

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ И НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ НА СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

А. С. Дерговица, ведущий специалист отдела развития систем теплоэнергоснабжения

А. В. Мухамбаев, главный специалист отдела развития систем теплоэнергоснабжения

Д. А. Мильков, заведующий отделом развития систем теплоэнергоснабжения

А. С. Горшков, заведующий отделом разработки схем и программ развития систем энергоснабжения, д. т. н.

АО «Газпром промгаз» (142702, Московская область, г. Видное, ул. Вокзальная, д. 23)

Введение

В работах [1, 2] выполнена независимая друг от друга оценка влияния реконструкции тепловых сетей и их нового строительства на средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов.

В работе [1] получено следующее уравнение для средневзвешенного периода эксплуатации трубопроводов тепловой сети через год после их реконструкции $\bar{\tau}_{t+1}$:

$$\bar{\tau}_{t+1} = \bar{\tau}_t + 1 - \bar{\tau}^- \cdot \frac{l_{\Sigma}^-}{l_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где $\bar{\tau}_t$ — текущий, на момент времени t , средневзвешенный срок службы или период эксплуатации трубопроводов тепловой сети;

$\bar{\tau}^-$ — средневзвешенный период эксплуатации заменяемых при реконструкции трубопроводов;

l_{Σ}^- — суммарная протяженность реконструируемых трубопроводов, км;

l_{Σ} — суммарная протяженность тепловой сети, км.

Уравнение (1) показывает, что без учета нового строительства средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов тепловой сети через год после реконструкции окажется равным сумме текущего средневзвешенного периода эксплуатации и единицы (все существующие трубопроводы к этому времени «состарятся» на один год) за вычетом средневзвешенного периода эксплуатации реконструируемых трубопроводов, умноженного на их долю в общей протяженности тепловой сети.

Уравнение (1) получено без учета нового строительства тепловой сети.

Из уравнения (1) вытекает следующее условие нестарения (неувеличения средневзвешенного периода эксплуатации) трубопроводов тепловой сети [1]:

$$1 - \bar{\tau}^- \cdot \frac{l_{\Sigma}^-}{l_{\Sigma}} = 0, \quad (2)$$

откуда

$$\bar{\tau}^- \cdot \frac{l_{\Sigma}^-}{l_{\Sigma}} = 1 \rightarrow \bar{\tau}^- \cdot l_{\Sigma}^- = l_{\Sigma} \rightarrow l_{\Sigma}^- = \frac{l_{\Sigma}}{\bar{\tau}^-}. \quad (3)$$

Последнее выражение в формуле (3) позволяет оценить требуемый объем перекладки реконструируемых участков тепловой сети, при котором $\bar{\tau}_{t+1} = \bar{\tau}_t$, т. е. средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов остается неизменным. Например, если суммарная протяженность тепловой сети в городе l_{Σ} составляет 10 000 км в однотрубном исчислении (как это имеет место в Санкт-Петербурге), а средневзвешенный период эксплуатации реконструируемых участков тепловой сети $\bar{\tau}^-$ равен 25 годам, т. е. назначенному сроку их службы, то требуемый объем перекладки должен составить не менее $10000/25 = 400$ км. Если трубопроводы изнашиваются раньше назначенного срока службы, то и объем их перекладки должен быть больше.

В работе (2) рассмотрена оценка влияния нового строительства на средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов без учета объемов их реконструкции. При таком подходе выражение для определения средневзвешенного периода эксплуатации трубопроводов тепловой сети с учетом вклада в него доли нового строительства принимает вид [2]:

$$\bar{\tau}_{t+1} = \frac{\bar{\tau}_t}{(1+k)} + 1, \quad (4)$$

где $\bar{\tau}_t$ — то же, что и в формуле (1);

$$k = \frac{l_{\Sigma}^+}{l_{\Sigma}} \text{ — коэффициент, учитывающий долю протяженности новых трубопроводов}$$

l_{Σ}^+ от суммарной протяженности тепловой сети l_{Σ} .

Для данного случая условие нестарения (неувеличения средневзвешенного периода эксплуатации) трубопроводов тепловой сети имеет следующий вид [2]:

$$k \geq \frac{1}{\bar{\tau}_t - 1}. \quad (5)$$

С учетом принятого выше обозначения для коэффициента k :

$$\frac{l_{\Sigma}^+}{l_{\Sigma}} \geq \frac{1}{\bar{\tau}_t - 1}, \quad (6)$$

откуда

$$l_{\Sigma}^+ \geq \frac{l_{\Sigma}}{\bar{\tau}_t - 1}. \quad (7)$$

Например, если средневзвешенный период эксплуатации тепловой сети $\bar{\tau}_t$ составляет 21 год, а суммарная ее протяженность 10 000 км, то объем нового строительства должен составлять не менее $10000/20 = 500$ км. В реальности он существенно меньше, т. к. большинство новых строящихся объектов в городе присоединяются к существующим тепловым сетям. И, конечно, не имеет никакого смысла подгонять объемы нового строительства тепловых сетей под требуемую задачу. Представленная выше модель лишь показывает влияние нового строительства на средневзвешенный срок службы трубопроводов. Фактический объем нового строительства тепловых сетей в Санкт-Петербурге существенно ниже. Например, в 2022

году он составил 52,9 км в однострубно́м исчислении (табл. 1), т. е. примерно в десять раз меньше требуемого. Неизменность средневзвешенного периода эксплуатации трубопроводов в основном должна обеспечивать реконструкция аварийных и ветхих участков тепловой сети. При этом резонно учитывать также и объемы нового строительства, сколь бы незначительными по сравнению с суммарной протяженностью тепловой сети они ни были.

Таблица 1. Объемы реконструкции и нового строительства тепловых сетей в Санкт-Петербурге, км [3]

Год	2018	2019	2020	2021	2022	Среднее значение
Реконструкция	133,1	172,4	164,5	169,7	159,6	159,8
Новое строительство	35,8	43,1	56,5	56,9	52,9	49
Примечание. В таблице 1 протяженности трубопроводов приведены в однострубно́м исчислении.						

Настоящее исследование посвящено комплексной оценке влияния как реконструкции тепловой сети, так и нового строительства на средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов.

Модель расчета

Для этого введем следующие допущения.

Будем считать, что одна часть тепловой сети находится в работоспособном (индекс «р») техническом состоянии, другая — в ветхом (индекс «в») или близким к нему. В рамках данного исследования под ветхими участками тепловой сети будем понимать те из них, период эксплуатации которых превысил нормативный срок службы (25 лет).

Тогда средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов на момент времени t обозначим следующим образом:

$$\bar{\tau}_t = \frac{\bar{\tau}_p \cdot l_p + \bar{\tau}_v \cdot l_v}{l_p + l_v}, \quad (8)$$

где $\bar{\tau}_p$ — средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов, находящихся в работоспособном техническом состоянии;

l_p — протяженность трубопроводов, находящихся в работоспособном и ветхом техническом состоянии;

$\bar{\tau}_v$ — средневзвешенный период эксплуатации ветхих участков тепловой сети;

l_v — протяженность ветхих участков тепловой сети.

Будем также считать, что реконструкции подлежат только так называемые ветхие участки тепловой сети, период эксплуатации которых превысил нормативный срок службы, а ввиду невозможности их полной замены в течение одного межотопительного периода реконструируется только часть из них.

Тогда средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов, подлежащих реконструкции, можно обозначить следующим образом:

$$\bar{\tau}_\epsilon = \frac{\bar{\tau}_\epsilon^+ \cdot l_\epsilon^+ + \bar{\tau}_\epsilon^- \cdot l_\epsilon^-}{l_\epsilon^+ + l_\epsilon^-} = \frac{\bar{\tau}_\epsilon^+ \cdot l_\epsilon^+ + \bar{\tau}_\epsilon^- \cdot l_\epsilon^-}{l_\epsilon}, \quad (9)$$

где $\bar{\tau}_\epsilon^+$, l_ϵ^+ — соответственно средневзвешенный период эксплуатации и протяженность ветхих участков тепловой сети, не подлежащих замене в рассматриваемый период;

$\bar{\tau}_\epsilon^-$, l_ϵ^- — соответственно средневзвешенный период эксплуатации и протяженность ветхих участков тепловой сети, подлежащих реконструкции; с учетом обозначений, принятых в [1]: $\bar{\tau}_\epsilon^- = \bar{\tau}^-$, $l_\epsilon^- = l_\Sigma^-$, а сразу после реконструкции $\bar{\tau}_\epsilon^-$ становится равным τ_1 .

l_ϵ — то же, что и в формуле (8).

Из уравнения (9) следует, что

$$\bar{\tau}_\epsilon^+ \cdot l_\epsilon^+ = \bar{\tau}_\epsilon \cdot l_\epsilon - \bar{\tau}_\epsilon^- \cdot l_\epsilon^-. \quad (10)$$

Период эксплуатации вновь построенных участков тепловой сети обозначим τ_n , их суммарную протяженность — l_n . При этом $\tau_n = \tau_1 = 1$.

Как и в исследовании [2], долю новых участков тепловой сети от ее общей протяженности обозначим коэффициентом вида:

$$k = \frac{l_n}{l_p + l_\epsilon}, \quad (11)$$

откуда

$$l_n = k \cdot (l_p + l_\epsilon). \quad (12)$$

Тогда через один год, т. е. в момент времени $t + 1$ средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов с учетом их реконструкции и нового строительства составит:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{t+1} &= \frac{(\bar{\tau}_p + 1) \cdot l_p + (\bar{\tau}_\epsilon^+ + 1) \cdot l_\epsilon^+ + \bar{\tau}_1 \cdot l_\epsilon^- + \tau_n \cdot l_n}{(l_p + l_\epsilon + l_n)} = \\ &= \frac{\bar{\tau}_p \cdot l_p + l_p + \bar{\tau}_\epsilon^+ \cdot l_\epsilon^+ + l_\epsilon^+ + \bar{\tau}_1 \cdot l_\epsilon^- + \tau_1 \cdot l_n}{(l_p + l_\epsilon + l_n)} = \\ &= \frac{\bar{\tau}_p \cdot l_p + l_p + \bar{\tau}_\epsilon \cdot l_\epsilon - \bar{\tau}_\epsilon^- \cdot l_\epsilon^- + l_\epsilon^+ + l_\epsilon^- + l_n}{(l_p + l_\epsilon + l_n)} = \\ &= \frac{(\bar{\tau}_p \cdot l_p + \bar{\tau}_\epsilon \cdot l_\epsilon) + (l_p + l_\epsilon + l_n) - \bar{\tau}_\epsilon^- \cdot l_\epsilon^-}{(l_p + l_\epsilon + l_n)} = \\ &= \frac{(\bar{\tau}_p \cdot l_p + \bar{\tau}_\epsilon \cdot l_\epsilon)}{(l_p + l_\epsilon) \cdot (1 + k)} + 1 - \frac{\bar{\tau}_\epsilon^- \cdot l_\epsilon^-}{(l_p + l_\epsilon + l_n)} = \frac{\bar{\tau}_t}{(1 + k)} + 1 - \bar{\tau}^- \cdot \frac{l_\Sigma^-}{l_\Sigma}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, для рассматриваемого случая уравнение для средневзвешенного периода эксплуатации с учетом реконструкции и нового строительства тепловых сетей примет следующий окончательный вид:

$$\bar{\tau}_{t+1} = \frac{\bar{\tau}_t}{(1+k)} + 1 - \bar{\tau}^- \cdot \frac{l_{\Sigma}^-}{l_{\Sigma}}. \quad (14)$$

При отсутствии нового строительства, т. е. при $l_{\Sigma}^+ = 0$, когда $k = 0$, уравнение (14) принимает вид уравнения (1). При отсутствии реконструкции, т. е. при $l_{\Sigma}^- = 0$, уравнение (14) принимает вид (4). Таким образом, уравнение (14) обобщает результаты, полученные ранее в исследованиях [1, 2].

По аналогии с частными случаями, рассмотренными в работах [1, 2], установим объем требуемой перекладки тепловой сети с учетом ввода в эксплуатацию вновь построенных ее участков. С учетом (11) выражение (14) примет вид:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_{t+1} &= \frac{\bar{\tau}_t}{\left(1 + \frac{l_n}{l_p + l_e}\right)} + 1 - \bar{\tau}^- \cdot \frac{l_{\Sigma}^-}{(l_p + l_e + l_n)} = \\ &= \bar{\tau}_t \cdot \frac{(l_p + l_e)}{(l_p + l_e + l_n)} + 1 - \bar{\tau}^- \cdot \frac{l_{\Sigma}^-}{(l_p + l_e + l_n)}, \end{aligned} \quad (15)$$

откуда, принимая во внимание, что $l_{\Sigma} = (l_p + l_e + l_n)$, после ряда преобразований уравнения (15) получим:

$$l_{\Sigma}^- = \frac{\bar{\tau}_t \cdot l_{\Sigma} - \bar{\tau}_t \cdot l_n + l_{\Sigma} - \bar{\tau}_{t+1} \cdot l_{\Sigma}}{\bar{\tau}^-} = \frac{(\bar{\tau}_t - \bar{\tau}_{t+1}) \cdot l_{\Sigma} + l_{\Sigma} - \bar{\tau}_t \cdot l_n}{\bar{\tau}^-}. \quad (16)$$

Так как мы не можем регулировать протяженность вновь построенных участков тепловых сетей l_n , выразим из уравнения (16) параметр l_{Σ}^- . Приняв условие нестарения (неувеличения средневзвешенного периода эксплуатации) трубопроводов, т. е. $\bar{\tau}_{t+1} = \bar{\tau}_t$. Тогда для оценки требуемого объема перекладки окончательно получим следующее выражение:

$$l_{\Sigma}^- = \frac{l_{\Sigma} - \bar{\tau}_t \cdot l_n}{\bar{\tau}^-}. \quad (17)$$

Уравнение (17) показывает минимальный объем перекладки существующих трубопроводов, обеспечивающий постоянство (неувеличение) средневзвешенного периода эксплуатации трубопроводов тепловой сети с учетом объемов нового строительства.

При $l_{\Sigma}^- > \frac{l_{\Sigma} - \bar{\tau}_t \cdot l_n}{\bar{\tau}^-}$ средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов $\bar{\tau}_{t+1}$ будет уменьшаться, при $l_{\Sigma}^- < \frac{l_{\Sigma} - \bar{\tau}_t \cdot l_n}{\bar{\tau}^-}$ — возрастать.

Из уравнения (17) следует, что чем больше протяженность новых участков тепловой сети l_n , тем меньше требуемый объем перекладки. Однако, как было показано выше, новое строительство не поддается регулированию. Оно зависит только от количества

новых объектов капитального строительства. С учетом того, что большинство из них присоединяются к существующим тепловым сетям, вклад их оказывается не столь значительным, что наглядно продемонстрировано в работе [2].

На объем перекладки оказывает влияние также средневзвешенный период эксплуатации заменяемых участков тепловой сети \bar{t}^- : чем он меньше, т. е. чем раньше наступает срок замены трубопроводов, тем выше оказывается требуемый объем перекладки сетей. Отсюда следует необходимость повышения фактических сроков службы трубопроводов до требуемой их реконструкции (замены на новые).

Для более объективного анализа фактического технического состояния трубопроводов тепловой сети требуется внедрение современных автоматизированных методов и средств их диагностики. Подобные методы обеспечивают более авторитетный отбор участков тепловой сети, требующих реконструкции в первую очередь.

ВЫВОДЫ

Износ трубопроводов тепловой сети [4–6] и отсутствие объективной информации об их фактическом техническом состоянии в реальном режиме времени стимулирует поиск организационно-технических решений, направленных на уменьшение аварийных рисков при эксплуатации трубопроводов тепловой сети. В рамках настоящего исследования рассмотрена модель изменения со временем средневзвешенного периода эксплуатации трубопроводов с учетом объема их перекладки при реконструкции и ввода в эксплуатацию новых участков тепловой сети.

Средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов тепловой сети сам по себе не является объективным показателем ее технического состояния. Однако данный показатель в значительной степени может характеризовать техническое состояние системы, т. к. чем больше период эксплуатации трубопроводов, тем выше вероятность возникновения в них дефектов и повреждений. Авторы исследования [7] анализируют динамику роста повреждаемости элементов теплосети в зависимости от времени их эксплуатации и отмечают, что чем старше период эксплуатации трубопроводов, тем выше их удельная повреждаемость.

В рамках настоящего исследования авторами разработана наглядная математическая модель, позволяющая оценить минимальный требуемый объем реконструкции тепловой сети, обеспечивающий неизменность средневзвешенного периода эксплуатации трубопроводов.

Представленная математическая модель может быть применена не только в отношении трубопроводов тепловой сети, но и иных однородных по функциональному назначению элементов системы централизованного теплоснабжения.

В последующих публикациях будет рассмотрена практическая реализация модели на базе данных, представленных в актуализированной редакции Схемы теплоснабжения Санкт-Петербурга [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухамбаев А. В. Оценка объемов реконструкции тепловых сетей на средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов / А. В. Мухамбаев, Д. А. Мильков, А. С. Горшков // Инженерные системы. 2024. № 1. С. 28–32.
2. Мухамбаев А. В. Оценка объемов реконструкции тепловых сетей на средневзвешенный период эксплуатации трубопроводов / А. В. Мухамбаев, Д. А. Мильков, И. А. Войлоков, А. С. Горшков // Инженерные системы. 2024. № 2. С. 30–34.

3. Схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2033 года (актуализация на 2023 год). [Электронный ресурс]: URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen/shemy-razvitiya-inzhenerno-energeticheskogo-kompleksa/shema-teplosnabzheniya/> (дата обращения: 17.12.2023).
4. Кирюхин С. Н. Оценка данных о технологических нарушениях в тепловых сетях / С. Н. Кирюхин, Е. В. Сеннова, А. О. Шиманская // Энергосбережение. 2018. № 6. С. 38–45.
5. Горшков А. С. Износ и повреждение тепловых сетей. Решение проблемы качества и надежности энергоснабжения / А. С. Горшков, П. П. Рымкевич // Энергосбережение. 2019. № 4. С. 50–55.
6. Горшков А. С. Износ и повреждение тепловых сетей. Решение проблемы качества и надежности энергоснабжения / А. С. Горшков, П. П. Рымкевич // Энергосбережение. 2019. № 5. С. 67–72.
7. Титов Г. И. Исследование надежности тепловых сетей / Г. И. Титов, Н. А. Новопашина // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 2. С. 141–148.