

Прогнозирование отказов тепловых сетей с учетом температуры теплоносителя и срока службы теплопроводов

Р. Ю. Рожков, канд. техн. наук, зам. главного инженера АО «Теплосеть Санкт-Петербурга»

В. В. Хотяков, главный специалист НТЦ «Комплексное развитие инженерной инфраструктуры» в Санкт-Петербурге АО «Газпром промгаз»

С. Н. Кирюхин, канд. техн. наук, доцент, ведущий специалист ООО «Невская энергетика»

Ю. В. Юферев, д-р техн. наук, профессор, руководитель проектов НТЦ «Комплексное развитие инженерной инфраструктуры» в Санкт-Петербурге АО «Газпром промгаз»

Ключевые слова: источник тепловой энергии, система централизованного теплоснабжения, тепловые сети, регулирование теплоотпуска, температурный график, испытания на максимальную температуру, интенсивность отказов (удельная повреждаемость), теплоснабжающие организации, ТЭЦ, отопительный период

Проблема возврата к проектным температурным графикам регулирования в существующих системах централизованного теплоснабжения (СЦТ) широко обсуждается на научных конференциях и в публикациях. Основным аргументом ограничения температуры в подающих магистралях указывается высокая аварийность тепловых сетей (ТС). Поэтому принятие обоснованного решения по выбору оптимального температурного графика (ОТГ) невозможно без учета выработки эксплуатационных ресурсов теплопроводов и влияния температуры теплоносителя на интенсивность отказов в работе ТС.

Данная публикация дополняет ранее выполненные авторами исследования, в которых на основании статистического анализа отказов в работе ТС одной из крупнейших теплоснабжающих организаций Санкт-Петербурга была разработана математическая зависимость интенсивности отказов ТС от продолжительности их эксплуатации, типа прокладки и диаметра трубопроводов. В настоящей работе сделан следующий шаг: получена математическая зависимость интенсивности отказов ТС одновременно от двух факторов: продолжительности эксплуатации тепловых сетей и температуры транспортируемого теплоносителя.

Введение

Режимы регулирования теплоотпуска в системе централизованного теплоснабжения (СЦТ) определяются на этапе ее проектирования и предполагают соответствие выработки и распределения требуемого потребителям количества теплоты в зависимости от температуры

наружного воздуха. В крупных СЦТ Санкт-Петербурга регулирование отпуска тепла потребителям осуществляется «качественным» способом, т. е. путем изменения температуры теплоносителя при постоянном расходе. При этом проектным температурным графиком является график 150/70 °С.

В публикации [1] сделан вывод о возможности перехода на «оптимальный» температурный график при обязательности выполнения условия «минимизации конечных тарифов на тепловую энергию» и технико-экономическом обосновании такого графика «для каждой системы теплоснабжения».

В другой публикации [2] проанализированы возможности снижения (относительно проектных) температурных графиков СЦТ на базе ТЭЦ с целью увеличения эксплуатационных ресурсов теплопроводов существующих тепловых сетей с одновременным повышением доли комбинированной выработки электрической энергии на ТЭЦ.

При этом большинство исследователей согласны с утверждением, что температура транспортируемого теплоносителя является одним из важных факторов, влияющих на интенсивность отказов в работе тепловых сетей (ТС).

Анализ приведенных выше публикаций и выполненных в последнее время по этой теме исследований подтверждает ее актуальность.

Поставленная в настоящем исследовании задача решалась на основе статистического анализа эксплуатационных данных с построением (выбором) математической модели прогнозирования интенсивности отказов ТС по температуре теплоносителя и продолжительности эксплуатации теплопроводов, при этом принято, что зависимость интенсивности отказов ТС от продолжительности их эксплуатации достоверно описывается распределением Вейбулла–Гнеденко [3] с использованием методов линейного и целочисленного программирования [4, 5], а также байесовских методов [6].

Результаты исследований

В публикации [3] приведена установленная по результатам статистического анализа данных об отказах ТС зависимость интенсивности отказов теплопроводов от продолжительности их эксплуатации:

$$\xi = \xi_{\max} \cdot \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^\beta} \right\}, \text{ ед.}/(\text{км} \cdot \text{сутки}), \quad (1)$$

где:

ξ_{\max} – максимальное значение интенсивности отказов теплопроводов анализируемой группы однотипных (по типу прокладки и диаметру) участков ТС, ед./(\text{км} \cdot \text{сутки});

τ – фактическая продолжительность эксплуатации, год;

γ – показатель, характеризующий реальный эксплуатационный ресурс теплопроводов анализируемой группы однотипных участков ТС, год;

λ – показатель (коэффициент масштаба), характеризующий темп изменения интенсивности отказов теплопроводов анализируемой группы однотипных участков ТС ($\lambda = 4$).

В публикации [7] представлен алгоритм использования зависимости (1) для прогнозирования отказов ТС в одной крупной ТСО Санкт-Петербурга при различных вариантах объемов (и темпов) реконструкции ТС.

Следующим этапом развития модели интенсивности отказов стал поиск зависимости ее параметров от температуры теплоносителя в ТС.

Основное допущение, положенное в основу разработки модели расчета интенсивности отказов, состоит в том, что зависимость от температуры в формуле (1) реализует параметр ξ_{\max} и эта зависимость имеет следующий вид:

$$\xi_{\max} = \xi_0 + \alpha \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{T-T_0}{\beta}\right)^\delta} \right), \quad (2)$$

где:

T – температура теплоносителя в подающем теплопроводе, °С;

$T_0 = 70$ – минимальная температура теплоносителя в подающем теплопроводе (температура нижней срезки температурного графика), °С;

$\alpha, \beta, \xi_0, \delta$ – параметры модели, значения которых определяются по результатам статистического анализа фактических данных об отказах ТС, зарегистрированных в т. ч. и при проведении испытаний тепловых сетей на максимальную температуру.

Статистическому анализу подвергнуты данные по конкретной СЦТ одной из самых больших по мощности ТЭЦ Санкт-Петербурга, полученные в отопительные периоды (ОП) 2021–2025 годов, в период с января по февраль 2026 года, а также в периоды проведения испытаний на максимальную температуру: $T_{\max} = 110$ °С (2016 год) и $T_{\max} = 100$ °С (2021 год).

Расчет параметров $\alpha, \beta, \xi_0, \delta$ выполнялся решением задачи по поиску функции вида (3), обеспечивающей минимальное отклонение расчетного числа отказов ТС за каждый базовый период от соответствующих фактических значений.

Для построения расчетного алгоритма все ТС в системе теплоснабжения ТЭЦ были разбиты на

Таблица 1
Исходные данные и результаты их обработки

Номер базового периода (j)	Базовый период	$N_{\text{факт}}$, ед.	M_{j_i} , сутки	T_1 , °C	L_{Σ} , м	A_j	$\bar{\xi}_{\text{факт}}$, ед./ (км · сут.)
1	Отопительный период 2021 года	423	181	84,0	740101	0,651	0,00318
2	Отопительный период 2022 года	383	181	82,1	741353	0,664	0,00285
3	Отопительный период 2023 года	360	181	83,2	742574	0,684	0,00268
4	Отопительный период 2024 года	390	182	81,6	744452	0,704	0,00288
5	Отопительный период 2025 года.	408	181	79,4	744576	0,725	0,00303
6	С 01.01 по 04.03.2026 года	153	63	96,0	744576	0,725	0,00326
7	Испытания на максимальную температуру 100 °C (2021)	3	1	100,0	740101	0,651	0,00405
8	Испытания на максимальную температуру 110 °C (2016)	19	1	112,0	676941	0,577	0,02807

группы участков, различающиеся продолжительностью эксплуатации.

Объединением формул (1) и (2) было получено следующее выражение для расчета усредненной по исследуемой системе теплоснабжения интенсивности отказов, если температура транспортируемого теплоносителя поддерживалась равной T :

$$\bar{\xi}_j = A_j \cdot \left\{ \xi_0 + \alpha \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{T-\beta}{\alpha}\right)^\delta} \right) \right\}, \quad (3)$$

где:

j – условный порядковый номер исследуемого базового периода;

A_j – параметр, укрупненно характеризующий выработку эксплуатационных ресурсов теплопроводов СЦТ в j -й базовый период, равный средневзвешенному по протяженностям всех участков отношению интенсивности отказов, рассчитанной исходя из фактической продолжительности их эксплуатации, к максимальному значению, который рассчитывается по формуле:

$$A_j = \frac{\sum_i \left[L_{ji} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t_i}{T}\right)^\delta} \right) \right]}{\sum_i L_{ji}}, \quad (4)$$

где:

L_{ji} – суммарная длина трубопроводов (в однотрубном исчислении) i -й продолжительности эксплуатации в j -м базовом периоде, км.

Определение параметров зависимости (3) выполнено в два этапа. На первом этапе по методике

[3] были определены Υ и ξ'_{max} (без учета влияния температуры теплоносителя), значения которых равны: $\Upsilon = 22,06$ лет и $\xi'_{\text{max}} = 0,00467$ ед./ (км сутки). Значение ξ'_{max} при этом использовалось как начальное приближение для ξ_0 в зависимости (2).

На втором этапе были рассчитаны параметры α , β , ξ_0 , δ по критерию минимального отклонения результатов расчета от фактических данных, что обеспечивается минимизацией следующего функционала:

$$\Psi = \sum_{j=1}^8 \left(\frac{\bar{\xi}_{\text{расчет}j} - \bar{\xi}_{\text{факт}j}}{\bar{\xi}_{\text{факт}j}} \right) \Rightarrow \min, \quad (5)$$

где:

$\bar{\xi}_{\text{расчет}j}$ – расчетное значение усредненной (в исследуемой СЦТ) интенсивности отказов ТС за j -й базовый период, ед./ (км · сутки);

$\bar{\xi}_{\text{факт}j}$ – среднее (за j -й базовый период) значение фактической интенсивности отказов ТС, ед./ (км · сутки):

$$\bar{\xi}_{\text{факт}j} = \frac{N_{\text{факт}j}}{D_j \cdot L_{\Sigma j}}, \quad (6)$$

где

$N_{\text{факт}j}$ – количество отказов теплопроводов, фактически зарегистрированных в j -м базовом периоде эксплуатации, ед.;

D_j – продолжительность j -го периода эксплуатации ТС, сутки;

$L_{\Sigma j}$ – суммарная длина (в однотрубном исчислении) теплопроводов ТС в j -й период эксплуатации, км.

Таблица 2

Интервальная градация базовых периодов и результаты расчетов интенсивности отказов теплопроводов

Номер базового периода	Интервальный номер диапазона значений, k										Расчетные параметры, усредненные по СЦТ			Фактическая интенсивность отказов ТС	
	1	2	3	4	5	Диапазон значений T_1 , °C									
	$T_1 < 80$		$80 \leq T_1 < 85$		$85 \leq T_1 < 90$		$90 \leq T_1 < 95$		$95 \leq T_1$						
	Параметр										$T_{1\text{сред}}$	M_Σ	$\xi_{\text{расчет}}$	$\xi_{\text{факт}}$	
	$T_{1\text{сред}}$	Сутки	$T_{1\text{сред}}$	Сутки	$T_{1\text{сред}}$	Сутки	$T_{1\text{сред}}$	Сутки	$T_{1\text{сред}}$	Сутки	$T_{1\text{сред}}$	Сутки	°C	Сутки	ед./ (км · сут.)
1	71,1	63	82,6	27	87,2	21	92,4	15	96,3	54	84,0	180	0,00278	0,00318	
2	72,6	76	82,4	31	88,7	31	92,0	27	96,8	16	82,1	181	0,00278	0,00285	
3	72,4	62	82,6	42	87,7	25	92,3	30	97,0	22	83,2	181	0,00289	0,00268	
4	73,9	97	82,4	24	86,9	19	93,0	12	97,7	30	81,6	182	0,00301	0,00288	
5	73,5	100	82,1	41	86,8	17	92,6	15	97,9	8	79,4	181	0,00303	0,00303	
6									96,0	63	96,0	63	0,00327	0,00326	
7									100,0	1	100,0	1	0,00406	0,00405	
8									112,0	1	112,0	1	0,02807	0,02807	

Исходные данные и результаты расчетов $\xi_{\text{факт}}$ приведены в табл. 1. С целью получения расчетной зависимости для $\xi_{\text{расчет}}$ каждый базовый период был разделен по длительности на интервалы, характеризующиеся тем, что в течение входящих в этот интервал суток среднесуточная температура сетевой воды изменялась в достаточно узком заданном диапазоне. Принятое разбиение базовых периодов на интервалы представлено в табл. 2.

С использованием формул (1) и (2) было получено расчетное выражение для $\xi_{\text{расчет}}$:

$$\xi_{\text{расчет}} = \frac{A_j}{M_j} \cdot \sum_k \left\{ \left[\xi_0 + \alpha \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{T_{jk}^\phi}{\beta} \right)^\delta} \right) \right] \cdot M_{jk} \right\} \quad (7)$$

где:

k – условный порядковый номер интервала продолжительности базового периода с относительно постоянной температурой теплоносителя ($k \in 1, \dots, 5$);

T_{jk}^ϕ – фактическая температура теплоносителя, усредненная за k -й интервал j -го базового периода;

M_{jk} – фактическое число дней входящих в k -й интервал j -го базового периода;

M_j – суммарная продолжительность j -го базового периода (в сутках), которая равна

$$M_j = \sum_k M_{jk}.$$

После подстановки расчетных формул для $\xi_{\text{факт}}$ и $\xi_{\text{расчет}}$ в формулу (5) задача поиска минимума функционала ψ сводилась к решению

системы нелинейных уравнений, которая формировалась путем приравнивания нулю частных производных минимизируемой функции по искомым параметрам. Полученная система уравнений решалась численным методом с использованием языка программирования Python.

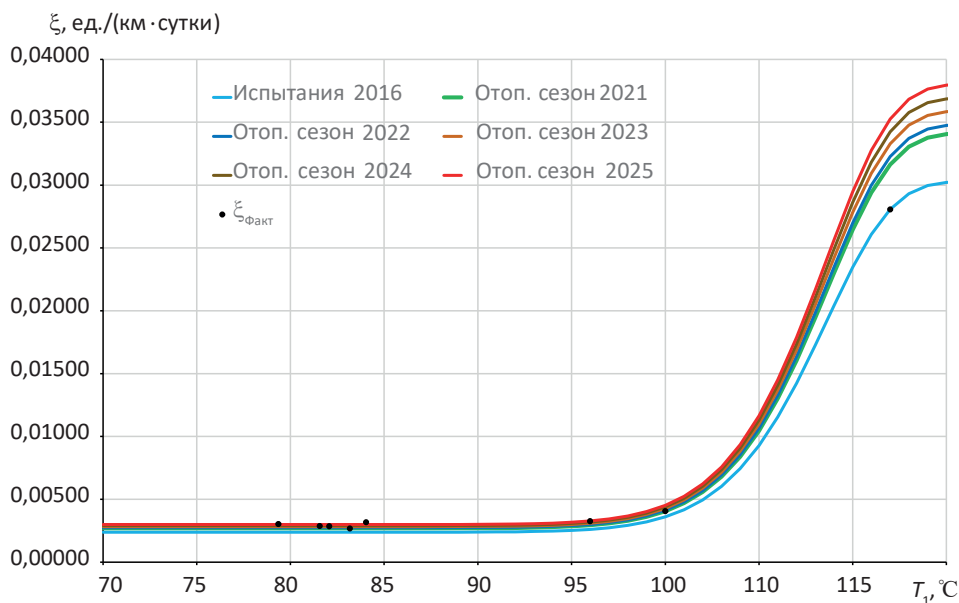
Таким образом, были определены следующие значения параметров модели (3): $\alpha = 0,0484$ ед./ (км · сут.); $\beta = 38,879$ °C; $\xi_0 = 0,00413$ ед./ (км · сут.); $\delta = 12$.

Результаты прогнозирования интенсивности отказов теплопроводов в зависимости от температуры теплоносителя, полученные с использованием разработанной модели, приведены на рисунке. Эти результаты следует учитывать для прогнозирования повреждаемости ТС при выборе температурного графика регулирования теплоотпуска от источника тепловой энергии.

Точность прогнозирования интенсивности отказов с помощью разработанной модели в заданных (исходных) диапазонах изменения температуры теплоносителя и продолжительностей эксплуатации теплопроводов в среднем составляет 3,5 %, что соответствует предварительно предъявляемым к математической модели требованиям.

Выводы

Выполненный обзор публикаций по теме исследования показал, что есть авторы, поддерживающие необходимость возврата к проектным температурным графикам регулирования в существующих крупных СЦТ, но также имеются публикации, в которых



■ Интенсивность отказов теплопроводов в зависимости от температуры теплоносителя

говорится о необходимости изменения проектного температурного графика 150/70 °С в сторону его понижения либо введения в график ограничения максимальной температуры с целью предотвращения отказов ТС в ОП и неблагоприятных социальных последствий возможных инцидентов.

На основании статистического анализа данных об отказах ТС одной из крупных ТСО Санкт-Петербурга определены параметры расчетной зависимости интенсивности отказов ТС одновременно от двух параметров: температуры теплоносителя и продолжительности эксплуатации теплопроводов.

Проведенный предварительный анализ достоверности разработанной математической модели требует уточнения по результатам планируемых испытаний ТС на максимальную температуру в зоне теплоснабжения исследуемой ТЭЦ и получения новых статистических данных. В этой связи разработанная модель прогнозирования интенсивности отказов ТС (в зависимости от температуры теплоносителя и продолжительности эксплуатации теплопроводов) требует более глубокой проверки эффективности ее применения и соответствующей доработки путем последовательного исключения принятых при ее разработке допущений.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке и актуализации схем теплоснабжения, в частности при выполнении технико-экономического обоснования выбора оптимального температурного графика регулирования, а также при формировании инвестиционных программ ТСО.

Литература

1. Миргородский А. И. Оптимальный температурный график // *Термовічок. Тепло и ЖКХ.* – 13.05.2025.
2. Папушкин В. Н., Желнов А. Ю., Щербаков А. П. Пересмотр температурных графиков с использованием модели предиктивного анализа работы оборудования в тепловой сети // *Электрические станции.* – 2022. – № 4. – С. 9–13.
3. Рожков Р. Ю., Хотяков В. В. Расчетная модель прогнозирования интенсивности отказов участков тепловых сетей на примере системы теплоснабжения АО «Теплосеть Санкт-Петербурга» // *Инженерные системы.* – 2025. – № 4. – С. 34–40.
4. Заботин И. Я., Заботин Я. И. Методы и вычислительные приемы в линейном программировании. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2014.
5. Колоколов А. А., Десятирикова М. В. Задачи и алгоритмы целочисленного программирования: анализ устойчивости: монография. – Омск: ОмГУ, 2015.
6. Прокопчина С. В. Байесовские интеллектуальные технологии в задачах моделирования закона распределения в условиях неопределенности. Монография. – М.: ИД «Научная библиотека», 2020.
7. Рожков Р. Ю., Юферев Ю. В. Прогноз динамики изменения повреждаемости тепловых сетей ТСО при различных сценариях их реконструкции // *Инженерные системы.* – 2026. – № 1. – С. 42–46.