

**УДК 614.84**

*В.Ф. Клетиков, д.ф.-м.н., профессор, ИЭРТ НАН Украины,  
Е. М. Прохоренко, к.ф.-м.н., с.н.с. ИЭРТ НАН Украины,  
А.М.Баранов, д.т.н., профессор, НУГЗУ,  
А.И.Морозов, к.т.н., НУГЗУ.*

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТЕПЛОВИЗИОННОГО  
КОНТРОЛЯ ПРИ ПРОТИВОПОЖАРНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ  
ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

(представлено д-ром. техн. наук Андроновым В.А.)

Дано обоснование применения тепловизионного оборудования при притивопожарном контроле ТЭС. Приведены результаты обследования реально действующей ТЭС. Показаны зоны с аномальной температурой, которые могут стать источниками возгорания. Определены возможные места дефектов и повреждений, в которых могло бы возникнуть возгорание, проверена их достоверность. Предложен метод проведения противопожарного контроля с использованием тепловизора.

**Ключевые слова:** тепловизионное обследование, протиповожарные мероприятия.

**Постановка проблемы.** В настоящее время задача своевременного обнаружения возможных мест возгорания является важной и актуальной, так как позволяет предотвратить, или уменьшить количество потенциально возможных пожаров и, как следствие избежать человеческих жертв и значительных материальных потерь. Кроме этого, пожары могут приводить к необратимым последствиям для экологии, природы и т.д. В среднем в Украине каждый день возникает 120 пожаров, в которых гибнет до 9 человек, уничтожается или повреждается до 60 сооружений, наносится экономический урон в объеме 4200 тысяч гривен.[1]. В частности, количество пожаров вызванных нарушениями правил безопасной установки и эксплуатации электрооборудования за 2009 год составило 10324 пожара (23.5% от общего их количества). Следует отметить, что урон от пожаров в данной категории не уменьшается, а только возрастает. Статистика же, пожаров на тепловых электростанциях (ТЭС) показывает, что в 62% случаев всех пожаров причиной является неисправности электрооборудования и в 36% случаев – возгорания угля. Поэтому противопожарные профилактические работы по предупреждению возгорания с использованием тепловизионной техники при обследовании теплового и электрооборудования в угольной промышленности Ук-

раины, которая является стратегической отраслью страны, имеют большое значение.

**Постановка задачи и ее решение.** Сейчас в Украине не существует эффективных профилактических противопожарных методов определения температуры электропроводки и теплового оборудования. Эффективным методом в этом направлении является тепловизионный контроль. В отдельных странах методы тепловизионного обследования различных объектов электроэнергетики утверждены законодательно [5]. В Украине нормативно-правовая база для использования тепловизионной техники при пожарной профилактике объектов отсутствует. Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины разработал свою методику определения температуры электропроводки и оборудования [2], которую авторы использовали при проведении исследований противопожарной безопасности Змиевской ТЭС. Результаты проведенных практических испытаний подтвердили необходимость создания соответствующих нормативных документов, разрешающих применение методов тепловизионного оборудования при противопожарном контроле.

**Приборы и техника эксперимента.** Для проведения обследования применяли метод теплового неразрушающего контроля [3]. Инфракрасная радиометрия позволяет измерить температуру на поверхности тела с высокой точностью. Метод базируется на регистрации собственного теплового излучения обследуемого объекта. Любое тело излучает в широком спектральном тепловом диапазоне (инфракрасное излучение), и данное излучение фиксируется тепловизором. При помощи тепловизионных приборов фиксируем изменение температурного поля на поверхности тела. Вид изменения градиента температур фиксируем аппаратным способом. В дальнейшем из полученных термограмм можем обнаружить не только зону теплового нарушения, но и ее форму, температуру и прочее.

Следует добавить, что при проведении тепловизионного ИК-контроля необходимо определить: а) периодичность его проведения; б) учет влияния различных факторов; в) панорамное обследование всего объекта; г) детальный контроль всех подозрительных мест; д) правильная расшифровка полученных результатов и т.д.

Тепловизионный контроль удобен тем, что позволяет проводить противопожарное обследование дистанционно, обладает высокой скоростью получения сигнала, его наглядностью, удобством в расшифровке сигнала информации. Для нужд обнаружения возможных источников возгорания тепловизионный контроль проводится в пассивном режиме. Под, пассивным режимом, подразумевается то, что тепловое поле формируется и создается в процессе эксплуатации, т.е. собственное тепловое поле, которое формирует на поверхности

изображение в зависимости от тела и его внутреннего состояния. При использовании активной термографии, необходимо применение дополнительного внешнего теплового поля, и при контроле наблюдаем суперпозицию собственного и внешнего теплового поля. Принцип тепловизионного контроля заключается в следующем. При наличии внутри объекта зоны с аномальной температурой, тепловой поток распространяется во все стороны. Математически его можно описать уравнением [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\gamma} \cdot \nabla^2 T + \frac{1}{c\gamma} \cdot W, \quad (1)$$

где  $T$  – температура,  $c$  – удельная теплопроводность тела,  $\gamma$  – удельный вес тела,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества, устанавливаемый экспериментально (скалярная величина, зависящая от природы вещества),  $W$  – количество тепла, остающееся в элементе тела, или мощность источников тепла. Уравнение позволяет учитывать конечную скорость распространения тепла и позволяет точно определить его количество. Зная прошедшее количество тепла, и температуру на поверхности объекта можем посчитать температуру внутри, в точке разогрева. Точное решение уравнения Лапласа (выражение (1)) в общем случае является очень сложной задачей. Поэтому будем пользоваться приближенными формулами:

$$Q = \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (2)$$

где  $Q$  – теплотери (количество тепловой энергии, выделившееся на поверхности),  $R$  – тепловое сопротивление, величина, зависящая от размеров объекта и его свойств,  $T_1$  – температура внутри тела,  $T_2$  – температура на поверхности тела.

Температурное поле на поверхности напрямую связано с теплотерями. Температуру фиксируем тепловизором. Принцип тепловидения базируется на фиксации теплового потока с поверхности тела. Тепловой поток (количество тепла прошедшее через определенную площадь в течении единицы времени) отражает изменение температурного поля на поверхности тела. Тепловая энергия с поверхности излучается по закону Стефана-Больцмана:

$$W_\lambda = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$  – постоянная

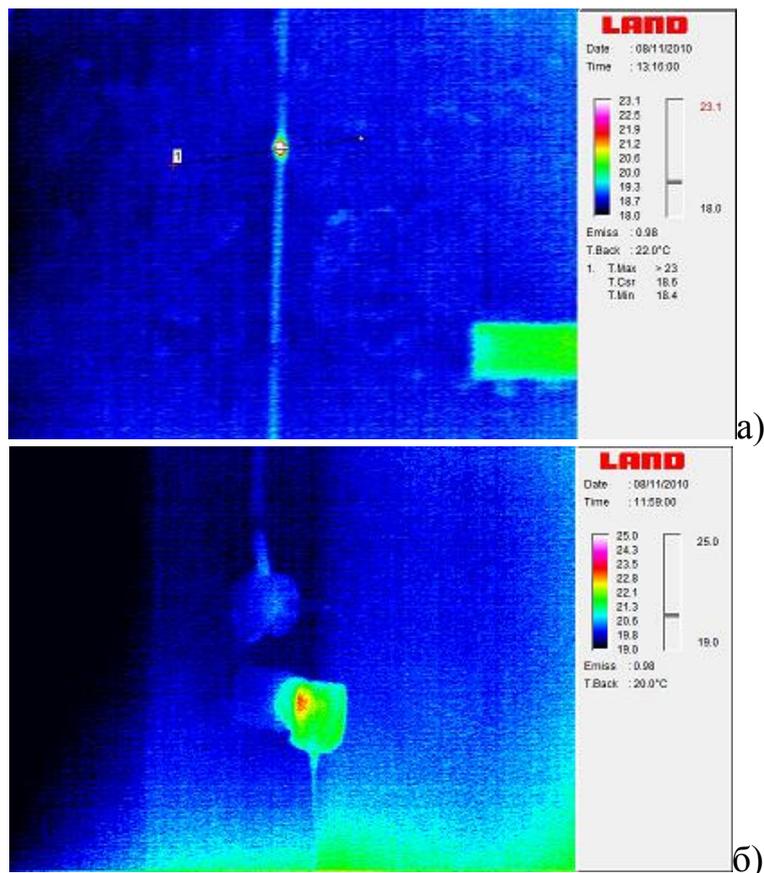
Стефана-Больцмана,  $T$  – температура в градусах Кельвина на поверхности объекта,  $\alpha$  – угол между тепловизором и нормалью к плоскости исследуемого объекта.

В наших исследованиях использовался тепловизор Ti-814, работающий в диапазоне температур  $-50$  –  $+1500$  С. Он имеет пространственное разрешение 1,3 мрад, температурную чувствительность 0.08 С, диапазон частот 8.5–14 мкм, оснащен неохлаждаемой матрицей FPA болометра на основе аморфного кремния ( $320 \times 240$ ). При его помощи на объекте мы определяли температуру в точках на поверхностях зон, где есть аномалия, а затем из выражения (3) находили тепловой поток. Из теплового потока получали тепловые потери ( $Q$ ), которые подставляли в выражение (2) и вычисляли температуру внутри аномалии. И соответственно, по полученной тепловизором температуре на поверхности обследуемого объекта, вычисляли значение внутренней температуры. Вычисленные, таким образом температуры являются приближенными. Для получения точного решения необходимо пользоваться полным решением уравнения Лапласа.

На основе проведенной тепловизионной съемки получили термограммы. Проведя анализ этих термограмм, получили форму дефекта, его температуру, место нахождения. Упрощает работу то, что при проведении противопожарного контроля нет необходимости точно определять форму и размер нарушения, нужно только найти зону, где есть аномальные отклонения по температуре.

**Проведение эксперимента.** Все испытания проводились на реальном объекте. Как объект испытаний использовали Змиевскую ТЭС, вырабатывающая электроэнергию с помощью 10-ти энергоблоков общей мощностью 2450 МВт. Приготовление угольной пыли для сжигания происходит в шаровых барабанных мельницах. Транспортировка угольной пыли в топку осуществляется горячим воздухом. Температура пламени в топке –  $1000^\circ\text{C}$ . Наиболее важными элементами для обследования, с точки зрения пожароопасности являются зоны с аномальным отклонением температуры. Поиск данных таких зон проводился вдоль линий электрических цепей и на поверхности теплового оборудования. Контрольная проверка, при помощи тепловизора, в котлотурбинном цехе сразу позволила найти тепловые аномалии. Некоторые из них относятся к электро- та энергооборудованию, некоторые к теплооборудованию. Термограммы наиболее характерных отклонений представлены в настоящей работе.

На рисунке 1 приведены точки аномального разогрева электропроводки. Наблюдается локальный разогрев в отдельных местах, а вся остальная линия имеет однородную температуру. Это свидетельствует о том, что в зонах с повышенной температурой имеются определенные проблемные места.

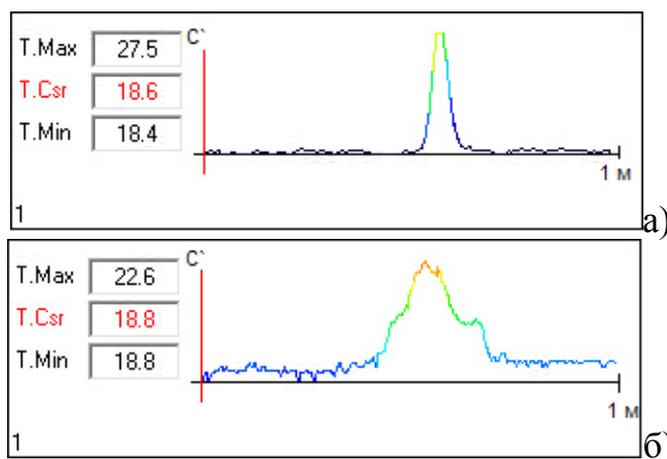


**Рис.1 – «Подгар» соединенных проводов: а) заштукатуренная проводка, б) проводка в оборудовании**

Обследованная проводка, представленная на термограмме Рис.1а находилась в штукатурке, на термограмме Рис.1б – распределение проводов внутри оборудования. Т.е. тепловизионная техника позволяет обнаружить скрытые дефекты, что является важным не только с позиции пожарной безопасности, но и для чисто практических вопросов контроля электропроводки и электрооборудования. Было сделано предположение о нарушении контакта между соединенными проводами. С целью проверки этой гипотезы провели разборку оборудования и демонтаж проводки. Обнаружено обгорание проводов, подводящихся к точке соединения. Инженером по охране труда и пожарной безопасности была запрещена эксплуатация данного оборудования до проведения соответствующего ремонта.

При проведении разборки оборудования и демонтажа проводки было установлено, что глубина залегания дефектов следующая: а) над электропроводкой толщина штукатурки составляла 7мм; б) над проводниками находился воздушный зазор 4мм и слой пластмассы толщиной 2мм. Зная величину, на которой находится дефект, материалы, которые находятся над ним, можем теоретически вычислить температуру в точках дефекта. Применив формулы (1-3), и учитывая,

коэффициент теплопроводности штукатурки ( $\lambda$ ), коэффициент её излучения ( $\varepsilon = 0.92$ ), получим, что температура проводника в точке дефекта составляет 30 С. Аналогичным образом производится расчет и для случая (б). Только в этом случае учитываем толщину воздушного зазора и пластмассового слоя, их теплопроводности, коэффициент излучения пластмассы. Полученная температура непосредственно на соединении составила величину 29 С. Для дальнейших исследований и расчетов используем графики изменения температур, приведенные на рисунке 2:



**Рис.2 – Графики температур дефектов проводки: а) заштукатуренная проводка, б) проводка в оборудовании**

Сравнивая эти графики, видим, что они имеют разную форму. На графике (Рис.2а) пик имеет узкое основание, вершина заострена. На рис.2б основание расширено, вершина пика размазана. Применительно к первому случаю можно отметить, что теплопроводность штукатурного раствора не очень высокая и основная масса тепловой энергии распространяется к поверхности, слабо диффундируя в окрестности. Поэтому на изображении имеем резкий пик температур. Температура на поверхности штукатурки, на тепловом следе составляет 27.5 С, что немного ниже температуры на проводнике в точке дефекта (30 С). Аналогичная температурная кривая будет и в случае если дефект проводки находится на поверхности объекта. Для сравнения, во втором случае (Рис.1б), график температур расширенный и более смазан, т.е. тепловой поток более рассеян. Основной причиной рассеяния теплового потока было излучение от дефекта в воздушный зазор. За счет того, что теплопередача при излучающем процессе значительно ниже, чем температура при контактной теплопередаче, показания в центре теплового пятна (22.6 С) сильно отличаются от собственной температуры дефектного участка составляющей 29 С.

Следующим этапом эксперимента было обследование котла. Для данного объекта важным вопросом является состояние термоизоляционного покрытия. Наличие трещин, сколов, свищей, точек прога-

ра является важным фактором, влияющим на пожароопасность и эффективность работы котлового оборудования. Поэтому, важность диагностики состояния термоизоляционного покрытия не вызывает сомнения. Эта задача является трудоемкой из-за следующих факторов: большая площадь поверхности, затрудненный подход к обследуемому объекту, недостаточная освещенность, повышенная температура и т.д. Зачастую, задача по дефектоскопии не может быть выполнена в полном объеме. Уменьшить, в значительной степени, зависимость контроля от вышеперечисленных факторов позволяет применение тепловизионной техники.

Термоизоляционное покрытие котла обследовалось на различных уровнях высоты. При контроле на уровне 27м обнаружено аномальное тепловое пятно. Термограмма данного повреждения приведена на рисунке 3:

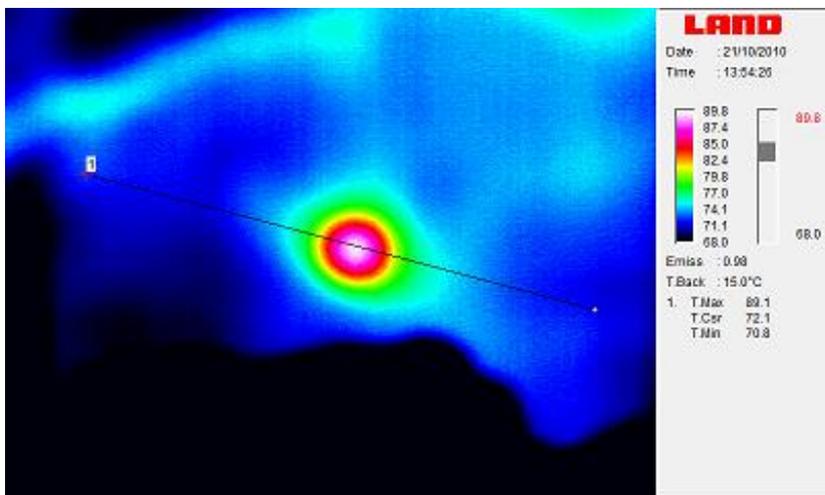


Рис.3 – Термограмма теплового пятна обнаруженного на высоте 27 м

Пятно имеет резко очерченную форму с максимальной температурой, равной 89.1 С в центральной части. Первоначально, визуальным образом, тепловое пятно никак не фиксировалось. И лишь только после тщательной детализации в привязке к термограммам, на поверхности теплозащиты был обнаружен глубокий канал прогара диаметром 4 мм. График изменения температур вдоль линии 1 (рис.3) приведен на рисунке 4:

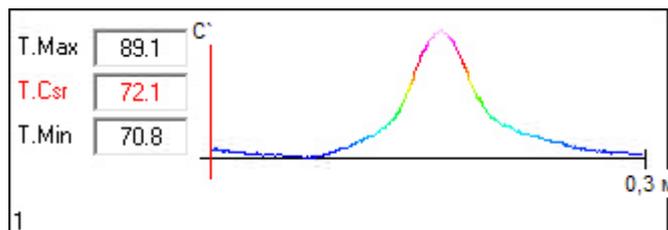


Рис.4 – .График температур точечного “прогара”

Основной идеей тепловизионного обследования есть не только обнаружение дефекта, но и распознавание его, классификация. С этой целью необходимо проводить детальный анализ, как термограмм поверхностей, так и графиков температур. Рассматривая зависимость температур от геометрического расположения, обнаруживаем следующую закономерность: тепловыделение в зоне “прогара” резко локализовано, градиент температур также значителен (угол склона температуры составляет величину больше 75 ). Вне зоны “прогара” температуры однородны, без резких скачков. Из этих данных можно сделать вывод о наличии внутри аномальной области полости и отсутствии в ней теплоизоляционного материала. Все наши теоретические выводы и предположения были подтверждены при практическом осмотре стенок котла.

Дальнейшая проверка позволила обнаружить еще несколько аномально завышенных температурных зон на котлах ТЭС. Обработав термограммы и графики, обнаружили, что скачки температур локализованы и находятся в узком диапазоне. Причина – нарушение целостности отдельных участков стенок и изоляции котлов. На поверхности данных зон существует вероятность возгорания осевшей угольной пыли.

На основании проведенного тепловизионного контроля были предложены мероприятия по устранению выявленных возможных очагов возгорания.

Проведенный тепловизионный контроль объектов ТЭС показал, что эффективность их проверки возросла, а затраченное на это время сократилось, в отличие от нормативного затрачиваемого времени при профилактическом обслуживании данных объектов. Тепловизионный метод контроля является результативным при противопожарной профилактике предприятия. Физическая модель соответствует теоретическим обоснованиям, предложенным в работе. Примененный нами метод тепловизионного контроля проводился с учетом существующего аналогичного опыта в Российской Федерации [5], где методы тепловизионного обследования различных объектов электроэнергетики установлены законодательно. К сожалению, в министерствах энергетики, угольной промышленности и чрезвычайных ситуаций Украины аналогичные документы и соответствующее оборудование отсутствуют.

**Выводы.** Применение тепловизионного контроля для проведения мониторинга теплового и электрооборудования является эффективным, быстросействующим, бесконтактным, наглядным и безопасным для персонала методом. Он позволяет оперативно обнаружить подозрительные зоны, нарушения изоляции, покрытий и прочих мест в которых температура выше установленной и возможно возгорание.

ИК-диагностика существенно сокращает время на проведение противопожарного контроля и благодаря высокой чувствительности дает точный результат. К рекомендациям необходимо отнести: разработку нормативно-правовой базы в Украине для использования тепловизионной техники при пожарной профилактике объектов; введением специального раздела по тепловизионной диагностике в противопожарной безопасности при подготовке и переподготовке специалистов в этой сфере.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стан щодо пожеж та наслідки від них в Україні за 2009 рік. / [Науково-виробничий журнал Пожежна безпека]. – Київ: ЗД «Бліц-Прінт», 2010. – № 2. – с.32 – 34.

2. К вопросу контроля кабельно-проводниковой продукции / [Базалеев Н.И., Бандурян Б.Б., Клепиков В.Ф., Литвиненко В.В., Прохоренко Е.М.]. – Контрольно- измерительные приборы и автоматика. – 2005. – №10. – с.19-23.

3. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник / В.П. Вавилов. – М: Машиностроение. – 1991. – 240с.

4. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности. Т.1. / Ю.М. Мацевитый. – Киев: Наукова думка. – 2002. – 408с.

5. РД 153-34.0-20.363-99. Методика инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ.  
nuczu.edu.ua

В.Ф. Клепиков, Є. М. Прохоренко, А.М. Баранов, А.І. Морозов

### **Застосування методики тепловізійного контролю при протипожежному обстеженні обладнання теплових електростанцій**

Дано обґрунтування застосування тепловізійного обладнання при протипожежному контролю ТЕС. Наведено результати обстеження реально діючої ТЕС. Показані зони з аномальною температурою, які можуть стати джерелами займання. Визначено можливі місця дефектів і пошкоджень, в яких могло б виникнути загоряння, перевірена їх достовірність. Запропоновано метод проведення протипожежного контролю з використанням тепловізора.

**Ключові слова:** тепловізійне обстеження, протипожежні заходи.

V. Klepikov, E. Prokhorenko, A. Baranov, A. Morozov

### **The application of thermal control methodics during fire safety inspection of the thermal power plants equipment**

It is giving the justification the application of thermal control equipment during fire safety inspection of the thermal power plants. The areas of abnormal temperature are shown which can be reason of ignition. The possible location of defects and damages, which could be ignited by checking their authenticity. Proposed a method of fire control with the use of the thermal imager.

**Keywords:** thermal imaging survey, fire prevention.