

УДК 621.643.8

Разработка методики оценки критичности участков трубопроводов тепловых сетей по результатам инструментальной диагностики

Погорелова Илона Андреевна¹

pogorelovaia@student.bmstu.ru

Тютин Марат Равилевич^{1,2(*)}tyutin@bmstu.ru
SPIN-код: 3545-9114Гаврилин Петр Александрович³gavrilin_p_a@moek.ru
SPIN-код: 7307-3583¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия² ИМЕТ РАН, Москва, Россия³ ПАО «МОЭК», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены проблемы планирования реконструкции и капитального ремонта трубопроводов тепловых сетей (ТС) в условиях ограниченного финансирования. Проанализирована существующая методика комплексной оценки технического состояния ТС, применяемая в крупных теплоснабжающих организациях, и выявлен ее ключевой недостаток — субъективность экспертных заключений при присвоении уровня критичности. Предложено использование усовершенствованного метода экспертной оценки, представляющего собой интеграцию методов QFD (развертывание функции качества) и DEMATEL (пробная лаборатория оценки и принятия решений), для установления причинно-следственных связей между дефектами и определения их относительных весов. Разрабатываемая методика направлена на стандартизацию процесса оценки, минимизацию субъективного фактора и повышение обоснованности приоритизации участков ТС для включения в программы ремонта и реконструкции.

Ключевые слова: тепловая сеть, оценка технического состояния, критичность, ранжирование, капитальный ремонт, экспертная оценка, QFD, DEMATEL

Development of a methodology for assessing the criticality of heat network pipeline sections based on instrumental diagnostics results

Pogorelova Ilona Andreevna¹

pogorelovaia@student.bmstu.ru

Tyutin Marat Ravilevich^{1,2(*)}tyutin@bmstu.ru
SPIN-code: 3545-9114Gavrilin Petr Alexandrovich³gavrilin_p_a@moek.ru
SPIN- code: 7307-3583¹ BMSTU, Moscow, Russia² IMET RAS, Moscow, Russia³ PJSC MOEK, Moscow, Russia

Abstract. The problems of planning the reconstruction and overhaul of heat network pipelines under limited funding are considered. The existing methodology for a comprehensive

assessment of the technical condition of heat networks, used by major heat supply organizations, is analyzed, and its key drawback is identified — the subjectivity of expert opinions when assigning a criticality level. The use of an improved expert assessment method, which is an integration of QFD (Quality Function Deployment) and DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) methods, is proposed to establish cause-and-effect relationships between defects and determine their relative weights. The developed methodology aims to standardize the assessment process, minimize the subjective factor, and increase the validity of prioritizing heat network sections for inclusion in repair and reconstruction programs.

Keywords: *heat network, technical condition assessment, criticality, ranking, overhaul, expert assessment, QFD, DEMATEL*

Введение. Объемы финансирования инвестиционных и ремонтных программ теплосетевых компаний зачастую не позволяют осуществлять замену трубопроводов тепловых сетей (ТС) в плановом порядке по истечении нормативного срока службы [1]. В связи с этим возникает необходимость объективной приоритизации участков ТС для включения в программы реконструкции и капитального ремонта. Классические методы оценки инвестиционных проектов, такие как расчет NPV и IRR, не применимы к проектам реконструкции ТС [2]. Существующая методика, используемая в крупных теплоснабжающих организациях, основана на присвоении участку одного из шести стандартизованных заключений по результатам диагностики («дефектов не обнаружено», «незначительные дефекты», «значительные дефекты», «критические дефекты», «необходима реконструкция», «срочный ремонт») [3, 4]. Однако решение о присвоении категории принимается узким кругом специалистов на основе их опыта, что приводит к субъективности и затрудняет обоснование принятых решений [5]. Целью данной работы является обзор существующих подходов и разработка усовершенствованной методики оценки критичности участков ТС по результатам инструментальной диагностики для их последующего ранжирования.

Материалы и методы. В работе проведен анализ современной методологии комплексной оценки технического состояния ТС, применяемой в ПАО «МОЭК» [6]. Данная методология включает системный подход, состоящий из четырех компонентов: методического, технического, информационного и организационного. Технический компонент включает в себя различные методы неразрушающего контроля (МНК): интегральные методы контроля (акустическая томография — АТ, бесконтактная магнитная диагностика — БМД, тепловая инфракрасная аэрофотосъемка — ТИКАС, акустико-эмиссионная диагностика — АЭД) и контактные методы контроля (визуальный и измерительный контроль — ВИК, ультразвуковой контроль — УЗТ, ультразвуковая толщинометрия — УЗТ, метод импульсного вихретокового диагностирования — ИВД, определение зон концентрации напряжений — ЗКН) [6, 7].

Для преодоления субъективности существующего подхода предложено адаптировать и интегрировать методы QFD и DEMATEL [8]. Метод QFD

(Quality Function Deployment) используется для преобразования требований к техническому состоянию («ЧТО» — степени тяжести состояния от «отличного» до «критического») в конкретные контролируемые параметры («КАК» — типы и количество дефектов, выявленных при диагностике) с помощью матрицы взаимосвязей («Дом качества» — HOQ). Метод DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) применяется для выявления и количественной оценки причинно-следственных связей между различными дефектами трубопроводов (например, как отсутствие компенсатора влияет на возникновение гофра и последующего разрыва) на основе опроса экспертов. Интеграция этих методов позволяет рассчитать относительные веса каждого дефекта, учитывая их взаимное влияние, и на этой основе получить комплексную, стандартизированную оценку критичности участка ТС.

Результаты. На основе анализа существующей методики выявлен ее системный характер, но также установлен ключевой недостаток — субъективность заключения о критичности. В качестве решения предложена новая методика, основанная на интеграции методов QFD и DEMATEL. Адаптация QFD для задачи оценки ТС предполагает:

- ЧТО (WHAT's): степени тяжести состояния участка ТС (аналогично стандартизованным заключениям);
- КАК (HOW's): типы и распространенность дефектов, обнаруживаемых при инструментальной диагностике;
- матрица взаимосвязей (Relationship matrix): устанавливает, как наличие и тяжесть конкретных дефектов влияет на общую оценку состояния;
- абсолютные веса (Absolute weights): рассчитываются с учетом влияния дефектов друг на друга, определенного методом DEMATEL.

Применение DEMATEL позволит построить матрицу влияния (рис. 1) дефектов друг на друга (например, влияние дефекта «коррозия» на дефект «разрыв»), определить их причинно-следственные роли (какие дефекты являются причинами, а какие — следствиями) и рассчитать итоговые веса значимости каждого дефекта с учетом этих связей (рис. 2). Совокупность рассчитанных весов и данных диагностики позволит получить объективный численный показатель критичности для каждого участка ТС.

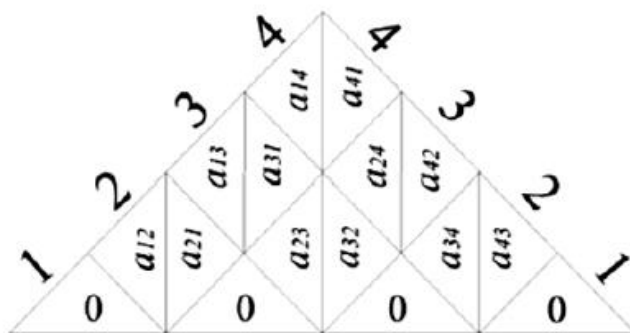


Рис. 1. Матрица влияния в HOQ

W_c	Вес	W_1	W_2	W_3	...	W_{22}
	КАКАЯ	1	2	3	...	22
SC_{1c}	Отличная	SC_{11}	SC_{12}	SC_{13}	...	SC_{122}
SC_{2c}	Хорошая	SC_{21}	SC_{22}	SC_{23}	...	SC_{222}
SC_{3c}	Удовл	SC_{31}	SC_{32}	SC_{33}	...	SC_{322}
SC_{4c}	Плохая	SC_{41}	SC_{42}	SC_{43}	...	SC_{422}
SC_{5c}	Критическая	SC_{51}	SC_{52}	SC_{53}	...	SC_{522}

Рис. 2. Пример весовых коэффициентов дефектов трубопроводов

Обсуждение полученных результатов. Предлагаемый подход позволяет формализовать и стандартизировать процесс принятия решений о критичности участков ТС, минимизируя субъективный человеческий фактор. Использование причинно-следственных связей между дефектами, установленных методом DEMATEL, повышает обоснованность назначаемых весов и, как следствие, точность итоговой оценки. Это позволит более эффективно распределять ограниченные финансовые ресурсы, направляя их на ремонт и замену наиболее критичных участков, объективно идентифицированных системой. В отличие от рассмотренных отечественных и зарубежных работ [9], в которых не исследуется критерий оценки именно по результатам инструментальной диагностики, данная методика фокусируется на этом аспекте, что определяет ее новизну и актуальность.

Заключение. Проведенный анализ подтвердил необходимость разработки новых, более объективных методов оценки критичности участков тепловых сетей. Интеграция методов QFD и DEMATEL представляется перспективным направлением для создания стандартизированной методики, основанной на данных инструментальной диагностики и учитывающей взаимное влияние дефектов. Внедрение такой методики в практику теплоснабжающих организаций позволит повысить обоснованность формирования программ реконструкции и ремонта, оптимизировать затраты и повысить надежность функционирования тепловых сетей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на апробацию предложенного метода на реальных данных, уточнение перечня дефектов и весовых коэффициентов для трубопроводов ТС.

Список источников

- [1] Коровин Р.В., Крохин С.С., Гаврилин П.А. Комплексная оценка технического состояния тепловых сетей для целей формирования программ реконструкции и ремонта. *Газовая промышленность*, 2024, № 10 (872), с. 110–113.
- [2] Рожков Р.Ю., Хейфец А.И., Хотяков В.В. Планирование работ по капитальному ремонту и реконструкции на тепловых сетях. *Новости теплоснабжения*, 2017, № 07 (203).

-
- [3] Коровин Р.В. *Программа для ранжирования трубопроводов тепловых сетей по уровню критичности*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023685612 РФ, 2025.
 - [4] Крохин С.С. Диагностика трубопроводов теплосетей ПАО «МОЭК». *Новости тепло-снабжения*, 2018, № 4 (212).
 - [5] Пашенцев А.И. Идентификация и интерпретация оценки надежности тепловой сети. *Экономика строительства и природопользования*, 2020, № 1 (74), с. 138–146.
 - [6] *СТО МОЭК. Методические указания по комплексному диагностированию и продлению срока службы трубопроводов тепловых сетей ПАО «МОЭК»*. Москва, МОЭК, 2023, 229 с.
 - [7] *Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах»*. URL: <https://www.gosnadzor.ru/industrial/equipment/acts/Приказ%20№%20478%20от%2001.12.2020.pdf> (дата обращения 11.07.2025).
 - [8] Kaddoura Kh., Zayed T. Quality Function Deployment Application in Sewer Pipeline Assessment. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Urban and Civil Engineering*, 2018, vol. 12, no. 3.
 - [9] Благочиннов А.В., Султанов М.М., Курьянова Е.В. Методика расчета энергетической эффективности, безопасности и надежности тепловых сетей. *Вестник КГЭУ*, 2023, т. 15, № 3 (59).