

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЭНЕРГОАУДИТЕ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

Черепашук Г. А., Калашников Е. Е., Назаров А. И., Сироклыч В. П.

1. Введение

В условиях дороговизны энергоресурсов, при большой доле энергозатратных зданий, энергосбережение является одной из приоритетных задач развития коммунального хозяйства в соответствии с Законом Украины «Об энергосбережении» [1]. Повышение энергоэффективности зданий и объектов начинается с проведения энергоаудита, который позволяет выявить источники потерь тепла, недостатки в теплоизоляции, тепловые мостики, недостаточную плотность изоляции и другие строительные дефекты. По результатам проведения энергетического обследования здания составляется энергетический паспорт [2, 3].

Для определения теплотехнических показателей тепловой защиты зданий, ограждающие конструкции обследуются с помощью таких средств измерительной техники, как тепловизоры, пирометры, анемометры, измерители теплового потока, контактные термометры и измерители влажности. Среди перечисленных средств измерительной техники лишь тепловизор позволяет визуализировать температурные поля объекта обследований.

При температурных обследованиях, в соответствии с ДСТУ Б EN 13187:2011 [4], действительную температуру ограждающих конструкций необходимо измерять с погрешностью не более $\pm 10\%$ или $\pm 0,5\text{ К}$.

Тепловизоры, применяемые для температурного обследования ограждающих конструкций, в соответствии с ДСТУ Б В.2.6-101:2010 [5], должны соответствовать следующим метрологическим характеристикам:

- диапазон измеряемой температуры от минус $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- разрешающая способность по температуре не более чем $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- основная абсолютная погрешность измерения температуры не более чем $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом данного исследования является процесс температурного обследования ограждающих конструкций с помощью тепловизора. Существенным недостатком тепловизионных энергообследований является наличие значительной методической погрешности. Причиной этого является большое число факторов, влияющих на процесс измерений температуры поверхностей объектов при тепловизионной диагностике.

Согласно ДСТУ 2820-94 [6], тепловизионным прибором называют средство тепловидения, предназначенное для восприятия теплового излучения исследуемых объектов с последующим формированием их адекватных изображений, пригодных для наблюдения невооруженным взглядом.

Тепловизионным преобразователем (приемником теплового излучения) называется средство тепловидения, предназначенное для выработки сигнала тепловизион-

ной информации в форме, удобной для пересылки, дальнейшего преобразования, обработки, хранения, но не пригодной для непосредственного восприятия наблюдателем [6].

В последнее время широкое распространение получили тепловизоры с электронным сканированием, характерной особенностью которых является отсутствие оптико-механической развертки изображения и наличие матричных (многоэлементных) приемников излучения [7, 8]. Оптическая система матричного тепловизора формирует изображение объекта исследований и направляет его излучение на матричный приемник [9, 10]. Для формирования изображения температурных полей объекта необходимо наличие температурного контраста между объектом и фоном [10, 11].

Матричные приемники излучения могут быть охлаждаемыми и неохлаждаемыми. Различают тепловые и фотоэлектрические приемники излучения. К тепловым приемникам излучения относят болометрические, пироэлектрические, термоэлектрические и пневматические. Работа болометрических приемников основана на изменении электрического сопротивления измерительного преобразователя при нагреве инфракрасным излучением. Пироэлектрические приемники используют пироэлектрический эффект, заключающийся в появлении заряда на гранях кристаллического элемента при его нагреве [11]. У термоэлектрических приемников излучения электродвижущая сила возникает за счет термоэлектрического эффекта. В пневматических приемниках измеряется изменение давления газа в камере в результате нагрева чувствительного элемента под воздействием потока излучения [10].

Среди тепловых приемников наибольшее распространение получили неохлаждаемые болометрические матрицы на оксиде ванадия, с тенденцией перехода к матрицам на основе материалов, содержащих кремний. Такие матрицы не требуют охлаждения, их спектральный диапазон находится в пределах от 8 до 14 мкм [12, 13].

К фотоэлектрическим приемникам излучения относятся преобразователи с внешним фотоэффектом (фотоэмиссионные и фотоэлектронные умножители), с внутренним фотоэффектом (фоторезистивные) и фотогальванические преобразователи (фотодиоды и фототранзисторы).

В фотоэмиссионных приемниках излучения электрический сигнал соответствует числу электронов, испущенных твердым телом под действием падающих фотонов и приложенного к фотоэлементу постоянного напряжения [10, 14]. В фоторезистивных приемниках под действием излучения возбуждение электронов в валентной зоне и примесных уровнях увеличивается, электроны переходят в зону проводимости. Это вызывает увеличение электропроводности, что и соответствует сигналу приемника [10, 15]. Фотодиоды и фототранзисторы – это приемники излучения с $p-n$ переходами, в которых поток падающих фотонов вызывает изменение потенциального барьера на переходе внутри неоднородного проводника, при освещении перехода создается дополнительная концентрация носителей в n -слое [16, 17]. Спектральный диапазон таких матриц от 3 до 5 мкм и от 8 до 12 мкм [8, 12].

На практике, когда число элементов матрицы становится большим, прибегают к технике мультиплексирования и считывания информации, основанной на использовании [16–18]:

- приборов с переносом заряда (приборов с зарядовой связью (ПЗС));
- приборов с инъекцией заряда (ПЗИ) на комплементарных металлооксидных полупроводниках (КМОП).

ПЗИ и ПЗС основаны на быстром считывании зарядов [10]. Принцип действия приборов с зарядовой связью базируется на использовании структуры металл – диэлектрик – полупроводник в виде матрицы фоточувствительных элементов [7, 10]. С матрицы ПЗС считывается изображение путем переноса зарядов вдоль каждой строки к выходному регистру, представляющему столбец элементов ПЗС, используемых в мультиплексном режиме. Информация с матрицы ПЗС может передаваться в матрицу памяти и затем мультиплексируется выходным ПЗС-регистром [10]. Матрица ПЗС позволяет получить полное изображение температурного поля объекта, находящегося при температуре, превышающей 0 К [12]. МОП-конденсатор представляет собой простейший ПЗИ [17]. Принцип работы приборов с инъекцией заряда аналогичен принципу работы ПЗС, но отличаются формированием видеосигнала. В ПЗИ возникает ток в подложке, пропорциональный числу принятых фотонов, благодаря инъекции зарядов, составляющих видеосигнал.

Структурная схема матричного тепловизора последнего (третьего) поколения приведена на рис. 1 [8, 9]. Изображение объекта формируется оптической системой на матричном приемнике излучения. Наиболее распространены тепловизоры с матрицами разрешением 320×240 , 640×480 и 1024×768 пикселей (до 10^6 и более чувствительных элементов) [12]. Матрица охлаждается и термостабилизируется блоком термостабилизации. Предусилители усиливают сигнал каждого чувствительного элемента матричного приемника излучения, далее сигнал поступает на мультиплексор [8, 9]. Сигналы с мультиплексора направляются в аналоговую схему коррективы неоднородности сигналов, далее преобразуются аналого-цифровым преобразователем. После аналого-цифрового преобразователя сигналы поступают в схему цифровой коррективы неоднородности сигналов и затем на схему коррективы неработающих приемных элементов матрицы (заменяют сигнал на месте неработающей ячейки интерполированным между соседними). Откорректированный сигнал поступает на блок формирования изображения с микропроцессорной обработкой изображения и далее на цифровой выход и дисплей [8, 9]. Для синхронизации описанных процессов в тепловизоре используют тактовый генератор. В качестве источника питания обычно используется аккумуляторная батарея.

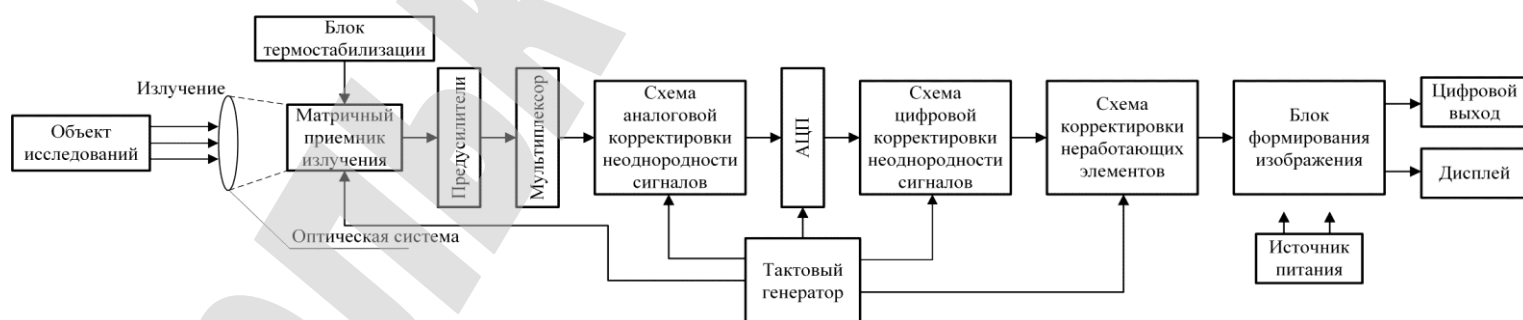


Рис. 1. Структурная схема современного тепловизора

Примеры инфракрасных и фотометрических изображений оборудования, полученные при экспериментальных исследованиях с помощью тепловизора Fluke Ti25, приведены на рис. 2, 3.

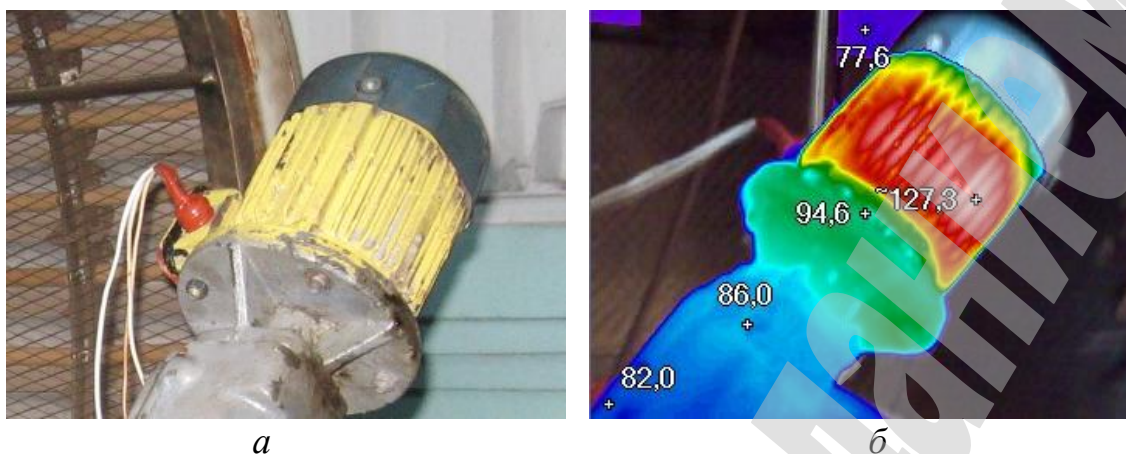


Рис. 2. Изображение электропривода, полученное тепловизором Fluke Ti25: *а* – фотометрическое; *б* – инфракрасное

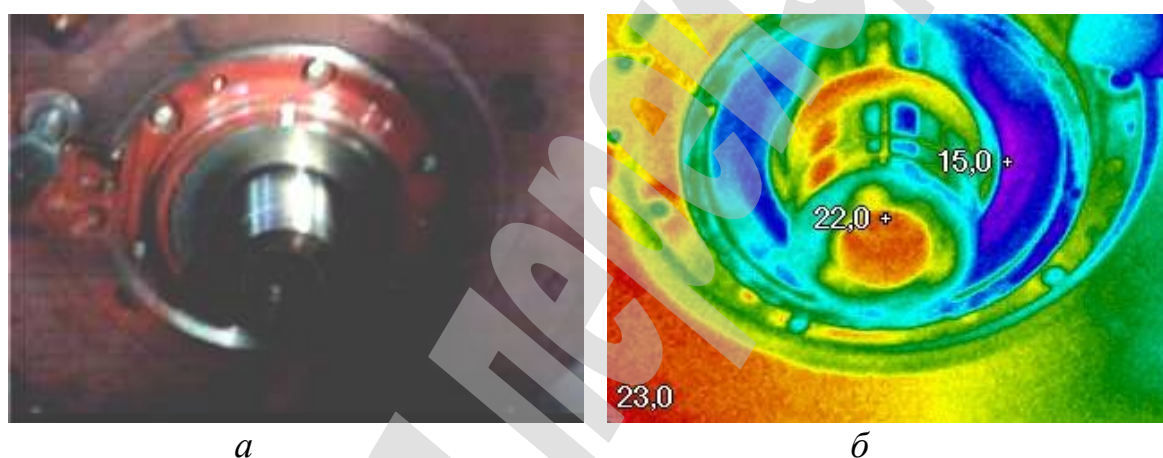


Рис. 3. Изображение стенда для исследования подшипников, полученное тепловизором Fluke Ti25: *а* – фотометрическое; *б* – инфракрасное

Достоинствами матричного тепловизора являются небольшие габариты, чувствительность в нескольких спектральных диапазонах, простота в эксплуатации и надежность. Матричный тепловизор позволяет мгновенно получить термограмму обследуемого объекта с высоким пространственным разрешением (до 10^6 чувствительных элементов) и температурным разрешением до $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при погрешности измерения температуры до $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Существенным недостатком таких тепловизоров является их высокая стоимость (от 500 у. е. до 20 тыс. у. е. и более). Также к недостаткам относят наличие нефотоактивных областей (пропусков между пикселями), которые снижают качество изображения.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – уменьшение методических погрешностей измерения температуры ограждающих конструкций с помощью тепловизора. Это позволит повысить точность и качество проведения энергоаудита зданий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на точность проведения энергоаудита с помощью тепловизоров.

2. Оценить методическую погрешность тепловизионных энергообследований в зависимости от различных влияющих факторов.

3. Найти способы повышения точности проведения энергоаудита, позволяющие минимизировать методическую погрешность.

4. Исследование существующих решений проблемы

Проведенный анализ принципа действия тепловизоров позволяет перейти к оценке факторов, влияющих на точность проведения энергоаудита.

При энергоаудите объектов с помощью тепловизоров оператор должен учитывать следующие факторы, согласно работам [19–22], как наиболее влияющие на величину погрешности измерений при тепловизионной диагностике [8–10]:

- излучательная способность ограждающих конструкций исследуемого здания (характеризуется интегральным коэффициентом излучения) является одним из самых существенных факторов и описана в работе [23];

- угол наклона оптической оси тепловизора относительно нормали к исследуемой поверхности объекта исследований (в работах [9, 24] показано, что коэффициент излучения неплоских поверхностей различен в различных точках);

- паразитное отражение теплового излучения, солнечное излучение и конвективные тепловые потоки;

- состав окружающей среды, через которую проходит излучение (пыль, газы, водяной пар) [25];

- загрязнение поверхности оптической системы;

- метеорологические условия (ветер, атмосферные осадки и др.) [23];

- метрологические и технические характеристики тепловизора (спектральная характеристика, температурная чувствительность, температурное разрешение, пространственное разрешение и др.) [9, 10];

- температура корпуса прибора, окружающей среды и др.

Рассмотрим подробнее факторы, влияющие на точность результата измерений, а также существующие методы повышения точности бесконтактного измерения температуры при энергоаудите.

5. Методы исследования

Тепловизоры градуируются по излучательной способности абсолютно черного тела и определяют радиационную температуру, которая ниже физической, поскольку она зависит от излучательной способности объекта исследований.

Излучательная способность описывается коэффициентом излучательной способности (теплового излучения), характеризующим способность исследуемого объекта (в рассматриваемом случае наружных поверхностей ограждающих конструкций) излучать электромагнитную энергию. Излучательная способность зависит от длины волны, температуры и физико-химических свойств объекта (материал, агрегатное состояние и качество поверхности) [9, 10]. Из-за этого производить градуировку тепловизоров по реальным объектам невозможно.

Коэффициент ε_T излучательной способности материала поверхности ограждающей конструкции (интегральный коэффициент теплового излучения или степень черноты) позволяет найти ее истинную температуру T и определяется из следующего соотношения:

$$\varepsilon_T = \frac{B_T}{B_{0T}},$$

где B_T – полная энергетическая яркость исследуемого объекта при температуре T , B_{0T} – полная энергетическая яркость абсолютно черного тела при той же температуре T .

Полная энергетическая яркость абсолютно черного тела при абсолютной температуре T , согласно закону Стефана-Больцмана, определяется выражением [25, 26]:

$$B_{0T} = \sigma \cdot T^4,$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м²К⁴.

Радиационной температурой T_p называют условную температуру реального тела, численно равную такой температуре абсолютно черного тела, при которой их интегральные энергетические яркости равны [27, 28]:

$$B_T = \varepsilon_T \cdot B_{0T} = B_{0T_p}.$$

В соответствии с законом Стефана-Больцмана получим [29]:

$$\varepsilon_T \cdot \sigma \cdot T^4 = \sigma \cdot T_p^4.$$

Истинная температура ограждающих конструкций всегда больше радиационной ($0 < \varepsilon_T < 1$) и определяется по формуле:

$$T = T_p \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}}.$$

Зная значение интегрального коэффициента теплового излучения, можно по радиационной температуре определить реальную температуру наружной ограждающей конструкции.

Наиболее распространенные модели тепловизоров применяются для измерения температур в диапазоне от минус 50 до плюс 650 °С, наиболее дорогостоящие модели позволяют измерять температуры до 2500 °С.

Влияние излучательной способности заключается в неточности определения интегрального коэффициента ε_T теплового излучения, что в свою очередь приводит к существенной методической погрешности. Причем данная погрешность $\Delta \varepsilon_T$ может существенно превышать инструментальную погрешность самого тепловизора.

Погрешность определения действительной температуры наружных поверхностей зданий по их радиационной температуре находится по формуле [28]:

$$\Delta T_\varepsilon = -\frac{1}{4} T \cdot \frac{\Delta \varepsilon_T}{\varepsilon_T}.$$

Подбор значения коэффициента ε_T излучательной способности объекта по имеющимся специализированным справочникам может быть произведен с погрешностью не менее $\pm 10\%$, а иногда и до $\pm 50\%$.

Таким образом, 10 %-ная погрешность в определении ε_T влечет за собой 2,5 %-ную погрешность в измерении температуры объекта инфракрасным пирометром и тепловизором [22].

Коэффициент ε_T излучательной способности зависит от химического состава тела, формы объекта, длины волны, температуры, состояния поверхности излучателя (шероховатость, степень окисленности, наличие на ней каких-либо пленок и покрытий) и угла наблюдения.

Следует учитывать, что излучательная способность с возрастанием длины волны λ уменьшается для металлов (Fe, Ni, Co, Ag, Cu). Графическая зависимость спектрального коэффициента $\varepsilon(\lambda)$ приведена на рис. 4 [22].

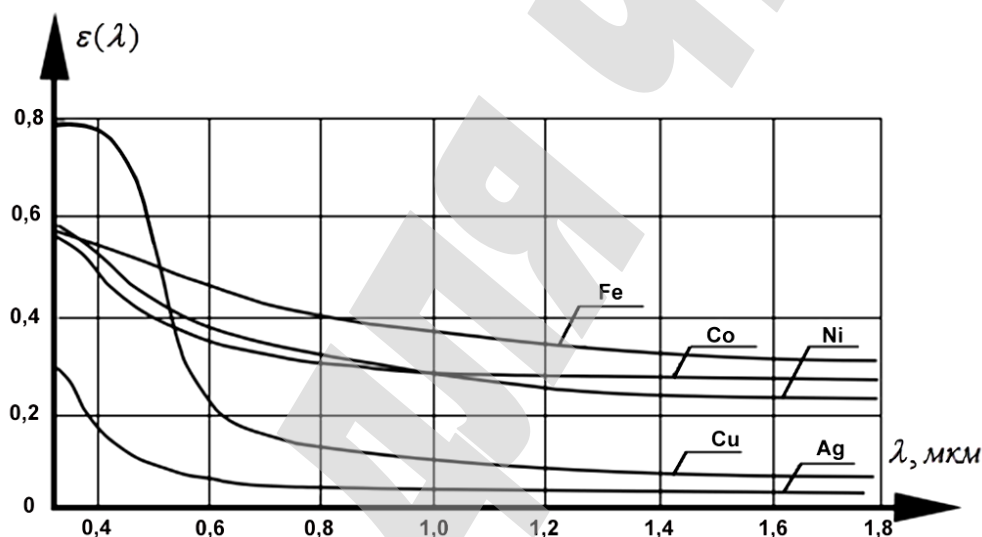


Рис. 4. Спектральный коэффициент излучения некоторых металлов

Для диэлектриков спектральный коэффициент $\varepsilon(\lambda)$ увеличивается с ростом длины волны. С ростом температуры интегральный коэффициент ε_T для диэлектриков убывает из-за роста показателя преломления материала, а максимум спектрального излучения смещается в сторону коротких длин волн [10].

Угол наклона оптической оси тепловизора относительно поверхности объекта исследований оказывает влияние на интегральный коэффициент ε_T излучения [25]. Графическая зависимость приведена на рис. 5. Кривая 1 характеризует диэлектрик с показателем преломления 1,5 (рис. 5), кривая 2 – диэлектрик с показателем преломления 2; кривая 3 – диэлектрик с показателем преломления 4 и кривая 4 – металл. Для металлов справедлив закон Ламберта [10] в интервале углов наблюдения от 0 до 40° , а для диэлектриков от 0 до 60° . При больших углах интегральный коэффициент ε_T излучения для диэлектриков сразу стремится к нулю, для металлов, после некоторого увеличения, тоже стремится к нулю. В работе [24] проведены исследования, которые показали, что погрешность, обусловленная влиянием угла наблюдения тепловизора на погрешность измеряемой температуры, не превышает 1 %.

Чем меньше излучательная способность объекта исследований, тем больше его отражательная способность. Паразитное излучение от окружающей среды расположенных рядом объектов, в основном с одинаковой температурой, источников света и солнца (в случае нахождения в зоне действия солнечных лучей) искажает результат измерения. Объект исследований отражает тепловое излучение от соседних объектов с отличающейся температурой, что оказывает влияние на результат измерения из-за трудности выявления излучения, обусловленного отражением. И если температура окружающих объектов существенно выше или ниже, то и влияние будет существенным (в работе [30] проведены исследования, показавшие погрешность в определении ε_T более чем $\pm 50\%$). Но в холодное время года температура окружающей среды обычно ниже температуры поверхности наружных ограждающих конструкций не более чем на 5°C . Это приводит к небольшой погрешности определения температуры с помощью тепловизора до $-0,5\%$ [21].

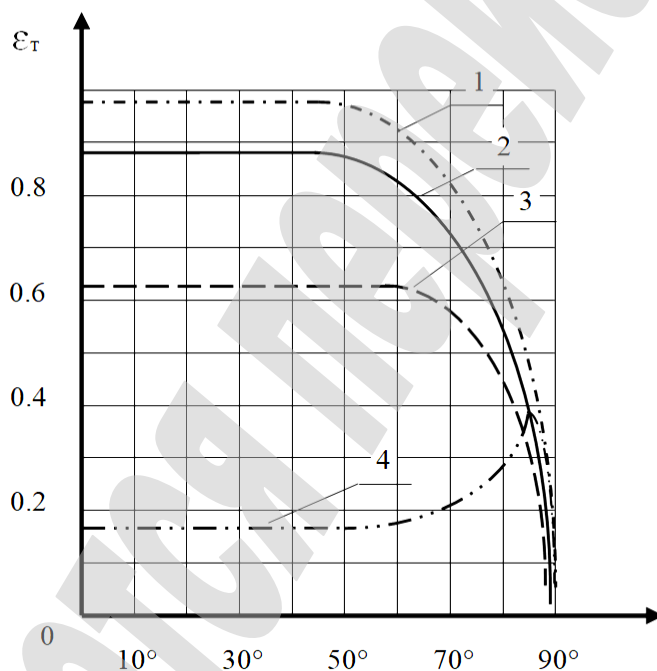


Рис. 5. Зависимость интегрального коэффициента излучения от угла наблюдения

Конвективные воздушные потоки могут оказывать влияние на результат измерения температуры с помощью тепловизора за счет замены прилегающего к объекту исследований слоя воздуха новым слоем, с температурой, отличной от температуры исследуемого объекта. Причем, чем больше разница между температурой поверхности исследуемого объекта и температурой окружающей среды, тем сильнее эффект теплообмена [19]. Результат измерения температуры поверхности может быть занижен примерно в два раза при скорости ветра 5 м/с относительно безветренной погоды.

Водяные пары, углекислота, пыль, дым в воздухе и загрязнения оптической системы поглощают часть энергии, излученной объектом исследований. Атмосферные осадки охлаждают поверхность ограждаемых конструкций и в значительной степени рассеивают инфракрасное излучение. Погрешность из-

мерения, обусловленная влиянием среды, через которую проходит излучение, возрастает с увеличением расстояния до объекта исследований. Так, при расстояниях до 2 м (влажность окружающего воздуха до 60 %) погрешность определения температуры поверхности объекта может достигать 3 % [30, 31].

6. Результаты исследований

Проведенный анализ основных факторов, влияющих на точность проведения энергоаудита, позволяет оценить суммарную методическую погрешность при их одновременном воздействии:

$$\delta \approx \pm \sqrt{2,5^2 + 1^2 + 0,5^2 + 3^2} \approx 4 \%$$

Способы повышения точности проведения энергоаудита, позволяющие уменьшить степень одновременного воздействия основных влияющих факторов:

- экспериментальным путем определяют коэффициент ε_T излучения: измеряют температуру контактным способом, затем, изменяя значения коэффициента ε_T излучения в настройках прибора, добиваются совпадения значения температуры, измеренной контактным способом и бесконтактным;
- по справочным данным определяют коэффициент ε_T излучения;
- поверхность исследуемого объекта подвергают дополнительной обработке для увеличения коэффициента излучения: наносят лакокрасочное покрытие, различные пленки, подвергают механической обработке и др.;
- необходимо периодически производить чистку поверхностей оптической системы пирометра и тепловизора;
- следует избегать препятствий между оптической системой пирометра (тепловизора) и поверхностью исследуемого объекта;
- среда, через которую проходит излучение, должна быть прозрачна;
- температура фона, в большинстве случаев, соответствует температуре окружающей среды, которую целесообразно заранее измерить с помощью термометра;
- уменьшить влияние излучения от других объектов возможно путем их изоляции или отгораживания, в этом случае отраженная температура фона будет равна температуре окружающей среды [7, 19];
- так как значительная часть измерений проводится на открытом воздухе, целесообразно менять местоположение, чтобы учитывать возможное влияние солнца на интенсивность инфракрасного излучения объекта исследований [19, 30];
- рекомендуется проводить энергоаудит зданий рано утром или поздно вечером, принимать во внимание наличие ветра, и при наличии ветра со скоростью, превышающей 1 м/с, значения измеренных температур умножать на поправочные коэффициенты [31];
- измерения необходимо проводить с учетом зависимости коэффициента ε_T излучения от угла наклона оптической оси тепловизора (пирометра);
- при измерениях следует руководствоваться пространственным разрешением тепловизора (разрешающей способностью матрицы, чем больше пикселей, тем лучше);
- для снижения погрешности из-за изменения температуры корпуса устройства необходимо использовать различные методы и средства температурной компен-

сации. К таким методам и средствам относятся: электрический шунт из меди или никеля, биметаллический компенсатор и введение программным способом поправки на температуру корпуса устройства, измеренную цифровым датчиком температуры.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Среди сильных сторон данной работы следует отнести выделение факторов, оказывающих наибольшее влияние на термограмму обследуемого объекта и точность измерения температуры поверхности ограждающей конструкции тепловизором. Получены результаты по оценке степени влияния каждого влияющего фактора на результат измерения и оценена суммарная методическая погрешность от одновременного воздействия всех влияющих факторов.

Weaknesses. Слабые стороны данного исследования обусловлены недостаточными экспериментальными исследованиями. Для исключения данного недостатка необходимо провести дальнейшие экспериментальные обследования различных объектов, с использованием методов планирования эксперимента (для перебора различных сочетаний влияющих факторов при одновременном их воздействии на процесс измерения). При проведении экспериментов необходимо осуществлять контроль термодинамической температуры исследуемого объекта контактными средствами измерения температуры, что позволит оценить реальную погрешность измерения и качество полученной термограммы.

Opportunities. Дополнительные возможности, обеспечивающие уменьшение методической погрешности измерения температуры ограждающих конструкций с помощью тепловизора, открываются в разработке методических рекомендаций по выполнению измерений на основании результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований. Проведение энергоаудита с меньшей погрешностью позволяет повысить энергоэффективность зданий, а значит уменьшить расходы на их отопление.

Threats. Сложности во внедрении полученных результатов связаны зачастую с недостаточной квалификацией персонала, выполняющего энергоаудит, что выражается в некорректной интерпретации полученных при обследовании ограждающих конструкций термограмм (ложные недостатки в теплоизоляции, «мостики холода» и др.). И соответственно, к неправильным рекомендациям по устранению выявленных недостатков.

SWOT-анализ результатов исследований позволяет выделить основную задачу уменьшения методических погрешностей измерения температуры с помощью тепловизора. Решение данной задачи сводится к разработке методики по выполнению измерений тепловизором на основе предложенных в данной работе рекомендаций.

8. Выводы

1. Определены факторы, влияющие на точность проведения энергоаудита с помощью тепловизоров:

- неточность определения интегрального коэффициента ε_T теплового излучения;
- угол наблюдения тепловизора;
- отражательная способность объекта исследований;
- влияние среды, через которую проходит излучение и др.

2. Оценена суммарная методическая погрешность тепловизионных энергообследований (до 4 %). Оценка проведена по результатам анализа факторов, влияющих на точность проведения энергоаудита.

3. Найдены способы повышения точности проведения энергоаудита, позволяющие минимизировать методическую погрешность путем уменьшения степени воздействия факторов, влияющих на точность проведения энергоаудита. Предложенные способы повышения точности заключаются в одновременном учете основных влияющих факторов и позволяют оценить методическую погрешность тепловизионных энергообследований при их совместном воздействии.

Литература

1. Pro enerhoberezhennia: Law of Ukraine No. 74/94-VR from July 1, 1994 / Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» // Verkhovna Rada Ukrainy. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/74/94-%D0%B2%D1%80?lang=uk>
2. DBN V.2.6-31:2006. Konstruktsiibudynkiv i sporud. Teplova izoliatsiia budivel. Kyiv, 2006. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=6919
3. DSTU-NBA.2.2-5:2007. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruktsii. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2008. 44 p.
4. DSTU B EN 13187:2011. Teplovi kharakterystyky budivel. Yakisne vyivlennia teplovykh vidmov v ohorodzhualnykh konstruktsiiakh. Infrachervonyi metod. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 33 p.
5. DSTU B V.2.6-101:2010. Metod vyznachennia oporu teploperedachi ohorodzhualnykh konstruktsii. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2010. 84 p.
6. DSTU 2820-94. Teploviziini systemy. Terminy ta vyznachennia. Introduced: 1996-01-01. Kyiv: DerzhstandartUkrainy, 1994. 27 p.
7. Vavilov V. P. Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol. Moscow: Spektr, 2009. 544 p.
8. Skripal A. V., Sagaydachnyi A. A., Usanov D. A. Teplovizionnaya biomeditsinskaya diagnostika: handbook. Saratov, 2009. 118 p.
9. Osnovy infrakrasnoy termografii / Afonin A. V. et al.; ed. by Nyuport R. K., Tadzhibaev A. I. Saint Petersburg: Izdatel'stvo PEIPK, 2004. 240 p.
10. Gossorg J. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primenenie. Moscow: Mir, 1988. 416 p.
11. Levshina B. C., Novitskiy P. V. Elektricheskie izmereniya fizicheskikh velichin. Izmeritel'nye preobrazovateli: handbook. Leningrad: Energoatomizdat, 1983. 320 p.
12. Sizov F. F. IR-photoelectronics: photon or thermal detectors? Outlooks // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2015. Vol. 12, No. 1. P. 26–52. doi:[10.18524/1815-7459.2015.1.104447](https://doi.org/10.18524/1815-7459.2015.1.104447)
13. Uncooled infrared detectors toward smaller pixel pitch with newly proposed pixel structure / Tohyama S. et al. // Optical Engineering. 2013. Vol. 52, No. 12. P. 123105. doi:[10.1117/1.oe.52.12.123105](https://doi.org/10.1117/1.oe.52.12.123105)
14. Osnovy teplovideniya / Korotaev V. V. et al. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2012. 122 p.
15. Izmerenie elektricheskikh i neelektricheskikh velichin: handbook / Evtikhiev N. N. et al. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 352 p.

16. Fizicheskie osnovy poluprovodnikovoy fotoelektroniki: handbook / Voytsekhovskiy A. V. et al. Tomsk: Izdatel'skiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2013. 560 p.
17. Sopryazhenie datchikov i ustroystv vvoda dannykh s komp'yuterami IBM PC / ed. by Tompkins U., Uebster J. Moscow: Mir, 1992. 592 p.
18. Ilyushin V. A. Mnogoelementnye fotopriemnye ustroystva i teplovizory: handbook. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2003. 57 p.
19. Proshkin S. S. K voprosu o tochnosti izmereniya temperatury s pomoshh'yu teplovizora // Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda. 2014. Vol. 1. P. 51–54.
20. Vavilov V. P., Larioshina I. A. Metodicheskie pogreshnosti teplovizionnogoenergoaudita stroitel'nykh sooruzheniy // Vestnik nauki Sibiri. 2012. Vol. 5, No. 6. P. 49–53.
21. Vavilov V. P. Pessimisticheskii aspekt teplovizionnogoenergoaudita stroitel'nykh sooruzheniy // Defektoskopiya. 2010. Vol. 12. P. 49–54.
22. Frunze A. V. Metodicheskie pogreshnosti energeticheskikh pirometrov i sposoby ikh minimizatsii // Metrologiya. 2012. Vol. 7. P. 19–38.
23. Enyushin V. N., Kraynov D. V. O vliyaniy izluchatel'noy sposobnosti poverkhnosti issleduemogo obekta na tochnost' izmereniya temperatur pri teplovizionnom obsledovanii // Izvestiya KTASU. 2013. Vol. 1 (23). P. 99–103.
24. Golofeeva M. A., Levinskiy A. S., Tonkonogiy V. M. Povyshenie tochnosti izmereniya temperatury s pomoshh'yu priborov infrakrasnoy tekhniki // High technologies in machine engineering. 2016. Vol. 1 (26). P. 14–18.
25. Levinskiy A. S., Golofeeva M. A., Ryabushenko Yu. A. The improving the accuracy of temperature measurement through devices of the infrared technology // Technologies of informations are in education, science and production. 2016. Vol. 2 (13). P. 153–158.
26. Ivanova G. M., Kuznetsov N. D., Chistyakov V. S. Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory: handbook. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2005. 460 p.
27. Kulakov M. V. Tekhnologicheskie izmereniya i pribory dlya khimicheskikh proizvodstv: handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 424 p.
28. Oleynik B. M., Lazdina S. I., Zhagullo O. M. Pribory i metody temperaturnykh izmereniy: handbook. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1987. 296 p.
29. Preobrazhenskiy V. P. Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory: handbook. Moscow: Energiya, 1978. 704 p.
30. Polyakov V. S. Primenenie teplovizionnykh priemnikov dlya vyyavleniya defektov vysokovol'tnogo oborudovaniya // Metodicheskie ukazaniya po kontrolyu oborudovaniya teplovizorami. Leningrad: PEIPK, 1990. 57 p.
31. Galanov E. K., Filatov M. K. Metrologicheskie voprosy izmereniya temperatury poverkhnostey beskontaktnym metodom IK pirometrii // Opticheskiy zhurnal. 2009. Vol. 76, No. 3. P. 44–47.
32. Gobrey R. M., Chernov V. F., Udod E. I. Diagnostirovanie elektroustanovok 0.4–750 kV sredstvami infrakrasnoy tekhniki. Kyiv: KVITS, 2007. 374 p.