

2.9. REMOTE TEMPERATURE MEASUREMENT WITH INFRARED THERMOMETRY WITH UNKNOWN EMISSIVITY OF THE SURFACE OF MATERIALS

Как известно, в базовых отраслях промышленности Украины (металлургии, химической промышленности, промышленности строительных материалов и машиностроении) широко используются энергоемкие высокотемпературные процессы: плавка металлов, обработка поверхности металлических деталей и другие. Такие технологические процессы требуют тщательного соблюдения рекомендуемых температурных режимов, поскольку регулирование температурного режима – наиболее важный и универсальный способ увеличения скорости процесса и повышение выхода готового продукта. Большинство высокотемпературных процессов протекающих при температурах более 900 °С⁶⁵. Однако есть такие процессы, которые протекают при значительно более низких температурах (250 ... 500 °С), но их относят к высокотемпературным, так как температура является главным фактором интенсификации этих процессов для получения максимального выхода готового продукта с высокими технико-экономическими показателями. Поэтому существует постоянный спрос на устройства и методики для бесконтактного измерения как высоких, так и относительно низких температур.

Бесконтактность и быстроедействие контроля температуры приборами, регистрирующими излучения в инфракрасном и световом диапазонах, высокое разрешение, что обеспечивает обнаружение локальных и временных разниц температур на объектах контроля, возможности визуализация тепловых полей, являются основными преимуществами этих приборов в тепловом контроле⁶⁶. Применение таких приборов требует обратить внимание на инструментальную и методические погрешности, которые влияют на точность измерения температуры.

Методические погрешности – это погрешности, присущи данному методу измерений. Они возникают вне зависимости от того, насколько хорошо калиброваны средства измерений. Методические погрешности нельзя исключить простым улучшением метрологических характеристик измерительных приборов, без изменений методики измерений.

В отличие от методических, инструментальные погрешности являются следствием недостатков, присущих самим средствам измерений. Они могут быть уменьшены или исключены при усовершенствовании средств измерений: термостабилизацией критичных к температуре узлов, экранировкой, установкой более чувствительных датчиков, более точной калибровкой и т.д.

Бесконтактные измерения температуры характеризуются большим количеством как методических, так и инструментальных систематических погрешностей. Методические погрешности являются следствием того, что сигналы, вырабатываемые приемниками излучения, определяются не только температурой измеряемой поверхности, но и ее излучательной способностью. Неучет или неправильный учет последней приводит к появлению большого количества методических погрешностей. Как показывает опыт автора, отсутствие собранной воедино этой информации вкупе с общим снижением уровня специальных знаний специалистов, занимающихся пирометрическими измерениями, негативно сказывается на качестве этих измерений. Цель настоящей статьи – дать таким специалистам необходимую информацию, зачастую разбросанную в научных изданиях, не переиздававшихся десятилетиями, и поэтому им незнакомую.

⁶⁵ Свет, Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре измерения [Текст] / Д. Я. Свет. – М. : Наука, 1968. – 236 с.

⁶⁶ Оборський, Г. О. Вимірювання неелектричних величин [Текст]: підручник / Г. О. Оборський, П. Т. Слободяник. – К. : Наука і техніка, 2005. – 200 с.

Основной целью работы является снижение методической погрешности бесконтактного метода измерения температуры на основе исследовании влияния угла наблюдения на коэффициент излучательной способности.

Для поставленной цели в работе предлагается решить следующие задачи:

1. Исследовать особенности измерения температуры по излучению.
2. Провести анализ проблем, связанных с излучательной способностью материалов.
3. Провести экспериментальные исследования, подтверждающие влияние угла наблюдения на коэффициент излучательной способности.

Объектом данного исследования является тепловой контроль приборами инфракрасной техники. Существенным недостатком бесконтактных оптических методов измерения температуры является отсутствие данных об излучательной способности реальных материалов в условиях эксперимента. Это связано с тем, что способность объекта выделять инфракрасное излучение может меняться, поскольку зависит от материала, свойств поверхности, направления наблюдения, а в случае с некоторыми материалами – от температуры.

Для выявления особенностей изменения коэффициента излучения с точки зрения теплового контроля проводился технологический аудит, целью которого было определение влияния угла наблюдения на коэффициент излучательной способности, что в свою очередь приводит к неточному измерению температуры.

Исследование проводилось на базе тепловизора Fluke Ti9 с использованием вспомогательного оборудования – штатив, угломер, персональный компьютер.

Схема процесса измерения представлена на рис. 1.

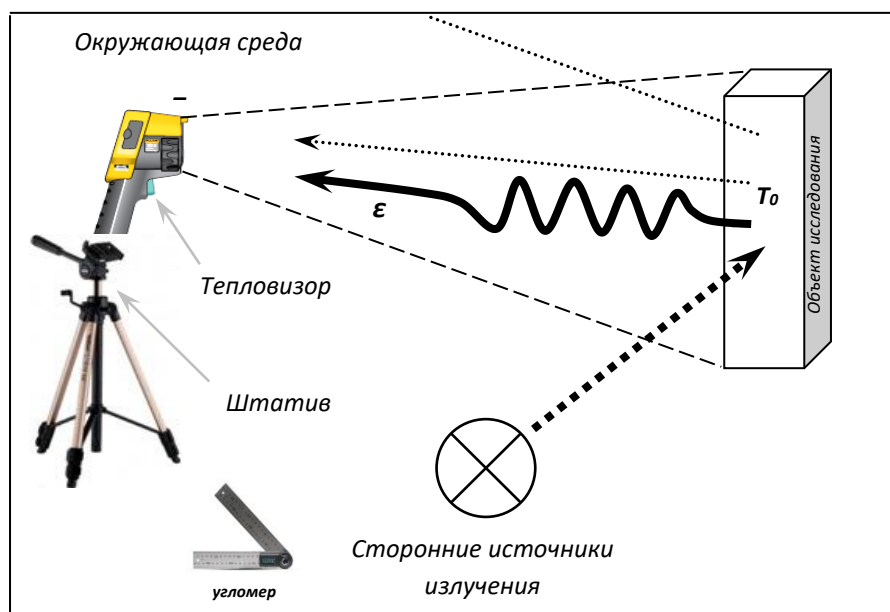


Рис. 1. Схема процесса измерения температуры с известным углом наблюдения

Основным направлением данной схемы является расчет температуры с учетом влияния угла наблюдения на коэффициент излучательной способности. Это позволит в практических условиях повысить точность определения температуры исследуемого объекта.

Измерения действительного значения температуры при неизвестной излучательной способности является актуальным, поскольку проводятся уже не одно десятилетие, и несмотря на некоторый прогресс и успех в данном направлении, задачи, при которых используется ограниченный объем информации о коэффициенте излучательной способности, остаются не решенными. В данном направлении активные работы и исследования проводятся как в Украине, так и за рубежом.

В частности, во многих работах отмечено проблемы и факторы, возникающие при дистанционном определении температуры, а именно недостаточным количеством информации коэффициента излучения поверхности исследуемого объекта⁶⁷. Показано, что коэффициенты излучения нагретых тел зависят от многих факторов, таких как: геометрическая форма и ориентация излучающей поверхности, ее химический состав, физическое состояние, наличие загрязнений на поверхности и т.д. При этом важно знать физическое и химическое состояние поверхности в условиях проведения измерения, поскольку состояние и свойства поверхности меняется с изменением температуры, что, как правило, сопровождается изменением излучательной способности.

Зависимость коэффициента излучения объекта от его температуры, которая присуща некоторым веществам, приводит к тому, что полная мощность теплового излучения объекта зависит от его температуры сложным образом⁶⁸, что затрудняет бесконтактные измерения. Определенные трудности вызывает разнообразие излучающих свойств веществ в ИК диапазоне, которые резко отличаются свойствами друг от друга: газы и металлы, керамика и пластика, пыль и композиционные материалы.

В работах⁶⁹⁷⁰ представлены в инфракрасном диапазоне зависимости излучающих способностей ряда веществ от температуры и длины волны. Показано, что коэффициент излучательной способности большинства металлов (диэлектриков) увеличивается (уменьшается) при нагревании.

Похожие обстоятельства отмечено в работах⁷¹⁷²⁷³⁷⁴, которые отражают основные тенденции современной термометрии по излучению и делается вывод о большом количестве способов определения коэффициента излучения или непосредственно, измеряя излучения тела по сравнению с излучением черного тела при одинаковой температуре, или опосредованно, измеряя коэффициенты отражения этих тел. Во всех случаях необходимо учитывать паразитные факторы.

Альтернативный вариант решения проблемы представлен в⁷⁵⁷⁶⁷⁷, где предлагается измерения температуры с использованием оптических приборов и контактных термометров. Изменяя значение излучательной способности, добиваются равенства показаний между тепловизором и термопарой.

Следует заметить, что в работах отмечается большое количество способов определения коэффициента излучательной способности и какие факторы влияют на это, однако ни в одной не представлены исследования влияния угла наблюдения на излучательную способность, что воспринимается приборами ИК-техники.

⁶⁷ Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст]. Т. 1. / М.А. Брамсон. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

⁶⁸ Jacyszun, S. Efekty szumowe w termometrii [Text] / S. Jacyszun, B. Stadnyk, F. Skoropad, J. Lucyk // Pomiarы, automatyka, kontrola. – 2003. – № 7/8. – P. 15–17.

⁶⁹ Valancius, K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation [Text]: Proceedings / K. Valancius, A. Skrinska // Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – P. 179–185.

⁷⁰ Minkina, W. Pomiarы termowizyne-przyrzdy i metody [Text] / W. Minkina. – Czestochova: Wyd-wa Politechniki Czestochowskiej, 2004. – 243 p.

⁷¹ Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В. П. Вавилов. – М. : ИД Спектр, 2009. – 544 с.

⁷² Свет, Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Д. Я. Свет. – М. : Наука, 1982. – 296 с.

⁷³ Гордов, А. Н. Основы пирометрии [Текст] / А. Н. Гордов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Metallургия, 1971. – 448 с.

⁷⁴ Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение [Текст] : пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1988. – 416 с.

⁷⁵ Bernhard, F. Technische Temperaturmessung [Text] / F. Bernhard. – Springer, 2004. – 1460 p.

⁷⁶ Fam, S. S. Ultrasonics thermometry [Text] / S. S. Fam, L. C. Lynnworth, E. H. Carnevale // Instrument and Control System. – 1969. – Vol. 42, № 10. – P. 107–110.

⁷⁷ Введение в термографию [Текст] / American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation, и The Snell Group. – Россия, 2009. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.thermview.ru/pdf/flukeguide.pdf>. – 10.02.2016.

Таким образом, результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод, что возможность повышения точности измерения температуры путем определения влияния угла наблюдения на коэффициент излучательной способности, что воспринимается приборами ИК-техники является наименее изучаемым фактором. Поэтому возникает необходимость в более детальном его рассмотрении.

Бесконтактный метод измерения температуры находит все более широкое применение во всех отраслях промышленности, однако до настоящего времени носит вспомогательный характер. Бесконтактный тепловой метод является одним из направлений метода неразрушающего контроля и основан на измерении температуры поверхности объекта с помощью приборов инфракрасной техники.

Данный метод широко распространен в связи с рядом преимуществ перед традиционными методами. Во-первых, это высокое быстродействие, что определяется типом приемника излучения; во-вторых, возможность контроля объекта без применения контактных методов измерения; в-третьих, возможность документирования и формирования информационного отчета; в-четвертых, использование в автоматических системах управления в качестве звена обратной связи.

Наряду с очевидными преимуществами, тепловизионные методы имеют также ряд недостатков, к которым можно отнести методическую погрешность, которая может достигать десятки процентов при использовании современных приборов ИК-техники⁷⁸. Это приводит к ошибкам при расшифровке термограмм, исчезновение диагностического признака дефекта на термограмме или, наоборот, отражение несуществующего дефекта.

Основным вопросом, который возникает при расчете температур по результатам тепловизионных измерений, является ошибка в задании излучательной способности поверхности исследуемых объектов⁷⁹. Данная величина характеризуется коэффициентом излучения – числовое значение, равное отношению светимости или яркости объекта при данных температуры и длине волны к светимости или яркости АЧТ при одинаковых параметрах. Значение коэффициента теплового излучения поверхности каждого конкретного объекта является индивидуальным и зависит от многих факторов, в частности: размера объекта контроля и расстояние до него; состояние и тип поверхности объекта контроля; шероховатость материала; состояние окружающей среды, а также угол наблюдения.

Как уже отмечалось, коэффициент излучения зависит не только в основном от вида и состояния материала, но и от угла, под которым расположен прибор к поверхности исследуемого объекта. Причем зависимость от угла наблюдения имеет различный вид для металлов и диэлектриков. Если для диэлектриков в области нормали к поверхности она примерно подчиняется закону Ламберта (рис. 2) и имеет наибольшее значение при измерении по нормали, то измерения температуры поверхности большинства металлов наиболее эффективно проводить под углом $20 \div 30^\circ$, где коэффициент излучения максимален. За пределами данных значений, коэффициент излучения быстро уменьшается до нуля при направлении наблюдения по касательной⁷.

В результате зависимости коэффициента излучения от угла наблюдения, эффективный коэффициент неплоских поверхностей разный в разных точках, хотя материал один и тот же, коэффициент которого по нормали – величина постоянная.

Фактическое значение коэффициента излучательной способности может быть рассчитан по формуле:

$$\varepsilon_{\text{факт}} = \frac{\varepsilon_{\text{вим}}}{K_{\text{кут}}}, \quad (1)$$

⁷⁸ Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения [Текст] : справочное руководство / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. – К. : Наукова думка, 1965. – 304 с.

⁷⁹ Оборський, Г. О. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю [Текст] / Г. О. Оборський, О. С. Левинський, М. О. Голофеева // Технологічний аудит і резерви виробництва. – 2016. – №2/3(28). – С. 4–7.

где $\varepsilon_{\text{факт}}$ – фактическое значение коэффициента излучательной способности;
 $\varepsilon_{\text{изм}}$ – измеряемое значение коэффициента излучательной способности;
 $K_{\text{угл}}$ – коэффициент влияния угла наблюдения.

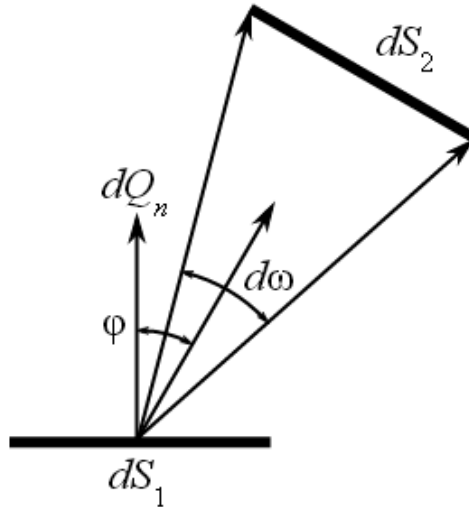


Рис. 2. Закон Ламберта

При проведении эксперимента были получены зависимости коэффициента $K_{\text{угл}}$ от угла наблюдения.

Для металлов такая зависимость имеет вид:

$$K_{\text{угл}} = \begin{cases} 0,0164\varphi^2 - 0,1067\varphi + 1,1464 & 0 \leq \varphi \leq 85, \\ -2,53\varphi + 5,06 & 85 \leq \varphi \leq 90 \end{cases} \quad (2)$$

где φ – угол наблюдения.

Для диэлектриков зависимость $K_{\text{угл}}$ от угла наблюдения наиболее точно описывается формулой:

$$K_{\text{угл}} = -0,0014 \cdot \varphi^3 + 0,022 \cdot \varphi^2 - 0,1 \cdot \varphi + 1,1 . \quad (3)$$

С помощью приборов инфракрасной техники исследовано влияние угла наблюдения на точность измерения температуры детали из стали (рис. 3) и композиционного материала (рис. 4). Определение температуры проводилось непосредственно на реальном объекте, формируя выборку данных:

- действительной температуры, измеренной контактным термометром;
- температуры, которая измерялась с помощью тепловизора под разными углами наблюдения;
- определение температуры с учетом угла наблюдения.

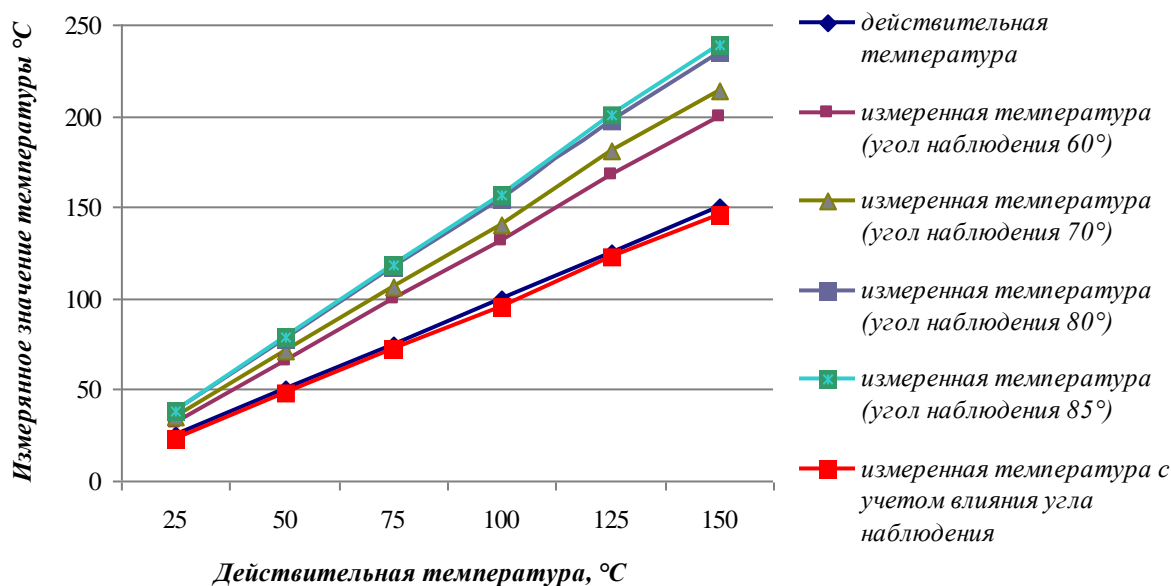


Рис. 3. Влияние угла наблюдения на точность измерения температуры стали:
 ◆ – действительная температура; ■ – измеренная температура (угол наблюдения 60°); ▲ – измеренная температура (угол наблюдения 70°); ■ – измеренная температура (угол наблюдения 80°); ■ – измеренная температура (угол наблюдения 85°); ■ – измеренная температура с учетом влияния угла наблюдения

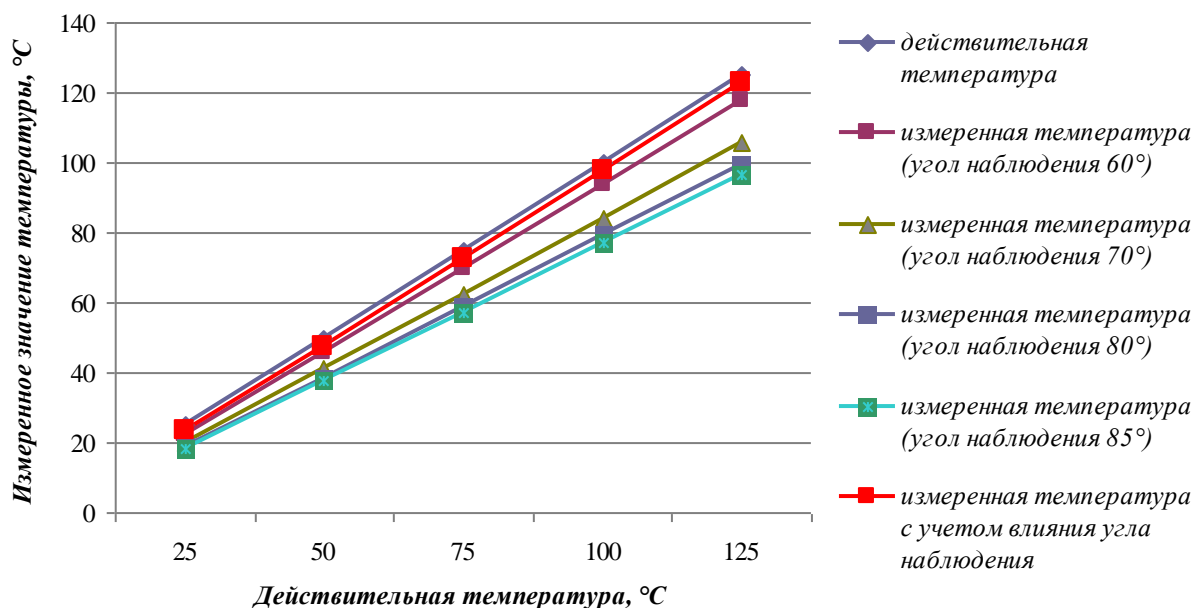


Рис. 4. Влияние угла наблюдения на точность измерения температуры композиционного полимера:

◆ – действительная температура; ■ – измеренная температура (угол наблюдения 60°); ▲ – измеренная температура (угол наблюдения 70°); ■ – измеренная температура (угол наблюдения 80°); ■ – измеренная температура (угол наблюдения 85°); ■ – измеренная температура с учетом влияния угла наблюдения

Анализ полученных результатов влияния угла наблюдения на точность измерения температуры, которые представлены в виде графиков, позволяют сделать вывод, что с

увеличением угла наблюдения погрешность измерения увеличивается. Относительная погрешность измерения температуры детали из стали при угле наблюдения 85° составляет 57 %, а для детали из композиционного материала – 22 %. Таким образом, можно считать, что такое существенное значение погрешности делает измерения бессмысленными. В то же время, влияние угла наблюдения на точность измерения дает возможность свести значение абсолютной погрешности измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники в несколько градусов, что в относительной форме не превышает 1 %.

Необходимо отметить, что:

1) Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить полученные результаты влияния угла наблюдения на точность измерения температуры с помощью инфракрасной техники. В пользу этого утверждения свидетельствуют приведенные графики, которые позволяют оценить погрешность измерения температуры. Использование полученных результатов в отношении различных углов наблюдения позволяют решить задачу определения оптимального коэффициента излучательной способности, что напрямую влияет на точность измерения температуры.

2) К слабым сторонам данного исследования можно отнести то, что решение относительно точного измерения температуры с помощью инфракрасной техники связано с долгосрочным периодом проведения. Причиной этого является предварительное определение угла угломером, в результате чего может быть допущена ошибка.

3) Основными возможностями, обеспечивающими достижение цели исследования, является то, что возможный контроль позволяет проверить не только целую деталь или систему, но и провести испытания отдельных, которые с точки зрения эксплуатационной надежности могут вызывать наибольшие опасения. В связи с большими возможностями контроля объектов по величине температуры, данный метод может получить широкое поле применения во многих отраслях промышленности. Поскольку наглядность тепловизионного метода, возможность измерения действительных значений температуры, оперативность в работе позволяют компенсировать относительно большую цену аппаратуры.

4) Внешним фактором, который может усложнить процесс измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники, является изменение коэффициента излучения объекта, имеющего существенную кривизну поверхности и невозможность его определения в труднодоступных местах. Также следует отметить, что определение температуры с малым коэффициентом излучения приводит к определенным сложностям, а именно, разграничение собственного излучения от отраженного излучения фона. Это приводит к тому, что данный метод может использоваться при температурах, которые существенно отличаются от фоновых. Это позволит снизить относительный энергетический вклад фонового излучения и получить более корректные температурные данные.

Таким образом, анализ результатов исследования позволяет выявить основные направления для успешного достижения поставленной задачи. Среди них:

- повышение точности измерения температуры на основании влияния угла наблюдения на коэффициент излучательной способности объекта;
- нормализация изображения с целью возможности сравнения результатов анализа термограмм для различных участках объекта;
- выделение возможных дефектных зон на термограмме на основе тепловизионного метода, который позволит определить равномерность теплового поля для различных объектов.

В результате проведенных исследований доказано, что измерения температуры по излучению является одним из основных направлений развития высокоэффективной системы диагностики, которая обеспечивает возможность контроля теплового состояния объекта, выявления дефектов на ранней стадии их развития, а также минимизация затрат на техническое обслуживание.

Установлено, что одним из существенных факторов, влияющих на точность измерения температуры, является излучательная способность поверхности исследуемого объекта.

Значение коэффициента излучения в основном приведены в таблицах или представлены в виде графиков. В общем случае коэффициент излучения зависит от вида материала, длины волны, температуры, состояния поверхности и угла наблюдения поверхности объекта. Данные, приводимые в таблицах, имеют довольно значительную разницу. Поэтому температурные зависимости коэффициента излучения позволяют провести более точные измерения температуры объекта.

Установлено, что ошибки в установлении коэффициента излучательной способности существенно влияют на точность измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники. Проведенные исследования влияния угла наблюдения на точность измерения температуры изделия из стали и композиционного полимера показывают, что при изменении угла наблюдения, погрешности измерения температуры тепловизором могут превышать 50 %, что делает измерения бессмысленными. Предложено зависимости, позволяющие свести значение абсолютной погрешности измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники к нескольким градусам, что в относительной форме не превышает 1 %.

References:

1. Свет, Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре измерения [Текст] / Д. Я. Свет. – М. : Наука, 1968. – 236 с.
2. Оборський, Г. О. Вимірювання неелектричних величин [Текст]: підручник / Г. О. Оборський, П. Т. Слободяник. – К. : Наука і техніка, 2005. – 200 с.
3. Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст]. Т. 1. / М.А. Брамсон. – М. : Наука, 1965. – 224 с.
4. Jacyszun, S. Efekty szumowe w termometrii [Text] / S. Jacyszun, B. Stadnyk, F. Skoropad, J. Lucyk // Pomiar, automatyka, kontrola. – 2003. – № 7/8. – P. 15–17.
5. Valancius, K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation [Text]: Proceedings / K. Valancius, A. Skrinska // Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – P. 179–185.
6. Minkina, W. Pomiar termowizyjny-przyrządy i metody [Text] / W. Minkina. – Czestochowa: Wyd-wa Politechniki Czestochowskiej, 2004. – 243 p.
7. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В.П. Вавилов. – М. : ИД Спектр, 2009. – 544 с.
8. Свет, Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур [Текст] / Д.Я. Свет. – М. : Наука, 1982. – 296 с.
9. Гордов, А. Н. Основы пирометрии [Текст] / А. Н. Гордов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Metallurgia, 1971. – 448 с.
10. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение [Текст] : пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1988. – 416 с.
11. Bernhard, F. Technische Temperaturmessung [Text] / F. Bernhard. – Springer, 2004. – 1460 p.
12. Fam, S. S. Ultrasonics thermometry [Text] / S. S. Fam, L. C. Lynnworth, E. H. Carnevale // Instrument and Control System. – 1969. – Vol. 42, № 10. – P. 107–110.
13. Введение в термографию [Текст] / American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation, и The Snell Group. – Россия, 2009. – Режим доступа: \www/URL: <http://www.thermoview.ru/pdf/flukeguide.pdf>. – 10.02.2016.
14. Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения [Текст]: справочное руководство / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. – К. : Наукова думка, 1965. – 304 с.
15. Оборський, Г. О. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю [Текст] / Г.О. Оборський, О.С. Левинський, М.О. Голофєєва // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №2/3(28). – С. 4-7.