

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НАД ПОДЗЕМНЫМИ ТЕПЛОТРАССАМИ

Физической предпосылкой дистанционной температурной индикации подземных теплотрасс является формирование на земной поверхности аномалии, величина которой зависит от температуры теплоносителя, диаметра и состояния теплопроводов, глубины залегания, физических свойств грунта и метеоусловий на дневной поверхности. В качестве модели теплопровода принимается горизонтальный цилиндр бесконечного простираения диаметром d , залегающий на глубине h в грунте с теплопроводностью λ_2 , имеющий температуру теплоносителя t_0 и слой изоляции с теплопроводностью λ_u .

Теплообмен на земной поверхности происходит по закону Ньютона с коэффициентом скорости обмена α .

Температурная аномалия может быть найдена путем решения стационарного уравнения теплопроводности Фурье. При наличии в теплотрассе прямой и обратной труб возможна суперпозиция решений для обеих труб.

На Рис.1 представлены результаты расчета температурной аномалии Δt , которую следует ожидать над подземной теплотрассой, включающей прямую (изолированную) с температурой воды t_{np} и обратную (не изолированную) трубы с температурой $t_{об}$.

Анализ графика показывает, что аномалия температуры поверхности в данном случае при исправном техническом состоянии теплосети может достигать $+4^\circ\text{C}$, что обеспечивает ее надежную регистрацию как наземным ИК радиометром (чувствительность $0,1^\circ\text{C}$), так и самолетным тепловизором (чувствительность не хуже $0,1^\circ\text{C}$ при температуре фона около 20°C). Следует ожидать, что ширина температурной аномалии (на уровне $+1^\circ\text{C}$) составит около 9 м.

Такую аномалию можно уверенно регистрировать с помощью тепловой аэросъемки при высотах съемки не выше 400 м (геометрическое разрешение на местности при этом не хуже 0,6 м).

При наличии в теплотрассе прямой и обратной труб, следует ожидать только один температурный максимум, т.е. в температурном поле поверхности не разделяются прямая и обратная трубы. Поэтому на ИК изображении технически исправная подземная теплотрасса, состоящая из прямой и обратной труб, должна индексироваться одной линейно вытянутой аномальной зоной шириной 8 - 10 м.

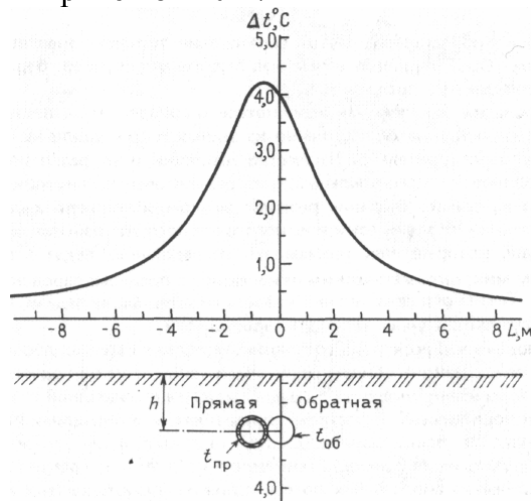


Рис. 1. Кривая температурной аномалии Δt на поверхности над подземной теплотрассой.

Условия расчета кривой: $h=2$ м; $d=820$ мм; $r=90$ мм; $t_T=80$ °C; $t_{об}=40$ °C; $\lambda_2=1,5$ Вт/(м °K); $\lambda_u=0,15$ Вт/(м °K); $\alpha=10$ Вт/(м²*°K)

Результаты расчета температуры поверхности над изолированной трубой, залегающей в грунтах с различной теплопроводностью показывают (Рис. 2), что изменение коэффициента теплопроводности грунта с 1,3 до 1,7 Вт/(м*°K) приводит к незначительному изменению температуры поверхности, которое не должно проявляться на материалах тепловой аэросъемки. Для условий города не следует ожидать изменения λ_2 в больших пределах, поэтому результаты расчетов при постоянном λ_2 могут быть успешно экстраполированы для всей территории города.

На Рис. 3 иллюстрируется влияние глубины залегания трубы. Результаты расчетов показывает, что уменьшение глубины залегания трубы на 0,5 м приводит к повышению значения температурной аномалии над ней более чем на 1°C, что должно находить отражение на ИК изображении. Таким образом, несоблюдение проектной глубины укладки труб подземных теплотрасс может контролироваться с помощью тепловой аэросъемки и на ИК изображении должно выражаться в постепенном изменении интенсивности температурной аномалии над теплотрассой. Кроме того, при интерпретации ИК изображения необходимо различать возможное появление одинаковых аномалий за счет изменения глубины теплотрассы и за счет нарушенной изоляции. В первом случае интенсивность аномалии должна постепенно повышаться вдоль трассы, во втором — наиболее вероятно появление у аномалии резких границ.

Для условий расчета Рис. 3 при глубине залегания трубы 2 м сделаны расчеты влияния изменений коэффициента теплообмена, т.е. погодных условий, главным образом - ветра (Рис. 4). При величине аномалии около 2,5 °С ($\alpha=10$ Вт/(м²*°К)) увеличение коэффициента теплообмена α в 1,5 раза уменьшает величину аномалии на 1°C (2). Увеличение коэффициента α в 2 раза резко уменьшает аномалию (3). Таким образом

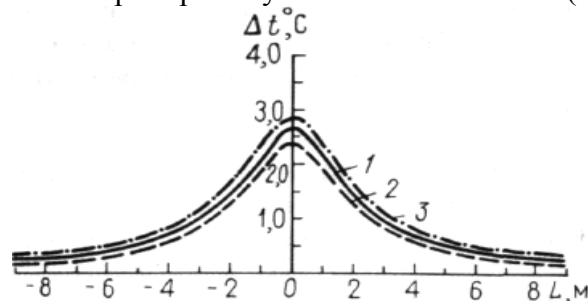


Рис. 2. Кривые изменения температуры поверхности земли Δt над теплоизолированной подземной теплотрассой в зависимости от теплопроводности грунта:

1 - $\lambda_z = 1,5$ Вт/(м*°К); 2 - $\lambda_z = 1,3$ Вт/(м*°К); 3 - $\lambda_z = 1,7$ Вт/(м*°К). Условия расчета: $h = 2$ м; $d = 820$ мм; $r = 90$ мм; изменения $\lambda_u = 0,15$ Вт/(м*°К); $t_{np} = 80^\circ\text{C}$; $\alpha = 10$ Вт/(м²*°К)

влияние метеорологических условий на температурное поле над теплотрассами весьма значительно, поэтому следует проводить тепловую аэросъемку, по возможности, в маловетренную погоду.

Диаметр изолированной трубы также влияет на возможность ее дистанционной индикации тепловой аэросъемкой (Рис. 5). При исправном техническом состоянии теплотрассы трубы малых диаметров создают слабые температурные аномалии около +1 °С и не могут регистрироваться тепловой аэросъемкой с высокой надежностью.

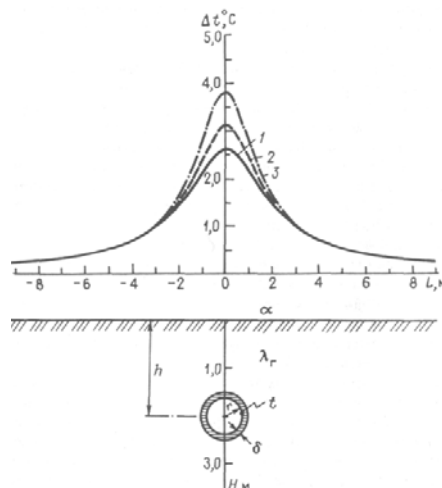


Рис. 3. Кривые изменения температуры поверхности земли над теплоизолированной подземной теплотрассой в зависимости от глубины залегания H, м:

1-2; 2 - 1,75; 3 - 1,5. Условия расчета: $d = 820$ мм; $r = 90$ мм; $\lambda_u = 0,15$ Вт/(м*°К); $\lambda_r = 1,5$ Вт/(м.К); $t_{np} = 80^\circ\text{C}$; $\alpha = 10$ Вт/(м²-К)

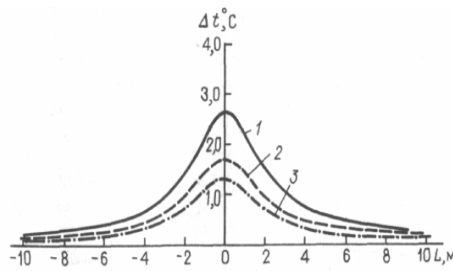


Рис. 4. Кривые изменения температуры поверхности земли Δt над подземной теплоизолированной теплотрассой в зависимости от коэффициента теплообмена α Вт/(м²*К): 1-10; 2-15; 3-20. Условия расчета: $H=2$ м; $d=820$ мм; $r=90$ мм; $\lambda_{\text{н}}=0,15$ Вт/(м⁰К)

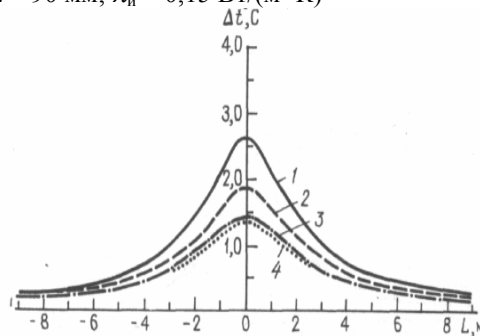


Рис. 5. Кривые изменения температуры поверхности земли под подземной теплоизолированной теплотрассой в зависимости от диаметра трубы d : 1 - $d=820$ мм; $r=90$ мм; 2 - $d=426$ мм; $r=90$ мм; 3 - $d=218$ мм; $r=90$ мм; 4 - $d=160$ мм; $r=75$ мм. Условия расчета: $h=2$ м; $\lambda_{\text{н}}=0,15$ Вт/(м⁰К); $\lambda_{\text{г}}=1,5$ Вт/(м-К); $t_{\text{нп}}=80^{\circ}\text{C}$; $\alpha=10$ Вт/(м² °К).

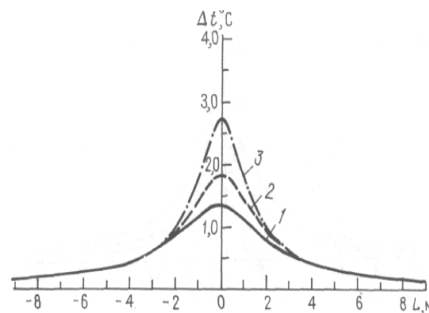


Рис. 6. Кривые изменения температуры поверхности земли над подземной теплоизолированной теплотрассой в зависимости от глубины залегания H , м: 1 - 2,0; 2 - 1,5; 3 - 1,0. Условия расчета: $d=160$ мм; $r=75$ мм; $\lambda_{\text{н}}=0,15$ Вт/(м⁰К); $\lambda_{\text{г}}=1,5$ Вт/(м-К); $t_{\text{нп}}=80^{\circ}\text{C}$; $\alpha=10$ Вт/(м²*К)

Анализ результатов расчетов температуры поверхности над изолированными (Рис. 6) и неизолированными (Рис. 7) трубами малого размера при различных глубинах их залегания показывает, что изолированная труба малого диаметра (подвод теплосети к домам), залегающая на глубине 2 м, создает незначительную аномалию. В то же время, уменьшение глубины залегания трубы до 1 м (см. Рис. 6) или отсутствие изоляции трубы (Рис. 7) может приводить к увеличению температурной аномалии до 3—4,5 °С, что может быть зарегистрировано тепловой аэросъемкой.

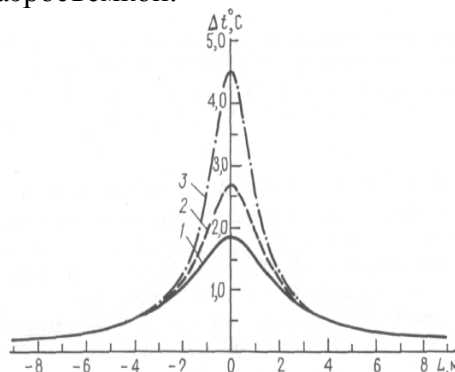


Рис. 7. Кривые изменения температуры поверхности земли над подземной неизолированной теплотрассой в зависимости от глубины залегания H , м: 1- 2,0; 2- 1,5; 3- 1,0.

Условия расчета: $l = 160$ мм; $\lambda_r = 1,5$ Вт/(м·К); $t_{np} = 80$ °С; $\alpha = 10$ Вт/(м²·К)

На Рис. 8 показано влияние температуры воды в трубе на возможность обнаружения теплотрассы. Естественно, что понижение температуры воды приводит к понижению аномалии температуры поверхности. Следовательно, из-за теплопотерь в грунте и через поверхность на отдаленных от котельных участках теплотрасс может происходить понижение температуры воды в трубе, что на ИК изображении может проявляться в некотором понижении интенсивности температурной аномалии над теплотрассой.

Анализ влияния утечки горячей воды на температуру поверхности (Рис. 9) показывает, что намокание изоляции должно приводить к значительному повышению (на 1,5—2 °С) аномалии температуры поверхности, которое может быть надежно зарегистрировано тепловой аэросъемкой. Кроме того, наличие утечки воды может изменить форму аномалии (в плане). Поэтому следует ожидать, что утечки горячей воды в теплотрассе будут проявляться в виде резкого повышения температуры поверхности над небольшим участком теплотрассы либо в виде интенсивных площадных локальных аномалий неправильной или изометрической формы, расположенных на линейной аномальной зоне.

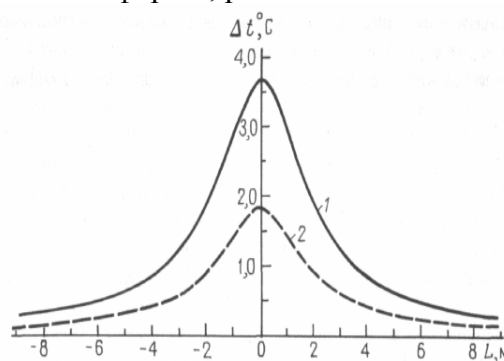


Рис. 8. Кривые изменения температуры поверхности земли над подземной теплотрассой в зависимости от температуры воды t_{np} , °С: 1 - 80; 2 - 40.

Условия расчета: $H = 2,0$ м; $d = 820$ мм; $\lambda_r = 1,5$ Вт/(м·К); $\alpha = 10$ Вт/(м²·К)

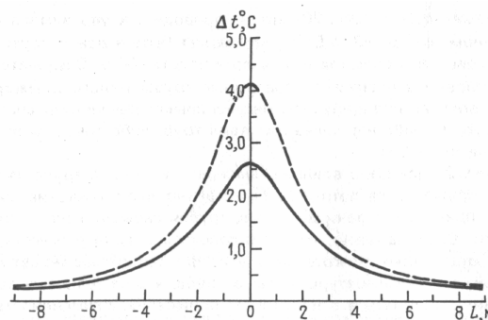


Рис. 9. Кривые изменения температуры поверхности земли над подземной теплотрассой при сухой (1) и мокрой (2) теплоизоляции.

Условия расчета: $h = 2,0$ м; $d = 820$ мм; $r = 90$ мм; $\lambda_{и} = 0,15$ Вт/(м·К); $\lambda_r = 1,5$ Вт/(м·К); $t_{np} = 80$ °С; $\alpha = 10$ Вт/(м²·К)

График зависимости (Рис. 10) времени запаздывания температурной аномалии на поверхности относительно момента появления утечки горячей воды в зависимости от глубины залегания труб построен по методике расчетов температуры поверхности при нестационарном процессе. Анализ полученной зависимости показывает, что при появлении утечки горячей воды на глубине 1 м температурная аномалия на поверхности достигает половины ее возможного максимального значения через 6 дней и 0,9 максимального значения - через 20 дней с момента появления утечки. Поэтому тепловая аэросъемка может обнаруживать

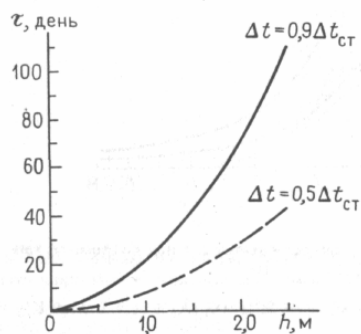


Рис. 10. Кривые изменения времени задержки появления аномалии температуры поверхности относительно момента появления утечки в теплотрассе в зависимости от глубины залегания трубы. Условия расчета: $\lambda_r = 1,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°К)}$;

утечки из теплотрасс, "возраст" которых составляет от нескольких дней до двух-трех недель и более, в зависимости от глубины залегания труб. Аналогичный вывод можно сделать о выборе времени съемки. Она должна проводиться не ранее, чем через 10-15 дней после включения системы теплоснабжения.

Исходя из радиационных условий осенне-зимнего периода средней полосы России, были сделаны расчеты суточного хода температур основных компонентов ландшафта городской застройки, не имеющей внутренних источников тепла. Результаты расчетов и наземные круглосуточные измерения позволяют сделать вывод, что с ноября по февраль мешающие температурные контрасты за счет солнечного нагрева невелики и съемку можно проводить в наиболее удобные по условиям самолетовождения дневное время. Далее, в марте, с подъемом Солнца над горизонтом, появляются большие контрасты за счет теней от зданий, которые существенно затрудняют дешифрирование теплотрасс на ИК изображениях. Поэтому в марте - апреле и октябре полеты рекомендуется проводить только в пасмурную погоду. Это несколько снижает производительность работ. Сильный ветер может вызвать некоторое снижение контраста аномалий теплосетей.

Не снижает эффективность тепловой аэросъемки дождь и мокрый снег. Небольшой снежный покров создаёт небольшую помеху, но более четко выделяются крупные нарушения изоляции и утечки.

На существующем уровне развития тепловой аэросъемки дешифрирование ИК изображения для оценки состояния теплотрасс проводится в основном на принципе сравнения их элементов, имеющих "нормальное" и "аномальное" состояние, а также использовании некоторых признаков, свидетельствующих об аномальных теплопотерях. При соблюдении всех технологических условий строительства и одинаковом типе поверхностного покрытия подземная теплотрасса выделяется на ИК изображении в виде слабой однородной по направлению прокладки и несколько размытой по периферии аномалии (Рис. 3-12) с расположенными на ней несколько более интенсивными изометрическими или прямоугольными аномалиями от тепловых камер. Чёткие границы характерны для открытых участков теплотрасс. Очень редко хорошо изолированные теплотрассы не видны на ИК изображении. В подавляющем большинстве случаев из-за различных нарушений при строительстве нормальный трубопровод в пределах одной улицы может изобразиться аномалией разной интенсивности.

Участки аномальных теплопотерь из-за нарушений теплоизоляции и с её намоканием, но без заметных утечек теплоносителя, носят локальный характер. При больших утечках теплоносителя наблюдаются различной формы интенсивные аномалии из-за его растекания: протяжённые линейные вдоль трассы при канальной прокладке, овальные при равномерном растекании, различных форм растекания при наличии ослабленных зон вблизи аварии.

Интерпретация материалов тепловой аэросъемки процесс достаточно сложный, требующий определённого опыта. Обязательно требуется привлечение дополнительной информации, например, о метеоусловиях аэросъемки, данные наземных служб эксплуатации, дополнительных наземных наблюдений, в первую очередь термометрических и геофизических.