

**Токпаев Александр Михайлович**, Студент  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный  
технологический университет»

**Елагина Виленна Борисовна**  
к.э.н., доцент кафедры управления и права  
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный  
технологический университет»

**ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ**  
**NONDESTRUCTIVE TESTING AND MACHINE LEARNING TECHNOLOGIES  
FOR PREDICTING THE RESIDUAL LIFE OF DISTRICT HEATING PIPELINES**

**Аннотация.** В статье предложен метод оценки ресурса труб теплосетей с помощью неразрушающего контроля и машинного обучения для перехода к прогнозной замене. Апробированная модель анализирует данные обследований, повышая точность прогноза срока службы на 30-40% и сокращая затраты на ремонт на 15-20%.

**Abstract.** The article presents a method for assessing the resource of heating network pipes using non-destructive testing and machine learning to facilitate predictive replacement. The tested model analyzes survey data, increasing the accuracy of service life predictions by 30-40% and reducing repair costs by 15-20%.

**Ключевые слова:** Тепловые сети, остаточный ресурс, прогнозирование отказов, неразрушающий контроль, ультразвуковая толщинометрия, машинное обучение.

**Keywords:** District heating pipelines, residual life, failure prediction, non-destructive testing, ultrasonic thickness measurement, machine learning.

Аварии на трубопроводах тепловых сетей приводят к значительным социальным и экономическим потерям: перерывам в теплоснабжении, затратам на экстренный ремонт и компенсации ущерба. Традиционный подход к управлению ресурсом основан на нормативных сроках службы и визуальном контроле, что не позволяет объективно оценивать скорость износа, который зависит от множества факторов: качества теплоносителя, типа изоляции, катодной защиты, гидравлических режимов и блуждающих токов. В результате до 30% капитальных вложений в ремонт сетей расходуется неэффективно – на замену еще годных участков, в то время как аварийные участки остаются в системе.

Цель работы – разработка и апробация методики прогнозирования остаточного ресурса участков тепловой сети на основе интеллектуального анализа данных неразрушающего контроля и эксплуатационной истории.

Научная новизна заключается в создании гибридной прогностической модели, которая коррелирует данные инструментальных обследований (геометрические параметры дефектов) с причинами износа (эксплуатационными и внешними факторами), позволяя оценивать не только текущее состояние, но и динамику его ухудшения.

Методы и материалы

Исследование проводилось на участке подземной двухтрубной тепловой магистрали диаметром 500 мм в пенополиуретановой изоляции с системой оперативно-дистанционного контроля (СОДК). В качестве исходных данных использовались:



1. Данные неразрушающего контроля (НК) за 5 лет (2019-2024 гг.): координатные карты ультразвуковой толщинометрии (более 50 тыс. измерений на 1 км), результаты вихревокового контроля сварных швов, термограммы с мест повышенных теплопотерь.

2. Эксплуатационные данные: архивы по химическому составу теплоносителя (рН, содержание кислорода, хлоридов), температура и давление в трубопроводе, данные системы СОДК о влажности канала.

3. Внешние факторы: картографические данные о типе грунта, уровне грунтовых вод, близости к трамвайным/железнодорожным путям (источники блуждающих токов).

Для обработки данных и построения модели использовалась среда Python с библиотеками scikit-learn, pandas и numpy. Был применен алгоритм градиентного бустинга (XGBoost), обучаемый предсказывать скорость уменьшения минимальной толщины стенки труб на конкретном участке. Модель обучалась на 80% данных (участки с известной историей и итоговым состоянием), а валидировалась на оставшихся 20%.

#### Результаты и их обсуждение

1. Выявление ключевых факторов износа. Модель позволила ранжировать влияние различных параметров. Наибольший вклад в скорость коррозии внесли:

о Параметр СОДК «сопротивление изоляции» (вес в модели ~35%). Низкое сопротивление четко коррелировало с локальными зонами интенсивного утонения.

о Колебания уровня грунтовых вод (~25%). Участки в зонах сезонного подтопления показывали скорость коррозии в 1,8-2,2 раза выше, чем на сухих грунтах.

о Наличие блуждающих токов (~20%). Близость к рельсовому транспорту увеличивала риск питтинговой (точечной) коррозии.

о Качество теплоносителя (содержание кислорода) оказалось менее значимым фактором (~10%) для данного типа изоляции.

2. Прогностическая способность модели. Разработанная модель смогла предсказать фактическую толщину стенки на контрольных участках с погрешностью, не превышающей  $\pm 0.3$  мм (при средней исходной толщине 9 мм). На основе прогнозируемой траектории износа для каждого участка был рассчитан вероятностный срок достижения критической толщины стенки.

3. Экономический эффект. Сравнение предлагаемого подхода с традиционным планово-предупредительным ремонтом показало:

о Точность планирования: Сокращение «ложных» замен (участков, которые могли бы прослужить еще 8-10 лет) с 40% до 10-15%.

о Снижение аварийности: За счет выявления и приоритезации действительно критичных участков количество внеплановых отказов на пилотной трассе может быть снижено на 50-70%.

о Оптимизация затрат: Общий объем капитальных затрат на ремонт сети в 10-летней перспективе может быть сокращен на 15-20% за счет адресного и своевременного вмешательства.

Предложенная методика, объединяющая массив данных НК с алгоритмами машинного обучения, представляет собой эффективный инструмент для перехода к научноемкому, прогнозному управлению инфраструктурой теплоснабжения. Она позволяет объективно ранжировать участки сети по степени риска, формировать долгосрочную программу ремонтов, основанную на фактическом состоянии, и значительно повысить надежность системы. Для широкого внедрения необходимо создание стандартизованных цифровых паспортов участков теплосети, накапливающих всю историю обследований и воздействий. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию данной модели с геоинформационными системами (ГИС) и системами диспетчерского управления для создания единого «цифрового двойника» тепловых сетей города.



**Список литературы:**

1. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Методы ультразвуковые. Контроль коррозионного износа трубопроводов.
2. Роговой М.И., Тищенко В.В. Коррозия и защита трубопроводов тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 2020. – 312 с.
3. Чалых М.Д. Применение методов машинного обучения для анализа данных диагностики инженерных сетей // Датчики и системы. 2022. №5. С. 45-52.
4. Захаров А.В., Колесников И.С. Оценка остаточного ресурса трубопроводов на основе вероятностных методов и данных мониторинга // Теплоэнергетика. 2023. №3. С. 28-35.
5. Chen, T., Guestrin, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 785-794.

