

УДК 536.2

**ЭНЕРГОАУДИТ КОТТЕДЖЕЙ И ДРУГИХ ОБЪЕКТОВ МАЛОЭТАЖНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА МЕТОДОМ ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ
И КОНТАКТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ**

А.Р. Кямря, Н.В. Серебрянникова, А.А. Залеская

Рассматриваются современные методы исследования строительных конструкций на предмет соответствия их теплофизических свойств нормативным значениям. Предлагается методика оценки теплозащитных свойств ограждающих конструкций малоэтажных зданий на основе тепловизионного обследования как экспресс-метода для выявления скрытых дефектов теплоизоляции. Для более точного и детального анализа качества строительства тепловизионная съемка дополняется контактными измерениями теплофизических параметров и вычислением количественных характеристик ограждающих конструкций. Это составляет основу комплексного обследования объекта.

Ключевые слова: ограждающие конструкции (ОК), энергозатраты, энергосбережение, тепловизионное обследование, термограмма, тепловая защита, теплотехнические показатели.

Введение

Основным требованием, предъявляемым к жилым помещениям для обеспечения комфортного проживания человека без вреда для его здоровья, было и остается обеспечение оптимальных параметров микроклимата. Важнейшую роль в соблюдении данного требования выполняют наружные ограждающие конструкции (ОК) строения, которые призваны обеспечить требуемую теплозащиту. При этом одним из условий достиже-

ния теплового комфорта является обеспечение допустимой разности температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности наружных ОК (за исключением светопрозрачных заполнений). В то же время обеспечение требуемого теплового режима с точки зрения комфорта должно сочетаться с минимизацией энергозатрат на его достижение. В связи с этим основными путями экономии энергии для обеспечения нормативных условий теплового комфорта при строительстве жилых зданий являются повышение теплозащитных свойств наружных ОК и применение архитектурно-планировочных (композиционных) решений, минимизирующих площадь наружных ограждений. Вследствие полного отсутствия какого-либо контроля компетентных органов за загородным строительством вопрос энергосбережения особенно остро встает перед собственником уже в период полноценной эксплуатации объекта недвижимости. Здесь наиболее эффективным решением вопроса представляется проведение обследования тепловизионным методом, позволяющим дистанционным способом с минимальными отклонениями локализовать недостатки в тепловой защите и принять меры по их устранению.

Тепловизионное обследование ограждающих конструкций объектов малоэтажной застройки

Алгоритм проведения обследования представляется следующим:

- тепловизионная съемка наружных ОК и анализ термограмм с выявлением участков с температурными аномалиями;
- тепловизионная съемка внутренних поверхностей участков с температурными аномалиями, анализ термограмм с целью выявления предполагаемых дефектных участков;
- определение температур внутренних поверхностей предполагаемых дефектных участков при расчетных условиях эксплуатации и сравнение с нормативными, выявление участков с отклонениями температур, превышающими погрешность измерения;
- выявление причин наличия дефектов и разработка методов по их устранению.

На рис. 1 приведены термограммы фасадов жилого дома, по которым проводится первичная оценка состояния ОК и выявляются наиболее грубые дефекты.

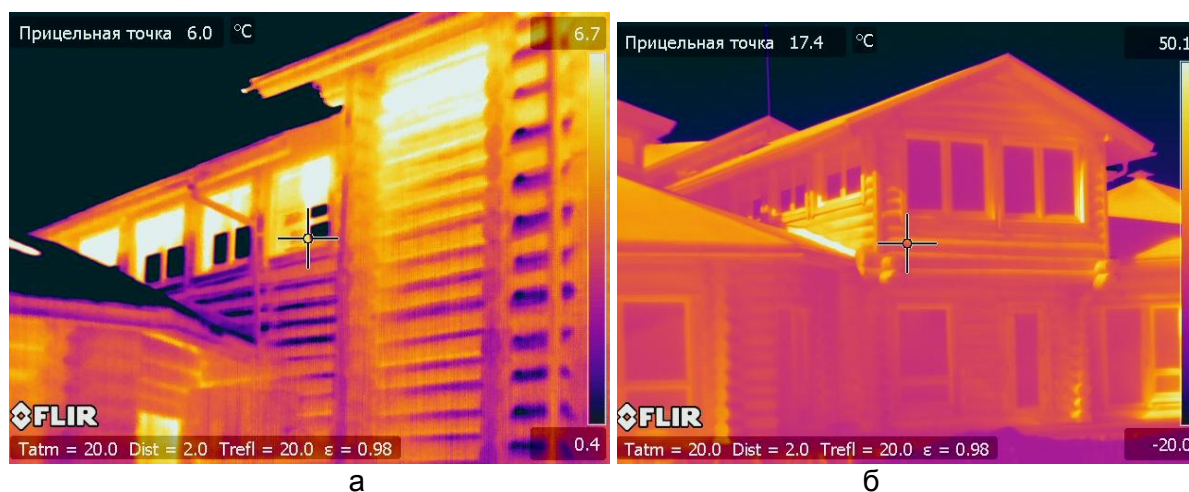


Рис. 1. Термограммы фасадов жилого дома

На рис.1, а, отчетливо видны мостики холода между бревнами фасада, однако это не означает, что температура внутренней поверхности данной стены не будет соответствовать строительным нормам. На рис. 1, б, наиболее холодными поверхностями являются светопрозрачные конструкции. Оценка их теплофизических свойств принято проводить с помощью контактных методов исследования.

Температуру внутренней поверхности ОК $t_{п.в.}^{расч}$ для расчетных условий рекомендуется вычислять по результатам измерений в условиях, отличающихся от расчетных, по выражению [1]:

$$t_{п.в.}^{расч} = t_B - (t_B - t'_{п.в.}) \frac{\alpha_B}{\alpha'_B}, \quad (1)$$

где t_B – расчетная температура внутреннего воздуха; °С; $t'_{п.в.}$ – температура внутренней поверхности ОК при расчетном перепаде температур ($t_B - t_H$) без учета изменения коэффициента теплоотдачи α_B , определяемая по зависимости

$$t'_{п.в.} = t_B - (t_B^{эксп} - t_{п.в.}^{эксп}) \frac{t_B - t_H}{t_B^{эксп} - t_H^{эксп}}; \quad (2)$$

$\alpha_B = \alpha_K + \alpha_{л}$ – коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к внутренней поверхности ОК в эксперименте, Вт/(м²·К); $\alpha'_B = \alpha'_K + \alpha'_{л}$ – то же при t'_B и t_B , Вт/(м²·К); α_K, α'_K – коэффициенты конвективного теплообмена внутренней поверхности ОК с воздухом внутри помещения при $\Delta t = t_B^{эксп} - t_{п.в.}^{эксп}$ и $\Delta t_B = t_B - t'_{п.в.}$ соответственно, Вт/(м²·К), определяемые по эмпирическому графику, представленному в [1]; $\alpha_{л}, \alpha'_{л}$ – коэффициенты лучистого теплообмена внутренней поверхности ОК с воздухом внутри помещения при $t_{cp} = \frac{t_B^{эксп} + t_{п.в.}^{эксп}}{2}$ и $t_{cp} = \frac{t_B + t'_{п.в.}}{2}$ соответственно, Вт/(м²·К), также определяемые по эмпирическому графику в [1]; $t_B^{эксп}$ – средняя за период наблюдений температура внутреннего воздуха, °С; $t_{п.в.}^{эксп}$ – то же внутренней поверхности ОК в рассматриваемой точке, °С; t_H – расчетная температура наружного воздуха, °С; $t_H^{эксп}$ – средняя за период наблюдений температура наружного воздуха, °С.

Однако следует отметить, что в соответствии с графиками для определения $\alpha_{л}, \alpha'_{л}$ и α_K, α'_K эти величины изменяются в довольно узком диапазоне ($0,4 \leq \alpha_K \leq 4,4$; $3,0 \leq \alpha_{л} \leq 4,8$), и отношение $\frac{\alpha_B}{\alpha'_B}$ в формуле (1) вносит незначительный вклад в $t_{п.в.}^{расч}$,

что находится в пределах погрешности метода ее определения. В связи с этим представляется, что с достаточной для инженерных расчетов точностью при определении $t_{п.в.}^{расч}$ может быть использована зависимость

$$t_{п.в.}^{расч} = t_B - (t_B - t'_{п.в.}), \quad (3)$$

За нормативные значения температуры внутренней поверхности принимаются значения, указанные в [2]. По отклонению температуры внутренней поверхности ОК в расчетных условиях от нормативного значения можно определить качество теплозащиты.

На рис. 2 приведен пример выявленного в ходе тепловизионного обследования скрытого дефекта углового стыка стен в жилом помещении загородного дома. Выделенная темная область стыка имеет среднюю температуру поверхности в условиях измерения 15,7 °С. При пересчете по формулам (1), (2) и сравнении с требуемым по [2] значением температуры внутренней поверхности в зонах теплопроводных включений отклонение от нормативного значения с учетом погрешности составило 7,9 °С, что свидетельствует о некачественной заделке стыка.

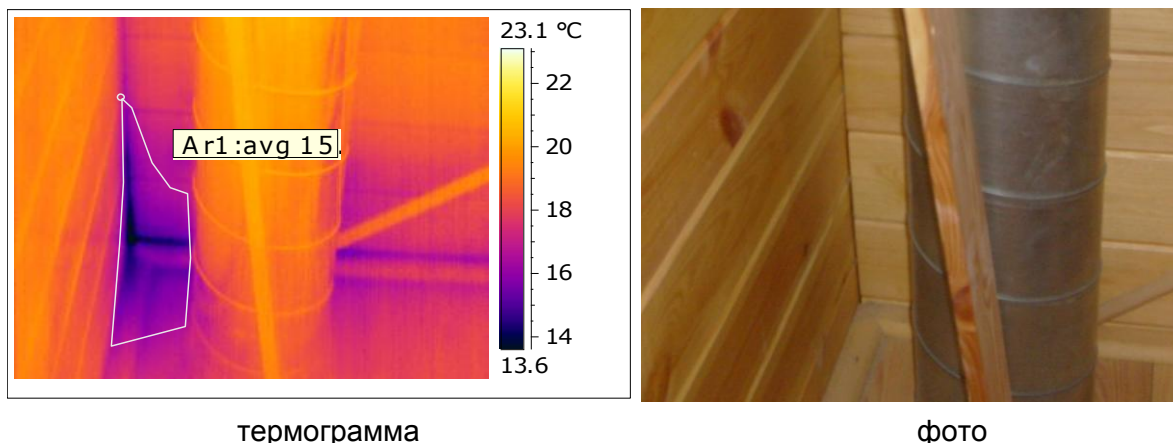


Рис. 2. Выявленный скрытый дефект углового стыка стен

Контактный метод исследования качества ограждающих конструкций

В большинстве случаев для составления теплового баланса здания и определения требуемой мощности системы отопления требуются более качественный анализ тепло-технических свойств ОК, а также экспериментальная оценка тепловых потерь через конструкции жилого дома в натуральных условиях. Для этого в течение нескольких суток проводятся замеры температур внутреннего и наружного воздуха, внутренней и наружной поверхности, а также плотности теплового потока через ОК контактным методом.

При обработке результатов натуральных испытаний строят графики изменения во времени температуры и плотности тепловых потоков, по которым выбирают периоды с наиболее установившимся режимом (с отклонением среднесуточной температуры наружного воздуха от среднего значения за этот период в пределах $\pm 2,5^\circ\text{C}$) и вычисляют средние значения термического сопротивления для каждого периода.

Значение термического сопротивления R_{ki} , $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, базового (термически однородного) участка ОК вычисляют по формуле [3]

$$R_{ki} = \frac{t_{п.вi} - t_{п.нi}}{q_{\phi i}}, \quad (4)$$

где $t_{п.вi}$ и $t_{п.нi}$ – средние за расчетный период измерений значения температур внутренней и наружной поверхностей ОК соответственно, $^\circ\text{C}$; R_{ki} – термическое сопротивление базового участка i -го ограждения, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; $q_{\phi i}$ – средняя за расчетный период измерения фактическая плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$, определяемая [3] по формуле

$$q_{\phi i} = \frac{q(t_{п.в} - t_{п.н})}{(t_{пп} - t_{п.н}) - q(R_T - R_c)} = \frac{q(t_{в} - t_{н})}{(t_{в} - t_{н}) - q(R_T - R_c)}. \quad (5)$$

Здесь q – средняя за расчетный период измеренная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $t_{в}$ и $t_{н}$ – средние за расчетный период измерений значения температуры внутреннего и наружного воздуха, $^\circ\text{C}$; $t_{пп}$ – температура поверхности преобразователя теплового потока, обращенной внутрь помещения, измеренная при испытаниях, $^\circ\text{C}$; R_T – термическое сопротивление преобразователя теплового потока, определяемое по его паспортным данным, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; R_c – термическое сопротивление слоя подложки, прикрепляющего преобразователь теплового потока к поверхности, определяемое расчетом, $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$; $R_{в}$ – сопротивление теплопередаче внутренней поверхности ОК, определяемое расчетным путем по средним значениям $t_{в}$, $t_{п.в}$ и $q_{\phi i}$:

$$R_{в} = \frac{\Delta t}{q_{\phi i}}, \quad (6)$$

$\Delta t = (t_B - t_{п.в.})$, t_B и $t_{п.в.}$ – температуры, соответственно, воздуха в помещении и внутренней поверхности стены, °С.

Значение сопротивления теплопередаче R_0 , м²·К/Вт, базового участка ОК вычисляются по формуле

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + R_k + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (7)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ОК, определяемый по формуле $\alpha_B = 1/R_B$, Вт/(м²·К); α_H – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), наружной поверхности ОК, принимаемый по [2].

При невозможности установки датчиков температуры на наружной поверхности ОК допускается определение значения сопротивления теплопередаче R_0 базового участка ОК по формуле

$$R_0 = \frac{t_B - t_H}{q}. \quad (8)$$

При этом по графикам изменения во времени температуры внутреннего t_B и наружного t_H воздуха, а также плотности теплового потока q , как изложено ранее, выбирают периоды с наиболее установившимся режимом, т.е. с отклонением среднесуточной температуры наружного воздуха от среднего значения за этот период в пределах $\pm 2,5$ °С, и вычисляют средние значения сопротивления теплопередаче R_0 для каждого периода. При определении среднего значения сопротивления теплопередаче базового участка учитывается погрешность измерения и расчета, которая анализируется в два этапа:

- вычисление погрешностей прямых измерений, в данном случае это измерение плотности теплового потока, температур внутреннего и наружного воздуха и поверхностей;
- определение погрешности косвенных измерений, т.е. погрешности величин термического сопротивления или/и сопротивления теплопередаче ОК, вычисленных по формулам (4), (8).

Анализ погрешности прямых измерений производится согласно [4]. Окончательный результат прямых измерений имеет вид

$$\bar{t}_B = t_B \pm \Delta t_B, \quad \bar{t}_H = t_H \pm \Delta t_H, \quad \bar{q} = q \pm \Delta q, \quad (9)$$

где \bar{t}_B , \bar{t}_H , \bar{q} – средние арифметические значения из n измерений для температур внутреннего t_B и наружного воздуха t_H , а также плотности теплового потока q ; Δt_B , Δt_H , Δq – границы доверительного интервала (абсолютная погрешность результата измерений) t_B , t_H , q .

Оценивается относительная погрешность результатов серии прямых измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_B}{t_B} 100\%, \quad \varepsilon = \frac{\Delta t_H}{t_H} 100\%, \quad \varepsilon = \frac{\Delta q}{q} 100\%. \quad (10)$$

При анализе погрешности расчета величины сопротивления теплопередаче R_0 для каждой серии измерений величин, входящих в определение искомой величины (а именно, для t_B , t_H и q), проводится такая же обработка, как и при анализе погрешности прямых измерений. При этом для всех измеряемых величин задают одно и то же значение доверительной вероятности α .

Оцениваются границы доверительного интервала для результата косвенных измерений:

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{1}{q}\right)^2 (\Delta t_B)^2 + \left(-\frac{1}{q}\right)^2 (\Delta t_H)^2 + \left(-\frac{(\bar{t}_B - \bar{t}_H)}{q^2}\right)^2 (\Delta q)^2}. \quad (11)$$

Окончательный результат косвенных измерений имеет вид

$$R(t_b, t_n, q) = R(\bar{t}_b, \bar{t}_n, \bar{q}) \pm \Delta R. \quad (12)$$

Оценивается относительная погрешность результата серии косвенных измерений

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} 100\%. \quad (13)$$

Полученные результаты признаются достоверными, если относительная погрешность R_0 не превышает 15%.

Выводы

Тепловизионное обследование ОК является оптимальным методом для быстрого бесконтактного выявления таких скрытых дефектов монтажа, как некачественная заделка оконных откосов при установке светопрозрачных конструкций, неплотность примыканий оконных створок и дверных полотен, недостаточный уровень тепловой защиты различных конструктивных элементов, узлов и деталей. Однако данный метод имеет ряд ограничений: тепловизионное обследование должно проводиться при температурном перепаде между внутренним и наружным воздухом, превосходящем минимально допустимое его значение $\Delta t_{\min} \geq 10,0$ °С, при отсутствии атмосферных осадков, тумана, задымленности воздуха, инея на поверхности, а также прямого солнечного излучения, либо в случае внутренней тепловизионной съемки излучения отопительных приборов и других источников тепла. При обследовании в осенне-зимний период соблюдение всех этих требований крайне проблематично. Колебания температуры наружного воздуха, смена погодных условий в процессе проведения обследования вносят существенный вклад в погрешность измерений. Кроме того, допущения, принятые при выводе формулы (3) для расчета температуры внутренней поверхности ОК, дополнительно увеличивают погрешность данного метода. Поэтому тепловизионное обследование является достаточным только для качественной оценки теплоизоляционных свойств ОК.

При необходимости определения количественных характеристик ОК целесообразно дополнять тепловизионную съемку контактными измерениями температуры и плотности теплового потока. Это позволяет рассчитать тепловой баланс обследуемого объекта и принять меры к снижению затрат на отопление.

Литература

1. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства, 1984.
2. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – М.: Госстрой РФ, 2003.
3. Могутов В.А. Обобщение опыта натурных экспериментальных обследований объектов ЖКХ // Отчет НИИСФ РААСН. – М., 2005.
4. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970.

<i>Кямря Александр Робертович</i>	–	Обособленное подразделение ЦК ИС ФГП «РОССТРО» - ОАО «РОССТРО» - «ПКТИ», начальник физического отдела, tv_pkti@pochta.ru
<i>Серебрянникова Наталия Владимировна</i>	–	Обособленное подразделение ЦК ИС ФГП «РОССТРО» - ОАО «РОССТРО» - «ПКТИ», инженер, tv_pkti@pochta.ru
<i>Залеская Анастасия Алексеевна</i>	–	Обособленное подразделение ЦК ИС ФГП «РОССТРО» - ОАО «РОССТРО» - «ПКТИ», инженер, tv_pkti@pochta.ru