



ЭФФЕКТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОДЗЕМНОГО ТЕПЛОПРОВОДА ДЛЯ СРАВНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ МОНИТОРИНГОВОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОЙ АЭРОСЪЕМКИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловые сети, методы диагностики подземных теплопроводов, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), тепловая аэросъемка (ТАС)

В. В. Исаев, канд. техн. наук, генеральный директор, почетный работник ЖКХ РФ; **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; **К. Г. Волостных**, ведущий специалист, ООО АП «ДисСО», Санкт-Петербург

Ранее, в публикации «Комплексно-системный подход к оценке эксплуатационного состояния подземных теплопроводов» [1], было показано, как можно эффективно использовать результаты комплексной диагностики подземных теплопроводов, полученные различными методами, для оценки технического состояния тепловых сетей с целью определения мест дефектов и получения необходимой информации для ранжирования участков тепловых сетей по степени надежности. Данная статья является логическим продолжением [1] – в ней представлен опыт обработки первичных материалов одного из наиболее эффективных способов диагностики подземных теплопроводов – тепловой аэросъемки.

Метод тепловой аэросъемки (ТАС) для обследования подземных участков тепловых сетей централизованной системы теплоснабжения широко применяется в России с 90-х годов прошлого столетия. Технология работ и аппаратура для диагностирования подземных теплопрово-

дов методом тепловой аэросъемки неоднократно описана и хорошо известна. Отличительным фактором настоящего времени является широкая доступность тепловизоров различных модификаций, а также возможность использования для выполнения ТАС беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Применение БПЛА значительно удешевляет обследование подземных теплопроводов этим методом, что позволяет выполнять его в режиме мониторинга, то есть неоднократно в течение отопительного периода. При мониторинговом режиме обследования возможна оценка динамики развития регистрируемых температурных аномалий. Использование динамических характеристик существенно повышает достоверность результатов обследования.

Факторы, усложняющие использование материалов мониторингового тепловизионного обследования

Серьезной проблемой в использовании материалов мониторингового тепловизионного обследования является тот факт, что температурное поле от подземной теплотрассы на земной поверхности зависит от двух факторов:

- плотности излучаемого потока тепловой энергии;
- внешних метеоусловий, изменяющих как температуру поверхности грунта в результате изменения коэффициента теплообмена α , так и температуру воздуха T_a .

Если параметры теплотрассы и теплофизические свойства грунта можно считать постоянными, то дополнительный фактор теплообмена, обусловленный воздействием внешних метеоусловий, является осциллирующим, слабо предсказуемым. В результате температурное поле подземных линейных источников с постоянной температурой оказывается нестационарным, причем наибольшим изменениям оно подвергается на поверхности грунта. По выражению ученого А. Ф. Чудновского¹, температура поверхности грунта является «...труднодоступной измерению, неопределенной по смыслу, крайне пестрой по величине». Поэтому значения температуры на поверхности грунта над теплотрассой некорректно сравнивать между собой, если ее измерения выполнены в разные временные периоды при различных метеоусловиях.

Для сравнения результатов разновременных наблюдений температурного поля, создаваемого подземным теплопроводом на дневной поверхности, желательно оперировать устойчивыми параметрами, не зависящими от времени наблюдения.

Отношение интегралов регистрируемых температурных контрастов – эффективная энергетическая характеристика температурного поля подземного теплопровода в нестационарных условиях

Для выбора эффективной энергетической характеристики температурного поля подземного теплопровода в нестационарных условиях был выполнен значительный объем теоретических, модельных и экспериментальных работ. Полученные результаты привели к выводу, что для сравнительной оценки материалов мониторингового обследования тепловых сетей методом ТАС целесообразно оперировать таким параметром, как отношение интегралов регистрируемых температурных контрастов. Расскажем об этом параметре более подробно.

Методика и результаты расчета

Температурное поле от подземного теплопровода формируется на земной поверхности в результате потерь тепловой энергии. Линейная плотность теплового потока $Q_L(s)$ для стационарного теплового поля (то есть тепловые потери на участке линейного подземного теплопровода) определяется по формуле (1) (см. Формулы).

На рис. 1 схематично показан разрез грунта, перпендикулярного оси подземного теплопровода, и график температуры на поверхности грунта. Разность температур покрывающей поверхности в точке x и измеренной на такой же поверхности вне зоны влияния подземного теплопровода (так называемой фоновой) является температурным контрастом: $T(x) - T(\infty)$. Величина полного интеграла температурных контрастов $M(s)$ – это площадь под графиком температуры в бесконечных пределах изменения координаты x , в обе стороны от теплопровода, – определяется по формуле (2).

Теоретически путем аналитического решения уравнений эффективной теплопроводности для интеграла температурных контрастов по горизонтальной координате вдоль прямой, перпендикулярной оси линейного теплопровода, доказано следующее: **при неизменном значении интеграла температурных контрастов на глубине заложения теплопровода и постоянной величине коэффициента теплообмена α на поверхности грунта интеграл температурных контрастов является стационарной величиной на любой глубине, в том числе и на дневной поверхности.** Как уже отмечалось, коэффициент теплообмена α очень сильно зависит от внешних метеоусловий и является нестабильной величиной. Определение в реальных условиях осциллирующей величины коэффициента теплообмена – задача крайне затруднительная.

Однако из формулы (1) следует, что при одновременной регистрации параметров температурного поля на поверхности грунта с неизменными свойствами величина отношения тепловых потерь для двух разных зон теплопровода $Q_L(s)/Q_L(b)$ будет равна отношению интегралов температурных контрастов – см. формулу (3). Таким образом мы смогли избавиться от необходимости определять абсолютную величину коэффициента теплообмена α . Уже это обстоятельство предопределяет значительно более высокую точность опре-

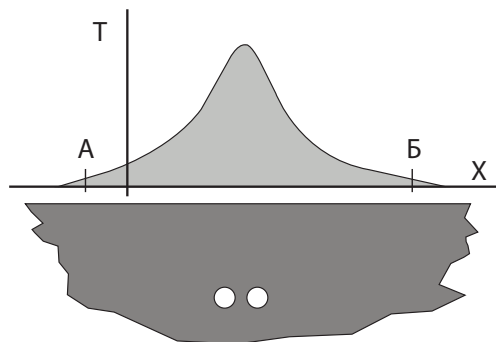


Рис. 1. Схематичный разрез грунта перпендикулярно оси подземного теплопровода и график температуры на поверхности грунта по оси x

¹ Абрам Филиппович Чудновский (1910–1985) – советский агрофизик. Создал и детально разработал теплофизику почв. Автор основополагающих идей в учении о тепло- и массообмене в агроэкологической системе «почва–растения–атмосфера».

Формулы

Обозначение формулы	Формула
(1)	$Q_L(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} K \cdot (T(x) - T_b) \cdot dx = \alpha \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} (T(x) - T(\infty)) \cdot dx = \alpha \cdot M(s)$
(2)	$M(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} (T(x) - T(\infty)) \cdot dx$
(3)	$Q_L(s) / Q_L(b) = M(s) / M(b)$
(4)	$M(s) / M(b) = p \cdot m(s) / m(b) + 1 - p$
Обозначения в формулах	

$Q_L(s)$ – линейная плотность теплового потока для стационарного теплового поля на участке подземного теплопровода с координатой s , Вт/м

s – координата вдоль линейного теплопровода

x – горизонтальная координата на поверхности грунта, расположенная перпендикулярно линии трубопровода

$T(x)$ – температура поверхности грунта в точке x , °C

$T(\infty)$ – фоновая температура поверхности грунта на большом удалении от теплопровода, °C

T_b – температура атмосферного воздуха, °C

α – коэффициент теплообмена между поверхностью грунта и воздухом, включающий в себя коэффициент конвективной теплоотдачи и коэффициенты линейной аппроксимации теплоотдачи излучением и молекулярным переносом (испарением)

$M(s)$ – полная величина интеграла температурных контрастов на участке подземного теплопровода с координатой s

$Q_L(b)$ – линейная плотность теплового потока на базовом участке, в качестве которого выбирается участок земной поверхности над теплопроводом с однотипным покрытием и минимальными (по сравнению с координатой s) тепловыми потерями, Вт/м

$M(b)$ – полная величина интеграла температурных контрастов на базовом участке

p – коэффициент, зависящий от модели теплопровода: геометрических размеров (прежде всего диаметра труб и толщины покрывающего слоя грунта), изоляционного покрытия труб и теплотехнических свойств грунта, приборной чувствительности используемой регистрационной аппаратуры и точности регистрации температурных контрастов

$m(s)$ и $m(b)$ – интегралы регистрируемых температурных контрастов, регистрируемых на земной поверхности, м•°K

деления отношения $M(s)/M(b)$, чем абсолютных значений параметров температурного поля. Величины $M(s)$ и $M(b)$ могут быть определены в соответствии с формулой (2), с использованием материалов тепловой аэросъемки. Однако по опыту наших работ установлено, что реально измерить температуру $T(x)$ возможно только на конечном отрезке $[AB]$ (рис. 1).

Существует ряд причин, по которым выполнить регистрацию температурных контрастов от подземного теплопровода в бесконечных пределах, то есть определить полную величину интеграла температурных контрастов $M(s)$, практически невозможно. Это и ограниченная чувствительность существующих инфракрасных приборов, и большая протяженность зоны малых значений температурных контрастов на поверхности грунта при удалении от подземного теплопровода, и наложение помех, обусловленных изменением реальных свойств поверхности и приповерхностного слоя грунта. Нельзя не считаться и со спецификой объекта обследования. Городские тепловые сети располагаются в кварталах жилой застройки,

где соседствуют с высотными зданиями, которые создают реальные помехи в виде теней, засветок и т. п.

В таких условиях практически невозможно выполнить регистрацию температурных контрастов в бесконечных пределах от оси подземного теплопровода. Как правило, измеряемая часть интеграла температурных контрастов $m(s)$ соответствует пределам изменения x на локальном отрезке и доступная к наблюдению (так называемая видимая) часть $m(s)$ оказывается существенно меньше ее полного значения $M(s)$.

Модельными расчетами, с помощью пакета компьютерных программ Elcult и самостоятельно разработанной программы, установлено, что $M(s)$ почти линейно зависит от $m(s)$, а отношение полных значений интегралов температурных контрастов линейно связано с отношением интегралов регистрируемых температурных контрастов – см. формулу (4).

Согласно расчетам, величина коэффициента p находится в пределах от 0 до 1, и тем ближе к 1, чем большая часть температурных контрастов поддается регистрации. Помимо параметров модели подземного теплопровода, p зависит от базовой величины $m(b)$.

Значения $m(b)$ следует выбирать минимальными, наиболее близкими к нормативной величине. Многочисленные расчеты зависимостей $M(s)$ от $m(s)$ для различных моделей подземных теплопроводов показали, что наиболее типичные значения p находятся в пределах 0,5–0,6.

Результаты натурных измерений

Чтобы подтвердить возможность использования величины отношения интегралов регистрируемых температурных контрастов $m(s)/m(b)$ в качестве самостоятельной устойчивой энергетической характеристики подземного теплопровода, был выполнен большой объем натурных измерений методами пирометрии. Для определения отношения $m(s)/m(b)$ при различном значении коэффициента теплообмена α были проведены измерения температурных контрастов на земной поверхности различного типа над теплопроводами с условным диаметром труб 300 и 600 мм. Измеренные интегралы температурных контрастов и их отношение для различных типов поверхности приведены в таблице для теплопроводов диаметром 600 мм.

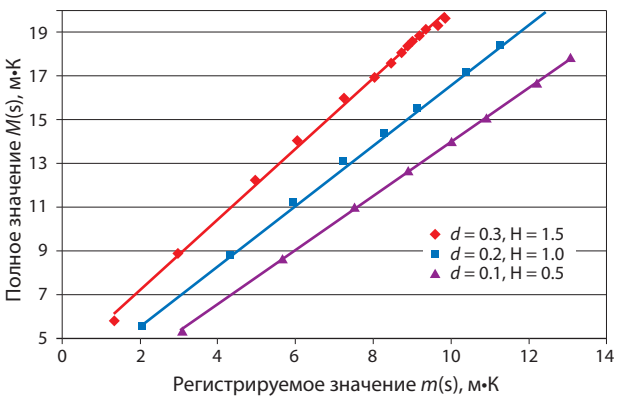


Рис. 2. Взаимосвязь между полной и регистрируемой величиной интеграла температурных контрастов на поверхности грунта над подземным теплопроводом в зависимости от диаметра труб теплопровода d (м) и глубины до центра труб H (м)

Таблица Соотношение интегралов температурных контрастов $m(s)/m(б)$, регистрируемых на земной поверхности различного типа при отсутствии ветра

Тип земной поверхности над подземной теплотрассой диаметром 600 мм	Интеграл регистрируемых температурных контрастов, м°K		Величина отношения $m(s)/m(б)$
	$m(s)$	$m(б)$	
Влажное асфальтовое покрытие (без ветра)	11,3	6,6	1,71
Влажная гравийная дорожка (без ветра)	10,4	6,3	1,65
Влажное травяное покрытие (без ветра)	8,5	4,8	1,77
Влажное грунтовое покрытие (без ветра)	7,9	4,5	1,76

Также были выполнены натурные наземные измерения при различных метеоусловиях. Измерения проводились в течение длительного периода (пять дней) и подтвердили факт стабильности во времени отношения величин интегралов температурных контрастов. Все значения $m(s)/m(б)$, зарегистрированные в разное время измерений, оказались равными в пределах погрешности их определения (10 %). Сами же значения $m(s)$ изменились почти в два раза в течение пяти дней из-за существенного изменения метеорологических условий.

Следовательно, отношение интегралов регистрируемых температурных контрастов $m(s)/m(б)$ может рассматриваться как устойчивая энергетическая характеристика подземного теплопровода и сравниваться для разных сезонов или этапов съемки при оценке динамики развития температурных аномалий. **Важно, чтобы температурные контрасты $m(s)$ и $m(б)$ были зарегистрированы при одинаковых метеоусловиях на однотипной земной поверхности.**

При соблюдении вышеперечисленных условий для определения отношения $m(s)/m(б)$ по данным тепловизионной аэросъемки не надо определять термодинамическую температуру земной поверхности. В небольшом диапазоне изменения температуры поверхности грунта (около 10 °C) яркость изображения точки поверхности практически линейно зависит от ее температуры. **Тогда отношение интегралов температурных контрастов равно отношению интегралов яркостных контрастов на тепловом изображении. А это означает, что не нужно определять абсолютные величины коэффициента излучения поверхности, излучения неба (верхней полусферы), аппаратные передаточные характеристики и выполнять сравнение яркостной температуры с эталонной термодинамической.**

При использовании такого способа диагностики подземных теплопроводов, как тепловая аэросъемка, отношение интегралов регистрируемых температурных контрастов можно определить для любого локального участка обследуемой системы теплоснабжения. Анализируя динамику изменения отношения $m(s)/m(б)$ на конкретном участке тепловой сети за определенный период, возможно получить важную информацию о техническом состоянии подземных теплопроводов.

Примеры динамики развития тепловых аномалий

Примеры сравнения величин яркостной температуры грунта, зарегистрированных в ходе выполнения разновременных обследований методом ТАС тепловых сетей Санкт-Петербурга, а также сравнение расчетных значений реги-

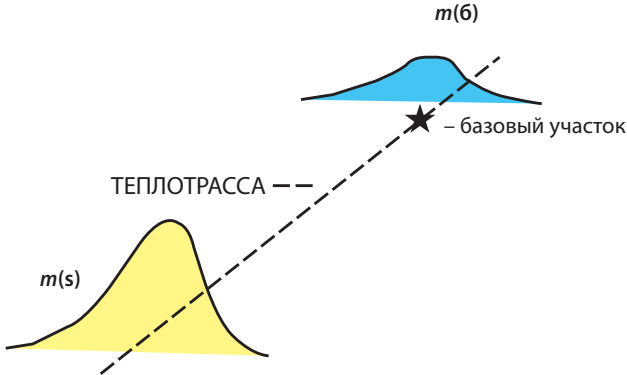


Рис. 3. Регистрируемые величины интегралов температурных контрастов как энергетическая характеристика подземного теплопровода

стрируемых величин интегралов температурных контрастов $m(s)/m(б)$, рассчитанных по яркостной температуре грунта, показаны на рис. 4. Обследование методом ТАС выполнено 21 ноября 2018 года, а второе – 24 ноября 2019 года, при более низких температурах атмосферного воздуха. Сравнение изменения величин яркостных температур грунта в выявленной аномальной зоне (угол поворота теплотрассы) указывает на их отрицательную динамику: 4,5 °C в ноябре 2018 года против 3,2 °C в ноябре 2019 года.

Несмотря на то что в абсолютных значениях температуры грунта аномалия уменьшилась, сравнение величин $m(s)/m(б)$ показывает их устойчивый рост (с 1,9 до 3,3) за наблюдаемый период, что, скорее всего, связано с ростом интенсивности теплового потока над аномальным участком теплопровода и может быть объяснено развитием деструктивных процессов в теплопроводе. Действительно, в скором времени в этом месте была зарегистрирована и устранена утечка теплоносителя.

Целесообразность использования предлагаемой эффективной энергетической характеристики при мониторинге состояния подземных теплопроводов

Вышеописанный методический подход активно используется нами при классификации состояния подземных участков тепловых сетей в ходе детальной компьютерной обработки материалов ТАС. Более чем 30-летний опыт выполнения обследования тепловых сетей методом ТАС показывает, что из общего количества зарегистрированных тепловых аномалий не

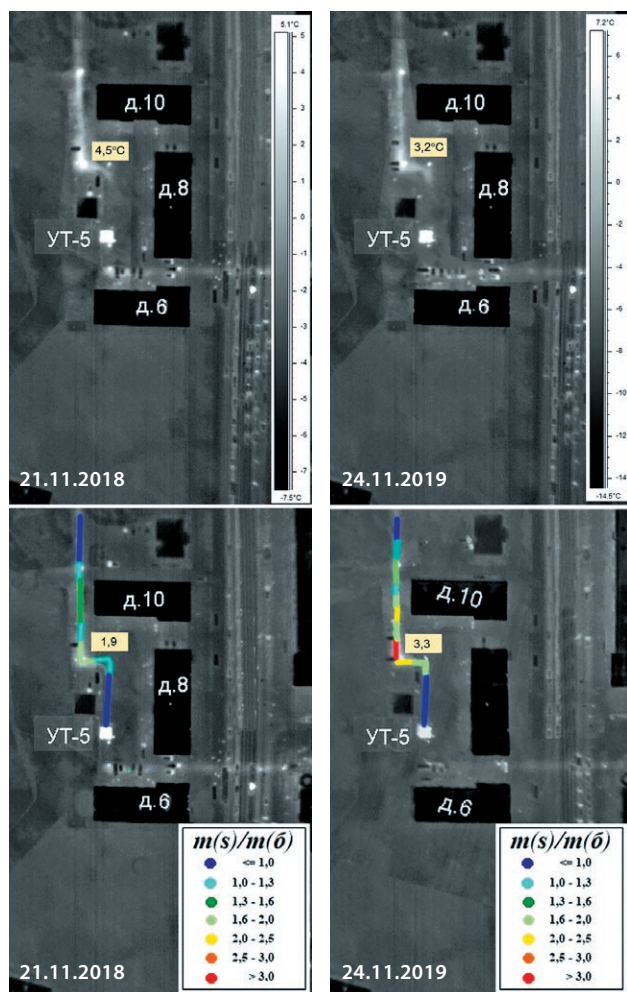


Рис. 4. Примеры сравнения величин яркостной температуры грунта, зарегистрированных в ходе выполнения разновременных обследований методом ТАС тепловых сетей Санкт-Петербурга, а также сравнение величин интегралов регистрируемых температурных контрастов $m(s)/m(b)$, рассчитанных по яркостной температуре грунта

более 20 % обусловлены скрытыми утечками теплоносителя. Остальные аномалии связаны с участками теплопровода, где протекают различные деструктивные процессы, которые в конечном результате приводят к образованию новых дефектов.

В ходе эксплуатации различные физико-химические воздействия окружающей среды приводят к увеличению эксплуатационной влажности изоляции, а значит, и к снижению ее защитных свойств и в конечном итоге к созданию условий для возникновения дефектов в результате коррозии наружной поверхности металлического трубопровода. Как правило, в таких местах возникают мелкие свищи размером до 1 мм², которые в дальнейшем приводят к образованию крупных дефектов.

К сожалению, все существующие на настоящее время приборы наземного поиска дефектов имеют ограниченный порог чувствительности. Как правило, уверенно фиксируются скрытые утечки теплоносителя объемом не менее 0,5 м³/ч при рабочем давлении в системе 3 кг/м² и более. Скрытые утечки в виде микросвищей зафиксировать практически невозможно. Опыт эксплуатации свидетельствует, что очень часто такие

дефекты не выявляются при проведении гидравлических и температурных испытаний. Однако во время пиковых нагрузок в отопительный период, когда давление и температура в сетях максимальны, именно здесь происходят раскрытия сварных соединений или разрывы труб. Кроме опасности возникновения аварийной ситуации в самый напряженный период отопительного периода такие дефекты являются одной из главных причин потерь тепловой энергии при транспортировке.

Результатом существования таких мелких скрытых утечек теплоносителя является постепенное увлажнение, разуплотнение и нарушение сплошности грунта в зоне скопления теплоносителя. То есть в таких местах со временем может образоваться подземная воронка, заполненная горячей жидкостью или кипятком, что с большой вероятностью приведет к аварии с чрезвычайными последствиями.

Единственный способ избежать подобных аварийных ситуаций – это круглогодичный мониторинг системы транспортировки тепла методом ТАС и оценка динамики развития зафиксированных температурных аномалий. При резком росте значений такого параметра, как отношение интегралов регистрируемых температурных контрастов $m(s)/m(b)$, участок следует взять на особый контроль, а при достижении критических значений ($m(s)/m(b) \geq 2,5$) – вывести его из эксплуатации и выполнить упредительный ремонт.

Выводы

Эффективность результатов мониторингового обследования подземных теплопроводов методами неразрушающего контроля может быть существенно повышена за счет использования динамических показателей. Современные способы инструментальной диагностики подземных теплопроводов (ТАС и др.) позволяют отслеживать во времени динамику развития деструктивных процессов, оказывающих влияние на снижение надежности тепловых сетей.

Для решения задачи классификации подземных участков тепловых сетей, характеризующихся повышенным тепловыделением, целесообразно использовать эффективную энергетическую характеристику – отношение интегралов регистрируемых температурных контрастов $m(s)/m(b)$. Анализируя динамику изменения величины $m(s)/m(b)$ на конкретном участке тепловой сети за определенный период, можно получить важную информацию о техническом состоянии подземных теплопроводов.

При определении величины интеграла регистрируемых температурных контрастов необходимо учитывать изменение свойств поверхности грунта, покрывающего теплопровод. Важно, чтобы измерения (регистрация) температурных контрастов, используемых для определения отношения $m(s)/m(b)$ на аномальном участке тепловой сети, были выполнены на однотипной земной поверхности при одинаковых метеорологических условиях.

Литература

1. Рондель А. Н., Шаповалов Н. Н., Чубинский В. О. Комплексно-системный подход к оценке эксплуатационного состояния подземных теплопроводов // Энергоснабжение. 2025. № 3. ■