка				
j	$\bar{Z}_j$	C_j, т. руб.	1	2	3	4	5
3	0.118	30148.2	1	0	0	0	0
5	0.087	12.1	1	0	0	0	0
43	0.117	48237.1	1	0	0	0	0
7	0.055	36177.8	0	1	0	0	0
13	0.038	11.3	1	0	0	0	0
15	0.062	10049.4	1	0	0	0	0
25	0.033	32158.1	0	0	1	0	0
27	0.033	20098.8	0	0	1	0	0
45	0.038	16079	0	0	1	0	0
62	0.062	6029.6	1	0	0	0	0
69	0.034	36177.8	0	0	0	1	0
101	0.031	32158.1	0	0	0	1	0
102	0.033	16079	0	1	0	0	0
11	0.016	18088.9	0	0	1	0	0
20	0.024	3.4	1	0	0	0	0
22	0.022	14069.2	0	1	0	0	0
23	0.021	10049.4	0	1	0	0	0
34	0.021	4.4	1	0	0	0	0
39	0.019	16079	0	0	0	1	0
47	0.022	16079	0	0	0	0	1
49	0.022	10049.4	0	1	0	0	0
32	0.01	4.5	1	0	0	0	0
36	0.011	8039.5	0	0	0	1	0
38	0.01	2.9	1	0	0	0	0
42	0.01	2.7	1	0	0	0	0
51	0.01	1607.9	0	1	0	0	0
53	0.009	3215.8	0	1	0	0	0
55	0.018	3215.8	1	0	0	0	0
64	0.01	9647.4	0	0	1	0	0
Максимальное значение целевой функции:			0.58	0.17	0.13	0.095	0.0223
Итоговая стоимость работ по замене, т. руб.:			97721.4	91248.5	96072.2	92454.4	16079

Оптимальный (по значениям $\bar{Z}_j$) годовой план замены участков тепловой сети котельной мощностью 4,8 Гкал/ч представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Годовой план замены всех участков резервированной тепловой сети котельной мощностью 4,8 Гкал/ч

Номер участка	Нормированная суммарная относительная оценка технического состояния участка	Стоимость работ по замене участка	Первый год 5-ти летнего периода планирования				
			Месяц планируемой замены участка				
j	$\bar{Z}_j$	C_j, т. руб.	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
3	0.118	30148.2	1	0	0	0	0
5	0.087	12.1	0	1	0	0	0
43	0.117	48237.1	1	0	0	0	0
13	0.038	11.3	0	0	1	0	0
15	0.062	10049.4	0	1	0	0	0
62	0.062	6029.6	0	1	0	0	0
20	0.024	3.4	0	0	1	0	0
34	0.021	4.4	0	0	1	0	0
32	0.01	4.5	0	0	0	1	0
38	0.01	2.9	0	0	0	0	1
42	0.01	2.7	0	0	0	0	1
55	0.018	3215.8	0	0	0	1	0
Максимальное значение целевой функции:			0.235	0.211	0.083	0.028	0.02
Итоговая стоимость работ по замене, т. руб.:			78385.3	16091.1	19.1	3220.3	5.6

Выводы

Разработанный план замены участков тепловой сети характеризуется следующими свойствами:

1. Достоверность плана соответствует достоверности исходных данных.
2. Процесс планирования является «открытым»: позволяет изменять состав и вес параметров, характеризующих техническое состояние теплопроводов в зависимости от наличия или отсутствия данных диагностических обследований. В состав параметров могут включаться социально значимые характеристики, такие как: наличие (отсутствие) транспортных магистралей, опасность поражения людей горячим теплоносителем и т.п. В процессе планирования возможно изменение состава ограничений в соответствии с правилами математического программирования [5].

Список использованных источников

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука. – 1984. – 328 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: «Машиностроение», 1978. – 240 с., ил. – (Надежность и качество).
3. Вариант структуры, состава и численных значений нормативов надежности теплоснабжающих систем/ Б.Н. Громов, В.А. Кучев, Е.В. Сеннова и др. //Метод. вопр. исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 37. - Киев, 1990. - С. 155-167.
4. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М.: «Советское радио», 1964. – 174 с., ил.
5. Грешилов А.А. Прикладные задачи математического программирования: Учебное пособие. – 2-е изд. – М.: Логос, 2006. – 288 с.: ил.
6. Гнеденко В.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.Математические методы в теории надежности. – М.: Наука. – 1965. – 524 с.
7. Гнеденко В.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука. – 1987. – 336 с.
8. Кучев В.А. Повышение надежности теплоснабжающих систем на базе совершенствования процессов восстановления теплоснабжения при отказах теплопроводов// Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1988. - №3. - С. 38-45.
9. 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 г. – 351 с.
10. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.: ил.
11. Требования к схемам теплоснабжения, порядку их разработки и утверждения (утверждены постановлением Правительства РФ от 22 февраля 2012 г. № 154).
12. Методические рекомендации по разработке схем теплоснабжения (утверждены совместным приказом Минэнерго РФ и Минрегион РФ от 29.12.2012 г. № 565/667).
13. Методика и алгоритм расчета сетевой составляющей в показателях надежности теплоснабжения потребителей при разработке схем теплоснабжения населенных пунктов [Электронный ресурс]. - URL: http://www.sei.irk.ru/conferences/index.php
14. ГОСТ Р 53480 – 2009 «Надежность в технике. Термины и определения».
15. СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети». –М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.
16. МДК 4-01.2001 «Методические рекомендации по техническому расследованию и учету технологических нарушений в системах коммунального энергоснабжения и работе энергетических организаций жилищно-коммунального комплекса» (утверждены приказом Министра Госстроя России от 20.08.01 № 191).
17. 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.
18. Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27 декабря 2010 года № 175 «Об утверждении СанПиН 2.1.2.2645-10».
19. Надежность систем энергетики. (Сборник рекомендуемых терминов). – М.: ИАЦ «Энергия», 2007.
20. Надежность систем энергетики. Терминология. – М.: Наука, 1980. – Вып. 95.