



## КОМПЛЕКСНО-СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тепловые сети, диагностирование теплопроводов, методы неразрушающего контроля, тепловая аэрозъемка (ТАС), прогнозно-вероятностная математическая модель

**А. Н. Рондель**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора, заслуженный работник ЖКХ РФ; **Н. Н. Шаповалов**, канд. техн. наук, ведущий специалист, почетный работник ЖКХ РФ; **В. О. Чубинский**, ведущий инженер-геофизик, ООО АП «ДИССО» (Санкт-Петербург)

На основе накопленного производственного опыта, с учетом выполненных лабораторных исследований и модельно-теоретических расчетов, а также тщательного изучения основных причин возникновения отказов в тепловых сетях разработан методический подход к оценке эксплуатационного состояния подземных теплопроводов. Предлагаем ознакомиться с сутью данного подхода.

### ОБ АВТОРАХ

Авторы статьи с 1986 года занимаются неразрушающими методами контроля объектов теплоэнергетики и ЖКХ. При их активном участии в нескольких десятках городов суммарно обследовано методом тепловой аэрозъемки более 100 000 км подземных теплопроводов, выполнено инструментальное обследование не менее 200 000 м<sup>2</sup> ограждающих конструкций зданий и сооружений, более 100 дымовых труб ТЭЦ и котельных.

В самом начале нами активно использовался методический подход, основанный на периодических, как правило одноразовых, обследованиях тепловых сетей методом тепловой аэросъемки (ТАС). Однако анализ результатов работ показал, что такой сложный объект, как система транспортировки тепла, требует системного подхода, а именно мониторингового обследования, которое учитывает большое число факторов, определяющих работу технического объекта.

### Принципы системного подхода при оценке эксплуатационного состояния тепловых сетей

Системный подход при оценке эксплуатационного состояния тепловых сетей возможен и необходим, так как система транспортировки тепловой энергии соответствует практически всем основным его принципам:

- принцип конечной цели – абсолютный приоритет конечной цели, а именно возможность оценки состояния в короткие сроки всех трубопроводов тепловых сетей (тысячи километров);
- принцип единства – рассмотрение системы как целого, состоящего из совокупности элементов;
- принцип связности – рассмотрение любой части совместно с ее связями с окружением;
- принцип модульного построения – выделение модулей в системе и рассмотрение ее как совокупности модулей;
- принцип иерархии – введение ранжирования элементов;
- принцип развития – учет изменяемости системы, ее способности к развитию, расширению, накоплению информации и др.

Ориентируясь на принцип конечной цели в решении поставленной задачи, необходимо обеспечить получение достоверной информации об основных элементах системы транспортировки тепла, иметь возможность оперативно обрабатывать информацию в едином ключе и обладать методикой принятия решения на основании полученных сведений.

Исходя из принципа иерархии, первоочередное внимание следует уделить трубопроводам тепловой сети (рис. 1), которые, по общему мнению специалистов, являются системообразующим и при этом наиболее уязвимым элементом.

### Методология диагностики подземных теплопроводов

Методический подход к диагностированию подземных теплопроводов должен базироваться, по нашему мнению, на использовании методов неразрушающего контроля, обследование должно выполняться в эксплуатационном режиме (без необходимости остановки теплоснабжения и внедрения в систему транспортировки тепла) и заключаться в наблюдении на дневной поверхности над теплосетью естественных или искусственно созданных физических полей. Регистрируемые физические величины должны прямо или косвенно характеризовать эксплуатационное состояние обследуемых теплопроводов.

В процессе разработки методики диагностики нами опробованы практически все широко известные методы неразрушающего контроля, среди которых:

- метод диагностирования технического состояния трубопроводов по магнитной памяти металла;
- метод направленных звуковых волн;
- система экспресс-определения ресурса промышленного оборудования по измеренным параметрам акустической эмиссии;
- метод эмиссии акустических сигналов локальными элементами стенки трубы и др.

Успешно решая локальные задачи, ни один из рассмотренных методов неразрушающего контроля не дал ожидаемого результата в плане оперативного получения необходимой информации о состоянии обширной сети теплопроводов городской системы транспортировки тепла для принятия своевременных мер по обеспечению качественного и надежного теплоснабжения потребителей. Поэтому был использован комплексный подход к подбору неразрушающих методов и средств диагностирования тепловых сетей.

### Комплексный подход для диагностирования тепловых сетей

Суть нашего комплексного подхода состоит в следующем. Подземный теплопровод рассматривается как источник различных физических полей. При этом реализуется руководящая идея, связанная с решением прямой и обратной геофизических задач. Прямая геофизическая задача состоит в определении физического поля по заданным источникам поля и параметрам исследуемого объекта. Обратная геофизическая задача заключается в определении состояния исследуемого объекта по наблюдаемым физическим полям:

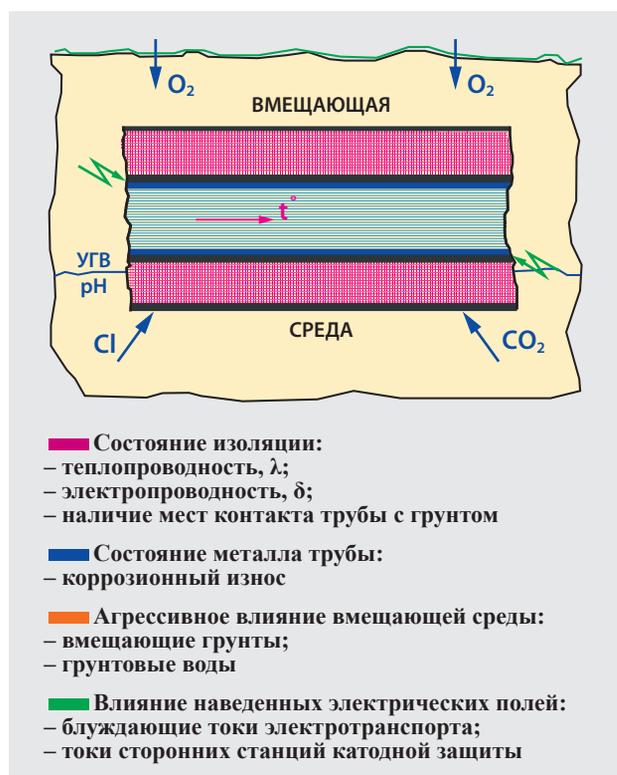
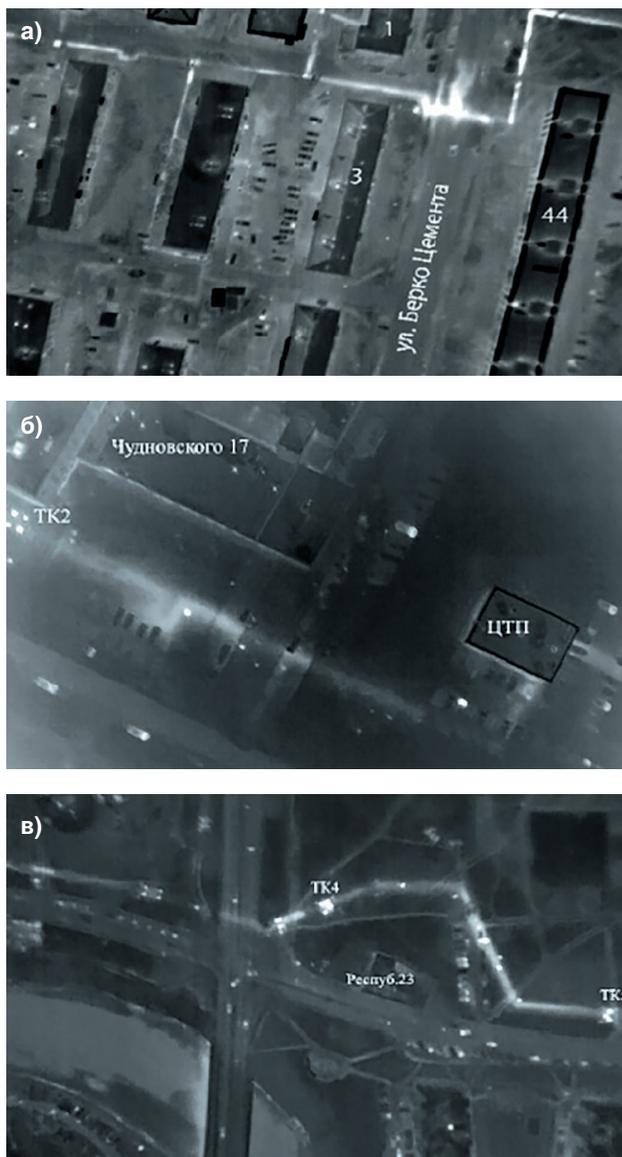


Рис. 1. Модель подземного теплопровода и основные параметры, определяющие его состояние



**Рис. 2.** Тепловые снимки аномальных участков тепловых сетей. Аномалии обусловлены: а) утечками теплоносителя; б) нарушением теплоизоляции труб; в) нарушением работы системы сопутствующего дренажа

- по теплопроводу транспортируется теплоноситель в виде горячей воды с температурой от 60 до 120 °С. Процесс старения изоляционной оболочки теплопровода отражается повышенными значениями температуры на земной поверхности над теплопроводом. Таким образом, состояние теплоизоляционного слоя труб возможно контролировать с помощью методов теплотрии, которые также дополнительно дают важную информацию о состоянии дренажной системы;

- металлические трубы теплопроводов в случае подключения к ним источников электрического тока могут рассматриваться как линейные проводники, электрическое или магнитное поле которых поддается исследованию на дневной поверхности методами инженерной геофизики. По характеру распределения этого поля можно сделать заключение о состоянии гидроизоляционного покрытия

трубопровода и о наличии зон гальванического контакта металла труб с грунтом;

- поскольку процесс коррозии стальных и железных конструкций имеет в основном электрохимический характер, это дает основание использовать для регистрации и оценки коррозионных процессов на подземных теплопроводах электрометрические методы, базирующиеся на наблюдении естественных электрических полей, создаваемых во вмещающей среде токами электрохимического происхождения;

- при нарушении сплошности трубопровода и выходе теплоносителя за его пределы создаются акустические сигналы, которые возможно фиксировать с помощью методов акустометрии.

### Используемые инструментальные методы неразрушающего контроля

На сегодняшний день при обследовании подземных участков тепловых сетей диагностическими методами нами используются следующие группы инструментальных методов неразрушающего контроля:

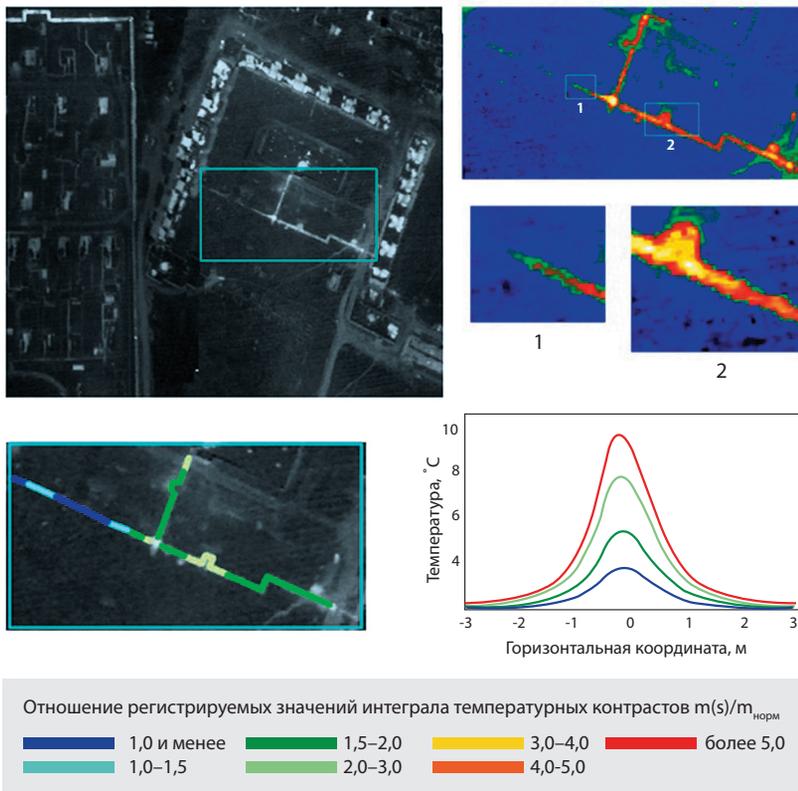
- теплотрия: 8,0–14,0 мкм (тепловая аэрозьемка, наземное тепловизионное и пирометрическое обследование);
- акустометрия: 6–44 кГц (акустолокация, акусто-корреляционный метод);
- электрометрия: (измерения на постоянном и переменном токе (50 Гц, 625 Гц) методами инженерной геофизики).

Каждый из этих методов в отдельности не способен решить поставленную задачу на 100 %. Однако подход комплексирования методов позволяет совокупно получить информацию, достаточную для оценки эксплуатационного состояния подземных теплопроводов, на основании математической обработки результатов всех используемых методов диагностики.

При разработке технологии комплексного диагностирования нами также используется системный подход.

#### Метод тепловой аэрозьемки

Учитывая значительную пространственную разобщенность такого объекта обследования, как городская система теплоснабжения, первоначальную информацию получаем теплотрическим методом ТАС (метод тепловой аэрозьемки) с применением пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Целесообразность применения ТАС для контроля состояния тепловых сетей (рис. 2) обусловлена оперативностью проведения обследования, высокой степенью достоверности получаемых данных и возможностью их использования на разных стадиях принятия управленческих решений (например, при устранении причин сверхнормативной подпитки или формировании адресной программы ремонтных работ в межотопительный период). Использование БПЛА существенно удешевляет проведение обследования, и тепловая аэрозьемка может выполняться по заявкам ресурсоснабжающих организаций практически в режиме мониторинга. Такой регламент выполнения ТАС позволяет на самой ранней стадии выявлять регулярно возникающие утечки теплоносителя, своевременно их устранять, исключая возможность аварий с чрезвычайными последствиями и ми-



**Рис. 3.** Пример классификации аномальных участков тепловых сетей по материалам ТАС (утечка теплоносителя, затопление канала теплопровода)

минимизируя потери тепловой энергии, что в конечном счете и определяет высокую экономическую эффективность метода.

Результаты ТАС обрабатываются в полуавтоматическом режиме, с использованием собственных компьютерных программ, позволяющих классифицировать состояние подземного теплопровода по параметрам температурного поля. Разборка температурных аномалий выполняется на основании расчетного параметра  $m(s)/m(б)$  – отношения регистрируемых значений интеграла температурных контрастов (рис. 3).

### Методы акустометрии

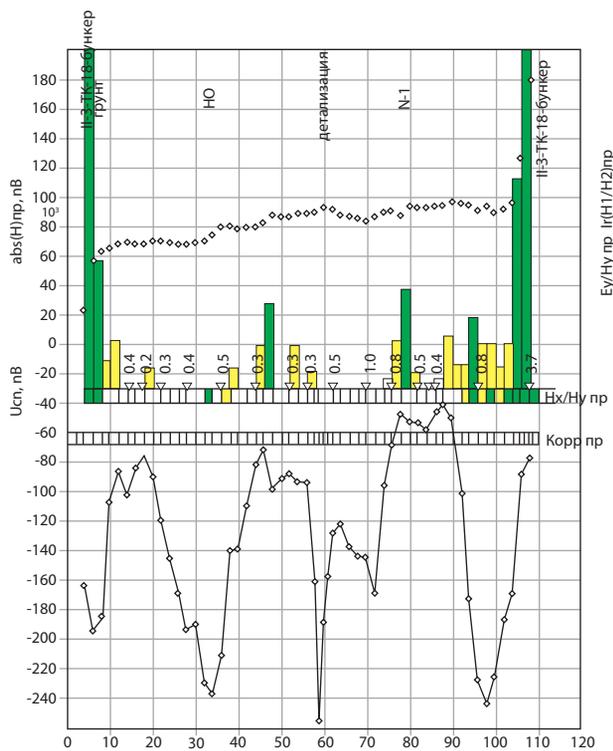
В соответствии с принципом приоритетности при решении поставленных задач первоначально все усилия направляются на поиск и регистрацию местоположения существующих утечек теплоносителя. Для заверки температурных аномалий, которые при компьютерной разбивке классифицируются как возможные утечки, используются методы акустометрии (рис. 4). Отличительной особенностью этих работ является тот факт, что все измерения выполняются с использованием собственных акустометрических приборов, созданных с учетом накопленного опыта проведения акустических обследований.

### Методы электрометрии

На участках тепловых сетей, которые при компьютерной разбивке классифицируются как возможные места подтопления, намкания и разрушения изоляции, то есть места, благоприятные для развития наружной коррозии труб, работы выполняются методами электрометрии (рис. 5). Как правило, ареной развития интенсивных коррозионных процессов являются зоны нарушения изоляционного покрытия труб. Максимальная активность коррозионных процессов наблюдается на локальных участках, где изоляция разрушена, а металлическая труба контактирует с грунтом. Коррозионная уязвимость подземных теплопроводов резко возрастает под влиянием сторонних электромагнитных полей, которыми могут оказаться поля природного и/или техногенного происхождения. В местах, где электрические токи стекают с оголенной металлической поверхности трубопровода, образуются анодные зоны – очаги электрокоррозии, в пределах которых и происходит наиболее энергичный вынос металла.



**Рис. 4.** Наземное обследование аномальных участков методами акустометрии



**Рис. 5.** Обследование аномальных участков тепловых сетей методами электрометрии

Для оценки состояния гидроизоляции труб и выявления локальных мест электрического контакта поверхности металлического трубопровода с грунтом нами используется метод заряженного тела (метод заряда, МЗ). Для регистрации физических полей, обусловленных протеканием в грунте электрических токов электрохимического происхождения, возникающих в процессе коррозии металла, проводятся измерения по методу естественного электрического поля (метод ЕП).

Работы методами электрометрии выполняются на дневной поверхности, по трассе теплопровода, без остановки теплоснабжения. Существенным достоинством электрометрических методов является тот факт, что обследование может проводиться и в летнее время, при отключенных тепловых сетях. Методы электрометрии также успешно используются для определения коррозионной активности

грунта посредством измерения удельного электрического сопротивления и для регистрации так называемых блуждающих токов.

В результате электрометрических работ на каждом обследованном участке выделяются зоны развития наружной коррозии труб, оценивается интенсивность коррозионных процессов и указывается местоположение шурфов для определения остаточной толщины стенки трубы. Также для каждого участка устанавливается факт наличия или отсутствия электрохимической защиты.

### Параметры, характеризующие процесс разрушения подземных теплопроводов

На конечном этапе, при оценке эксплуатационного состояния подземных теплопроводов учитываются как физические, так и статистические параметры, качественно или количественно характеризующие процесс разрушения теплопроводов:

**1. Состояние изоляционного покрытия** – характеризует доступность металлических труб агрессивному воздействию вмещающей среды. Оценивается по физическим параметрам температурного и электромагнитного поля.

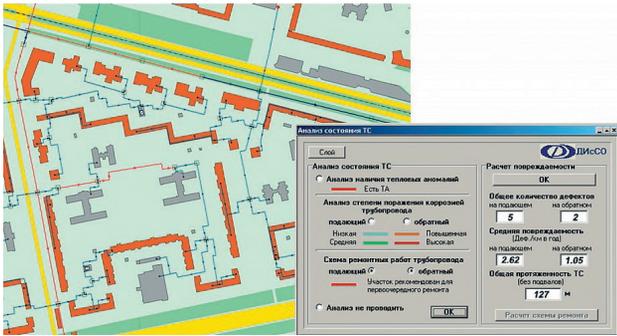
**2. Степень коррозионного поражения труб** – характеризует наличие коррозионных зон и интенсивность коррозии на наружной поверхности трубопроводов. Оценивается при проведении инструментального обследования методами электрометрии.

**3. Степень агрессивного воздействия внешней среды с учетом конструкционных параметров и технологических особенностей теплопровода** – характеризует интегральное агрессивное воздействие внешней среды на процесс разрушения изоляции и металла трубопроводов. Этот показатель является многофакторным, его количественную характеристику возможно и достаточно оценивать таким обобщенным параметром, как дефектность (аварийность, повреждаемость). Опыт эксплуатации теплопроводов показывает, что трубопроводы подземной прокладки, расположенные в коррозионно-опасных грунтах, вблизи источников мощных электрических полей (трамвайные линии, линии метро, в ряде случаев – сторонние станции катодной защиты), рядом с оживленными автомобильными магистралями (стоки агрессивных реагентов плюс механические нагрузки), подвержены ускоренному коррозионному износу в значительно большей степени, чем трубопроводы, проложенные в песчаных грунтах с низким уровнем грунтовых вод и в стороне от возможных электрических помех.

Дефектность следует оценивать количеством дефектов на единицу длины за определенный временной промежуток (деф./км•год).

**4. Срок эксплуатации (годы)** – определяет возможный период разрушительного воздействия на теплопровод.

Представленные сведения о многообразии факторов, влияющих на эксплуатационное состояние теплопроводов, неизбежно приводят к выводу о целесообразности вероятностного прогноза локализации участков тепловых сетей, требующих ремонта. Поэтому, исходя из принципа конечной цели, при оценке эксплуатационного состояния теплопроводов мы используем статистические методы обработки



**Рис. 6.** Фрагмент адресной программы ремонтных работ, составленной на основании классификации эксплуатационного состояния подземных теплопроводов

данных. Результаты всех видов съемок, а также фактические материалы по дефектности и сроку эксплуатации обследуемых участков тепловых сетей обрабатываются с использованием методов математической статистики.

### Оценка степени надежности тепловых сетей с помощью прогнозно-вероятностной математической модели

Классификация эксплуатационного состояния подземных теплопроводов выполняется путем оценки степени надежности. Одной из важнейших количественных характеристик надежности является вероятность безотказной работы, однако в эксплуатационной практике удобнее говорить не о вероятности безотказной работы, а о вероятности отказа материального объекта, используемого оборудования и т. п. Применительно к тепловым сетям отказом является возникновение утечки теплоносителя в результате нарушения сплошности трубы.

Нами разработана прогнозно-вероятностная математическая модель для расчета показателя «Вероятность отказа,  $P_s(u)$ » участка тепловой сети, на основании которого проводится ранжирование участков по их эксплуатационному состоянию с целью формирования рекомендаций для адресной программы ремонтных работ (рис. 6). В соответствии с байесовской теорией в зависимости от поставленной задачи и количества рассматриваемых гипотез ( $n$ ) пороговая область ограничивается значениями параметра  $P_s(u) = 1/n$ . Чаще всего по требованию заказчика обследованные участки тепловых сетей делятся на две категории:

- аварийно-опасные участки, требующие ремонта;
- надежные участки, пригодные для эксплуатации.

На основании выданных рекомендаций специалисты предприятия-заказчика формируют адресную программу ремонта тепловых сетей на ближайший ремонтный период. Безусловно, в ремонт попадают не все 100 % рекомендованных участков, так как у предприятия, эксплуатирующего тепловые сети, существуют дополнительные показатели и ограничения, влияющие на отбор участков для ремонта (например, выделенный бюджет, необходимость вывода из эксплуатации участков тепловых сетей, превысивших нормативный срок службы, и пр.).

Участки, рекомендованные в ремонт, но не попавшие в адресную программу, остаются в эксплуатации при условии

проведения на них периодического инструментального контроля состояния в режиме мониторинга.

Достоверность прогноза возникновения отказов и эффективности выбора участков тепловой сети для первоочередной замены оценивается по значениям показателя дефектности в последующий эксплуатационный период (числу утечек за год, следующий за датой расчета, на единицу длины теплопровода). При этом из рассмотрения исключаются реконструированные участки.

Разработанная методика оценки эксплуатационного состояния тепловых сетей, по данным специалистов крупнейшей теплоснабжающей компании Санкт-Петербурга, характеризуется высокой достоверностью (не ниже 70 %).

Для расчета прогнозно-вероятностного показателя «Вероятность отказа» сейчас успешно эксплуатируется диагностический модуль, созданный в виде плагина для геоинформационной системы. В настоящее время начата разработка новой версии диагностического модуля, который будет представлять собой веб-сервис с открытым интерфейсом (API), что сделает его доступным для любых информационных систем, используемых теплоснабжающими предприятиями. Все материалы и результаты расчетов будут доступны пользователям в режиме реального времени для формирования как адресной программы ремонтных работ, так и других управленческих программ, а также составления отчетной документации. Более детально расскажем об этой разработке в следующей публикации.

### Выводы

Основанная на системном подходе комплексная методика инструментального обследования подземных теплопроводов методами тепловой аэросъемки, наземными пирометрическим, акустическим, акусто-корреляционным и электрометрическим методами может быть в полной мере использована как для оперативного определения мест существующих дефектов, так и для получения необходимой информации при оценке эксплуатационного состояния подземных теплопроводов.

Применение метода ТАС с использованием БПЛА существенно удешевляет проведение обследований. Тепловая аэросъемка может выполняться в режиме мониторинга, что повышает эффективность результатов за счет перехода от статических параметров к динамическим.

Разработанная прогнозно-вероятностная математическая модель позволяет успешно решать такую задачу, как ранжирование участков тепловых сетей по степени надежности с целью формирования адресной программы ремонтных работ.

Положительный опыт применения программного модуля для расчета прогнозно-вероятностного показателя «Вероятность отказа» в виде плагина для геоинформационной системы показывает целесообразность разработки новой версии диагностического модуля на основе веб-технологий с открытым интерфейсом, что сделает его доступным для любых информационных систем, используемых предприятиями тепловых сетей. ■