

Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS



3 (81) 2005
март

ПРИБОРЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Рентгеновская пленка и химикаты

Капиллярная и магнитопорошковая дефектоскопия

Ультразвуковые дефектоскопы, толщиномеры и сканирующие системы

Портативные анализаторы состава сплавов

Приборы вихретокового контроля

Рентгеновское оборудование

Оптические и видео эндоскопы для визуально-измерительного контроля в промышленности



PERGAM

www.pergam.ru
Официальный представитель
в России и СНГ

Диагностическое оборудование и инжиниринг

Пергам-Москва

Офис: Москва, пр-д Ольминского, 3А, 8 этаж.
Тел.: (095) 775-7525, 282-1393, 282-5109, 282-7084,
282-0249, факс: 216-6614, e-mail: info@pergam.ru
Сервисный центр (095) 775-7525, 286-0578,
факс: 216-6614, e-mail: support@pergam.ru

О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков (Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", Москва)

Технология комплексного теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений

Описана технология комплексного теплового неразрушающего контроля в реальных климатических условиях эксплуатации основных параметров строительных конструкций, определяющих их качество, надежность эксплуатации, эффективность энергосбережения: приведенного сопротивления теплопередаче по стенам и окнам, положение точки росы, глубины промерзания, промежутка времени, в течение которого возможно функционирование здания при аварийном отключении теплоснабжения и дефектов строительных конструкций, состояние электрооборудования.

Методики контроля утверждены Министерством энергетики РФ и аттестованы Госстандартом РФ. Достоверность методик и их эффективность подтверждены контролем более 400 строительных объектов различного назначения.

В сентябре 2003 г. Правительство России утвердило "Энергетическую стратегию России на период до 2020 г.". Основными целями государства в данной сфере являются жесткое и безусловное требование достижения намеченных стратегических ориентиров роста энергоэффективности, ужесточение требований к энергосбережению, контроль энергопотребления, установление стандартов энергопотребления и предельных норм энергопотерь, обязательная сертификация энергопотребляющих объектов.

Важным направлением государственной политики становится поддержка специализированного бизнеса в области энергосбережения, пока слабо развитого в России, что позволит сформировать экономических агентов (энергосервисные и энергосберегающие компании), реализующих оптимальные научные, проектно-технологические и производственные решения, направленные на снижение энергоемкости продукции и услуг.

Одним из приоритетных направлений энергосбережения является обеспечение высокого качества тепловой изоляции наружных ограждающих конструкций; соблюдение норм энергопотерь и энергоэффективности при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий. Как показывают исследования, по этой причине *сверхнормативно* теряется до 40 % энергии, расходуемой на отопление зданий.

Определяющими теплотехническими характеристиками качества строительства является *величина приведенного сопротивления теплопередаче ($R_{пр}$) ограждающей конструкции здания* (например, для стен здания норматив фактического приведенного сопротивления в зависимости от требуемого удельного расхода тепловой энергии установлен в пределах 2,3...3,7 м²·°С/Вт), *положение точки росы, положение плоскости промерзания, промежуток времени, в течение которого возможно функционирование здания при аварийном отключении теплоснабжения и др.*

В настоящее время эти характеристики определяются расчетным путем, как правило, на стадии проектирования объекта. Однако эти результаты имеют слишком большую погрешность и не отражают фактические эксплуатационные характеристики строительной конструкции, так как не учитывают наиболее важный этап между ее проектированием и эксплуатацией – этап строительства, на котором проектные характеристики конструкции могут быть существенно искажены как в лучшую, так и в худшую сторону. Многолетний опыт практической работы Технологического института энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО" по тепловизионному обследованию зданий и строительных конструкций [1–5] показывает, что, по крайней мере, половина сдаваемых в эксплуатацию строительных сооружений не соответствуют существующим нормам по энергосбережению. При этом проекты всех сооружений прошли все необходимые обязательные экспертизы на соответствие строительным нормам. Это происходит по той причине, что в процессе строительства нередко допускаются отступления от проектной документации, изменения в технологиях строительства, замены стройматериалов и др.

Для определения фактических значений характеристик строительных объектов Технологическим институтом "ВЕМО" разработана и внедрена в практику технология комплексного теплового (тепловизионного) обследования зданий и строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации (в летний и зимний периоды), включающая:

- энергетическое обследование строительных конструкций (с определением приведенного сопротивления теплопередаче по стенам и окнам);
- определение положения точки росы и координаты плоскости промерзания;
- расчет времени охлаждения внутреннего воздуха здания при аварийных ситуациях;
- рекомендации по толщине утеплителя на участках сверхнормативных теплопотерь.

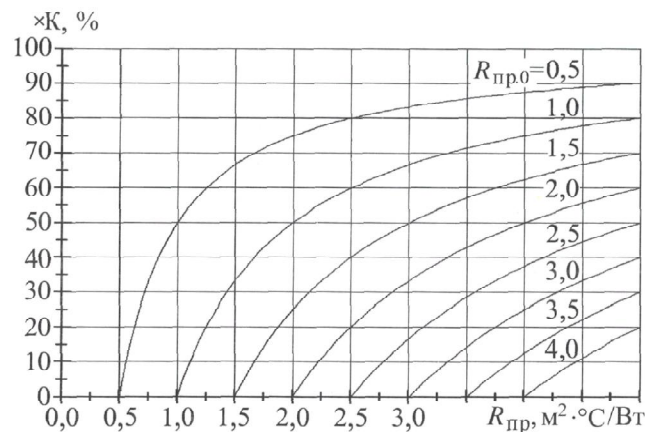


Рис. 1. Зависимость относительных теплотерь от начального значения приведенного сопротивления теплопередаче $R_{пр,0}$

Рассмотрим их более подробно.

На рис. 1 в качестве примера приведены усредненные зависимости влияния величины сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции на эффективность ее энергосбережения. Коэффициенты нормировки (K) согласно МГСН 2.01–99 составляют: для стен – 0,32; для окон – 0,29; для кровли – 0,24; для воздухообмена – 0,09; для фундамента – 0,06.

Порядок контроля $R_{пр}$ определен в ГОСТ 26629–85 [2]. Однако изложенная в нем методика по ряду объективных причин, в том числе вследствие нестационарного характера теплопередачи в ограждающей конструкции [1], не применима на практике, а при попытках ее применения приводила к погрешности до 400 %.

Технологическим институтом "ВЕМО" разработаны и уже 4 года успешно применяются исключаяющие вышеназванные недостатки методика и комплекс программно-аппаратных средств для определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций строительных сооружений и светопрозрачных конструкций (окон) в реальных условиях их эксплуатации [4]. В основе методики лежит решение обратной задачи теплового неразрушающего контроля в многослойной пространственной области с подобластями, имитирующими дефекты, в условиях нестационарного процесса теплопередаче.

Обратная задача теплового контроля сводится к задаче на поиск экстремума (минимума) следующего "функционала правдоподобия":

$$\Phi(\Theta) = \int_0^t (U_0(\tau) - U(\tau, \Theta))^2 d\tau, \quad (1)$$

где Φ – набор параметров, по которым осуществляется минимизация; Θ – набор параметров; τ – текущая температура.

Решение обратной задачи в общем виде опирается на решение прямой задачи в следующем смысле: необходимо так подобрать параметры исследуемого объекта,

чтобы его рассчитанная реакция (некоторая функция времени $U(\tau)$) оказалась по возможности более близка к измеренной реакции $U_0(\Phi)$. Близость понимается в смысле близости в функциональном пространстве (пространстве функций, удовлетворяющих некоторым условиям гладкости).

Полученное реальное значение приведенного сопротивления теплопередаче с соответствующими начальными и граничными условиями, определенными экспериментальным путем, лежит в основе технологии определения точки росы, положения плоскости промерзания и определения теплового состояния строительной конструкции при аварийном отключении теплоснабжения (с определением максимально допустимого интервала времени отключения).

Проблема анализа координаты точки росы и движения фронта промерзания (или оттаивания) влаги, содержащейся в наружных ограждениях здания, непосредственно связана с вопросами долговечности ограждающих конструкций, формирования их реального тепловлажностного режима и сопротивления теплопередаче. Последний фактор определяет эффективность энергосбережения здания. В зоне перемещения фронта промерзания создаются крайне неблагоприятные условия эксплуатации материала вследствие возможного чередования замерзания и оттаивания, что постепенно приводит к снижению прочности, а в конечном счете и к разрушению конструкции.

Анализ процесса промерзания рассматривается как задача, в которой изменение агрегатного состояния (переход воды в лед) происходит при определенной температуре T_k , т.е. имеется четкая изотермическая граница, отделяющая область затвердевшего льда и жидкости.

В этом случае решается система двух уравнений нестационарной теплопроводности (для затвердевшей и незатвердевшей областей) и помимо граничных условий на поверхности тела дополнительно задаются два условия на границе затвердевания:

1. Теплового баланса:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(x = x_k - 0) - \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}(x = x_k + 0) = L_v \frac{dx_k}{dt}. \quad (2)$$

2. Равенства температур:

$$T_1(x = x_k - 0) = T_2(x = x_k + 0) = T_k. \quad (3)$$

Первый член уравнения (1) выражает плотность теплового потока S_1 , который отводится от границы раздела фаз через затвердевшую область; второй член – плотность теплового потока S_2 , поступающего к границе раздела фаз из незатвердевшей области (L_v – значение объемной теплоты фазового перехода).

Задача в такой формулировке называется задачей Стефана о перемещении границы раздела фаз.

В качестве примера, иллюстрирующего разработанный метод, на рис. 2 приведен график движения фрон-

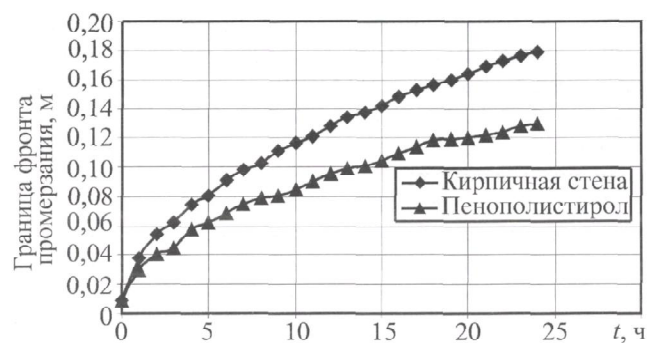


Рис. 2. Движение границы промерзания в однородной стене из кирпича и пенополистирола с учетом эффектов скачка теплоемкости на границе

та промерзания для стены из кирпича и пенополистирола. Температура на внешней поверхности стены принимается равной $T_n = -20$ °С, температура внутренней поверхности $T_0 = 20$ °С, температура заморозания влаги $T_k = 0$ °С. Процесс промерзания рассмотрен в течение 24 часов.

К крайне важным характеристикам жилых зданий относится интервал времени, в течение которого жилой дом может находиться без отопления (например, при отключении системы теплоснабжения вследствие ее аварии). В течение этого интервала времени необходимо успеть провести ремонтные работы или дренирование систем теплоснабжения для исключения размораживания.

В основе технологии определения "безопасного" интервала времени отключения лежит математическая модель, описывающая процесс нестационарной теплопередачи: в наружных ограждающих и внутренних конструкциях; цокольном этаже и чердачном помещении жилого дома, с учетом граничных и начальных условий и внутренних источников энергии. В предлагаемой постановке тепловое состояние жилого дома при возможной аварии в зимний период определяется расчетно-экспериментальным методом.

Методика включает: получение исходных данных посредством инструментального, в том числе тепловизионного измерения необходимых параметров и их обработку (совместное решение системы n дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности в частных производных и связывающей их системы $n - 1$ обыкновенных дифференциальных уравнений теплового баланса с учетом соответствующих граничных и начальных условий).

Например, первая система дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности описывает процесс распределения температуры во времени в наружных стенах дома, вторая система дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности описывает процесс изменения температуры во времени в цокольной части дома и т.п. Размерность системы (количество дифференциальных уравнений) определяется сложностью обследуемой строительной конструкции и требуемой точностью получения результатов.

Одной из проблем, впервые решенной авторами для описываемых задач, является определение погрешности контролируемых величин, в том числе определение зависимости значения погрешности искомой величины (выходной погрешности) от величин погрешности входных данных (входной погрешности) как в реальных условиях эксплуатации объектов контроля, так и в условиях априорного отсутствия эталонов. Решение основано на частотном анализе задачи нестационарной теплопроводности и оценки результатов контроля методами математической статистики.

Для всех видов вышеуказанных диагностических работ после окончания обследования объектов разрабатывается заключение по его оптимальной санации в целях приведения в соответствие с действующей нормативной документацией: оптимального утепления (по критерию цена/качество) для снижения сверхнормативных тепловых потерь; повышения надежности конструкции; необходимых ремонтных работ на электрооборудовании и т.п.

Таким образом, произведя экспериментальные (в том числе тепловизионные) обследования и теоретический анализ полученных данных по разработанным методикам, определяются: основные теплотехнические характеристики наружных ограждающих и светопрозрачных конструкций; погрешность их определения; технология оптимальной санации и ремонта электрооборудования.

Структурная схема технологии комплексного обследования зданий и строительных конструкций включает три основных этапа (рис. 3).

Этап 1. Регистрация первичной информации с контролируемого объекта в реальных условиях его эксплуатации: температурные истории окружающей среды и контролируемого объекта, влажностные характеристики и т.п. и ее предварительная компьютерная обработка.

Этап 2. Определение теплотехнических характеристик обследуемого объекта (приведенное сопротивление теплопередаче по стенам и окнам, точки росы и положения плоскости промерзания, теплового состояния строительной конструкции при аварийном отключении теплоснабжения с определением максимально допустимого интервала времени отключения). На этом этапе осуществляется также диагностика технического состояния электросиловых установок здания, расчет погрешности определения вышеназванных параметров, выявление и идентификация дефектов строительных конструкций, разработка инженерных ситуационных решений по санации объектов.

Этап 3. Подготовка отчетных материалов и заключений с оформлением вкладыша к энергетическому паспорту здания.

На рис. 4–8 (см. стр. 66, 67) приведены, в качестве примера, результаты комплексного контроля строительных объектов.

Все методики утверждены соответствующими министерствами и ведомствами и аттестованы Госстандартом РФ.

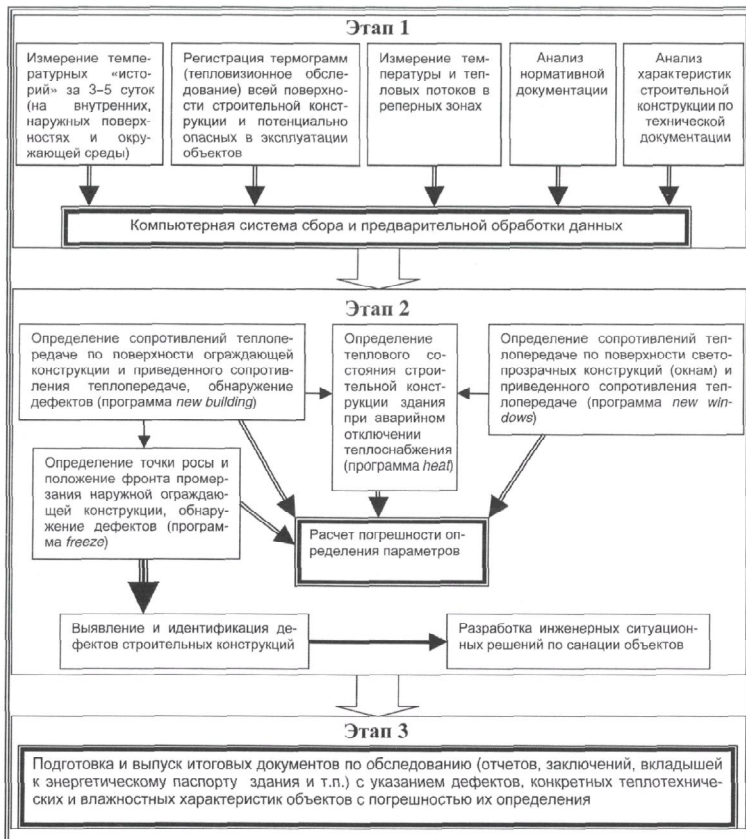


Рис. 3. Комплексная диагностика технического состояния строительных конструкций по анализу температурных полей (тепловая дефектометрия)

Достоверность и надежность эксплуатации методик подтверждена 4-летним опытом работы при обследовании более 400 строительных объектов.

Выводы

1. Впервые решена задача комплексного теплового (тепловизионного) неразрушающего контроля и диагностики технического состояния строительных сооружений и электрооборудования в реальных условиях их эксплуатации (т.е. с учетом нестационарных условий теплопередачи через конструкции) с определением численных значений их теплотехнических параметров:

- сопротивления теплопередаче в каждой точке и $R_{пр}$ наружных ограждающих конструкций;
- $R_{пр}$ светопрозрачных конструкций: окон и светопрозрачных стен;
- координат плоскости промерзания и точки росы в наружных ограждающих конструкциях;
- теплового состояния строительной конструкции при аварийном отключении теплоснабжения (с определением минимального интервала времени отключения);
- погрешности определения теплотехнических параметров контролируемых объектов в условиях реальной эксплуатации и проведения контроля;

На основании проведенных работ предоставляются ситуационные инженерные решения по санации обследуемых объектов.

2. На основе решенных задач (п.1) разработаны не имеющие мировых аналогов, что еще раз подтвердили результаты 16-й Международной конференции по неразрушающему контролю и диагностике (Монреаль, Канада, 30 августа – 4 сентября 2004 г.), технологии и методики теплового неразрушающего контроля строительных конструкций. Они обеспечивают определение теплотехнических и эксплуатационных характеристик в реальных условиях эксплуатации в различных климатических зонах и временах года (в том числе в зимний и летний периоды). Созданные методики позволяют сформировать показатели назначения с погрешностью не более 10–15 %, имеют соответствующие сертификаты Госстандарта РФ и признаны Госэнергонадзором РФ и Минэнерго РФ как базовые для определения качества строительства и эффективности энергосбережения строительных конструкций.

3. Все методики реализованы в виде соответствующей технологической документации и программного обеспечения с использованием стандартных измерительных и вычислительных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.
2. ГОСТ 26629–85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций (введен постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 5.10.1985 г. № 173, срок введения установлен с 01.07.86 г.).
3. Будадин О.Н., Сучков В.И. Автоматизированная тепловизионная система оперативного бесконтактного определения теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций зданий и других сооружений // Энергонадзор-энергосбережение сегодня. 2000. № 4. С. 39–43.
4. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций и строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом / О.Н. Будадин, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков. М.: Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", 2001. 43 с.
5. Энергетические обследования – способ реального энергосбережения и получения дополнительной прибыли: методическое пособие: нормативные документы, информационно-справочные материалы / под. ред. Т.Е. Троицкого и др. М.: СК, 2002. 209 с.

О.Н. Будагин, Т.Е. Троицкий-Марков (Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", Москва)

Промышленный тепловой неразрушающий контроль и диагностика электрооборудования

Описана технология (методика) и приведены примеры теплового неразрушающего контроля электрооборудования, включающие использование тепловизионной техники для регистрации температурных полей, математическое моделирование процесса контроля и специальное алгоритмическое и программное обеспечение обработки информации. Показана эффективность применения этого метода контроля для снижения аварийности и затрат на ремонт электрооборудования, повышения надежности и ресурса этих объектов.

Качество, надежность эксплуатации, пожаробезопасность и остаточный ресурс современных строительных гражданских и промышленных сооружений в немалой степени определяются безотказностью работы электроустановок и электросилового оборудования.

Обеспечение безопасности эксплуатации электроустановок, предупреждение аварийных ситуаций регламентировано "Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденными Приказом Министерства энергетики РФ от 13.01.2003 г. № 6, зарегистрированными в Минюсте РФ 22.01.2003 г. № 4145, устанавливающими сроки, виды, технические средства и технологическую документацию проведения испытаний электроустановок.

Диагностика технического состояния электрооборудования осуществляется как специализированной аппаратурой, которой производят прямые измерения электрических параметров контролируемых объектов традиционными методами, так и приборами для измерения косвенных характеристик электроустановок, например температуры поверхности, на бесконтактном измерении которой основан тепловой неразрушающий контроль — тепловизионная диагностика [1, 2].

Традиционные методы контроля оборудования в основном ориентированы на необходимость вывода его из работы, а тепловизионная диагностика позволяет производить оценку его состояния в процессе работы и выявлять многие дефекты на ранней стадии их развития.

Эффективность применения созданных технологий теплового контроля с использованием тепловизионной техники, дополненной информацией о контактных измерениях температурных параметров, другими параметрами объекта контроля (при соблюдении техники безопасности) и метеорологическими характеристиками окружающей среды на момент проведения обследования [3], обусловлена тем, что при работе электрооборудования под нагрузкой часть электрической энергии переходит в тепловую, характеристики которой можно зарегистрировать специальными приборами.

Материалы, применяемые при изготовлении электрооборудования, можно разделить на ряд групп: проводниковые, изолирующие (диэлектрики), магнитные и полупроводниковые.

Так, выделение тепла в токоведущих частях имеет место вследствие сопротивления проводников протекающему по ним току. Кроме того, в токоведущих частях и в нетоковедущих металлических элементах могут возникать вихревые токи, наличие которых также способствует тепловыделению. В магнитных материалах оборудования происходит выделение тепла вследствие магнитного гистерезиса. В изоляции, находящейся под напряжением, тепловыделение обусловлено так называемыми диэлектрическими потерями.

Одновременно с выделением тепла в оборудовании происходит процесс отвода тепла с его внешней поверхности.

Отвод тепла в этом случае может происходить естественным путем или с использованием принудительных средств охлаждения. Тепловой режим и температурные характеристики проектируемого оборудования обычно задаются в зависимости от класса нагревостойкости изоляционных элементов, соприкасающихся с токоведущими частями, по допустимой температуре нагрева и допустимому превышению температуры оборудования, токоведущей части при допустимых токовых перегрузках [2].

Изоляцию токоведущих частей электрооборудования классифицируют по следующим видам: газовая, жидкая и твердая.

Газообразные диэлектрики используются в виде воздуха, водорода, элегаза (шестифтористая сера).

Воздух при равномерном поле имеет электрическую прочность 15...25 кВ/см. При пробое воздушных промежутков, прилегающих к чистой поверхности, например, изоляторов разрядное напряжение снижается до 3...5 кВ/см, а загрязненной — до 0,5...1 кВ/см. Газообразный диэлектрик подвержен загрязнению и увлажнению, а элегаз при определенных условиях — разложению, что может существенно снизить его электрические характеристики.

Жидкие изоляционные материалы, прежде всего трансформаторное масло, получили широкое применение в электротехнике. Электрическая прочность трансформаторного масла обычно поддерживается в пределах 80...200 кВ/см при испытании в стандартном ряднике.



Значительное снижение пробивного напряжения масла обычно связано с его загрязнением или увлажнением даже в тех случаях, когда это имеет место в ничтожных количествах — сотых долях процента.

Твердые изоляционные диэлектрики могут состоять из органических и неорганических материалов. К твердым материалам относят: волокнистые материалы (дерево, бумага, картон), а также изготавливаемые с их использованием слоистые пластики (бакелит, гетинакс) и другие пластические материалы, керамические материалы (фарфор, стекло) и минеральные вещества, например слюда. Электрическая прочность твердых диэлектриков значительно выше, чем газообразных и жидких, и зависит от вида, рода и состояния применяемых материалов.

Основными видами дефектов твердой изоляции являются: загрязнение, увлажнение, расслоение, потеря электрической и механической прочности, старение изоляции, необратимые химические процессы, изменяющие структуру материала и др. Дефекты в изоляции могут носить как распространенный, так и сосредоточенный характер. Последний вид дефекта трудноуловим традиционными методами технического контроля. Сосредоточенные дефекты, если они обладают повышенной проводимостью, являются источниками локальных тепловыделений, превышающих уровень тепловых излучений с остальной поверхностью диэлектрика.

Локальные тепловыделения в токоведущих системах и контактных соединениях могут быть обусловлены следующими причинами:

— **в контактных соединениях, выполненных сваркой:** подрезами, кавернами, непроварами, шлаковыми и газовыми включениями, пережогами металла, неровностью соединенных проводников и другими причинами. Возникновение дефектов у контактных соединений, выполненных пайкой, связано с неправильным подбором наконечников, непропаем, наличием каверн;

— **в дефектных контактных соединениях, выполненных опрессовкой,** наблюдается: неправильный подбор наконечников, неполный ввод жилы в наконечник, недостаточная степень опрессовки, несоосность и асимметрия провода и гильзы;

— **в контактных соединениях, выполненных с помощью болтов,** чаще всего имеют место дефекты, обусловленные: использованием шайб при соединении медной жилы с плоским выводом из меди или сплава алюминия, отсутствием тарельчатых пружин, непосредственным подсоединением алюминиевого наконечника к медным выводам оборудования в помещениях с агрессивной или влажной средой;

— **в магнитных материалах:** старение межлистовой изоляции магнитопровода, замыкание между отдельными пластинами или пакетами магнитопровода, некачественная сборка и стяжка пакетов, нарезка пластин магнитопровода не вдоль, а поперек оси проката листа, нарушение в общей системе заземления магнитопровода.

С учетом описанных особенностей функционирования электрооборудования разработаны математические модели, описывающие процесс теплового контроля

этих объектов и позволившие создать и реализовать на практике алгоритмическое и программное обеспечение обнаружения и распознавания дефектов электрооборудования на основе обработки термограмм.

Анализ полученной информации заключается в обнаружении дефектов, оценке степени их опасности, рекомендации по ремонту и прогнозированию остаточного ресурса.

Таким образом, тепловой контроль электрооборудования включает следующие основные этапы:

— анализ нормативной, технической документации на контролируемый объект и условий его эксплуатации;

— математическое моделирование процесса теплового контроля;

— регистрация первичной информации: реальных эксплуатационных характеристик, температурных полей, параметров окружающей среды и т.п.;

— обработка информации посредством специального программного обеспечения в целях обнаружения дефектов, определения степени их опасности и др.;

— оформление и выпуск отчетной документации: отчетов по результатам контроля, заключений и т.п.

Периодичность контроля оборудования зависит от его повреждаемости и затрат на профилактику.

В последнее время увеличивается тенденция проведения ремонтов электрооборудования по результатам профилактического контроля и мониторинга, а не в зависимости от продолжительности эксплуатации, что повышает роль и значение теплового контроля.

Применение и совершенствование системы теплового контроля должны обеспечивать возможность выявления в оборудовании дефектов желательного на начальной стадии их развития при минимальных затратах на его проведение, а также учитывать возможные причины повреждения оборудования (табл. 1).

Тепловой контроль электрооборудования дает возможность выявления дефектов, приведенных в табл. 2 [4]. Термограммы некоторых объектов из табл. 2 представлены на рис. 1–5.

При проведении анализа результатов теплового контроля электроустановок учитываются следующие факторы: температурное поле, конструктивные и технологические параметры обследуемого объекта, его токовая нагрузка и тепловая инерция, излучательная способность поверхности, воздействие солнечной радиации или источников искусственного освещения, влияние паразитных излучений, метеорологические параметры среды на момент проведения обследования (температура воздуха, наличие осадков, ветра), геометрические характеристики оптических схем проведения контроля [2, 4].

Проведение тепловизионного контроля осуществляется согласно методикам проведения измерений, утвержденных Министерством энергетики РФ и аттестованных Госстандартом РФ [2].

Опыт работы большого количества различных объектов показывает, что применение тепловизионного контроля позволяет экономить значительные средства предприятиям за счет предотвращения аварий, оптими-

1. Основные причины повреждений оборудования высокого напряжения

Вид оборудования	Элементы конструкций	Причины повреждений
Трансформаторы, автотрансформаторы	Изоляция. Обмотки и магнитопровод. Устройства регулирования напряжения	Увлажнение, термическое и электрическое разрушения (включая частичные разряды); изменение физико-химических свойств, насыщение газами и загрязнение масла. Динамическая неустойчивость при токах короткого замыкания, перегревы, нарушение изоляции элементов (короткозамкнутые контуры). Перегревы, отказы функционирования
Выключатели и разъединители	Контактная система и ее привод. Изоляция	Перегревы, отказы функционирования (разрегулировка). Увлажнение, пробой элементов, изменение характеристик масла (для маслонаполненных конструкций), частичные разряды (для КРУЭ)
Вводы и измерительные трансформаторы	Изоляция. Обмотки и магнитопровод	Увлажнение, термическое и электрическое разрушения (включая частичные разряды); изменение физико-химических свойств, насыщение газами и загрязнение масла. Изменение характеристик, перегревы (в основном из-за витковых замыканий)
Ограничители перенапряжений, разрядники	Шунтирующие и рабочие элементы. Искровые промежутки	Износ, увлажнение. Изменение разрядных напряжений

2. Технические возможности теплового контроля в энергетике

Электротехническое оборудование электростанций и сетей	Выявляемые неисправности
Генераторы	1. Межлистовые замыкания статора. 2. Ухудшение состояния мест спая обмоток. 3. Выход за пределы параметров теплового состояния щеточного аппарата. 4. Нарушение работы систем охлаждения статоров. 5. Неисправность элементов системы возбуждения
Трансформаторы	1. Очаги возникновения магнитных полей рассеивания. 2. Образование застойных зон в баках трансформаторов за счет шламообразования, разбухания или смещения изоляции обмоток, неисправности маслосистемы. 3. Дефекты вводов
Коммутационная аппаратура (рис. 1–2)	1. Перегрев контактов токоведущих шин, рабочих и дугогасительных камер. 2. Нарушение внутрибаковой изоляции. 3. Дефекты вводов, делительных конденсаторов. 4. Трещины опорно-стержневых изоляторов
Маслонаполненные трансформаторы тока	1. Перегревы наружных и внутренних контактных соединений. 2. Ухудшение состояния внутренней изоляции обмоток
Вентильные разрядники и ограничители перенапряжений (рис. 3)	1. Нарушение герметизации элементов. 2. Обрыв шунтирующих сопротивлений. 3. Неправильная комплектация элементов
Конденсаторы	Пробой секций элементов
Линейные ВЧ-заградители	Перегревы контактных соединений
КРУ, КРУН, токопроводы (рис. 4)	Перегревы контактных соединений выключателей, разъединителей, трансформаторов тока, кабелей, токоведущих шин и т.п.
Кабельное хозяйство электростанций	Перегревы силовых кабелей, оценка пожароопасности кабелей
Воздушные линии электропередачи	Перегревы контактных соединений проводов

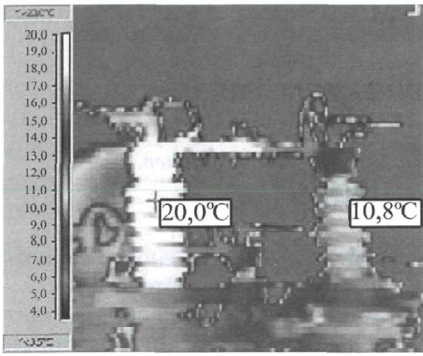


Рис. 1. Опорно-стержневой изолятор с продольной трещиной. Температура в точках: дефекта – 20,0 °С; исправного – 10,8 °С



Рис. 2. Шинный мост 10 кВ на штырьковых изоляторах. Температура изоляторов: дефектного – 20,9 °С; исправного – 17,7 °С

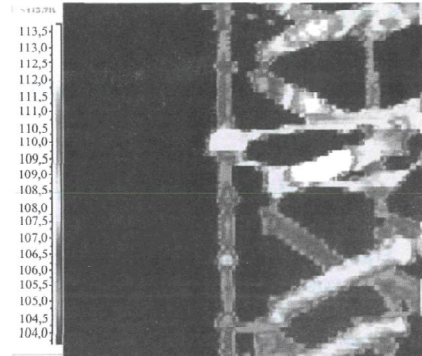


Рис. 3. Вентильный разрядник РВМГ-330 кВ с дефектным элементом

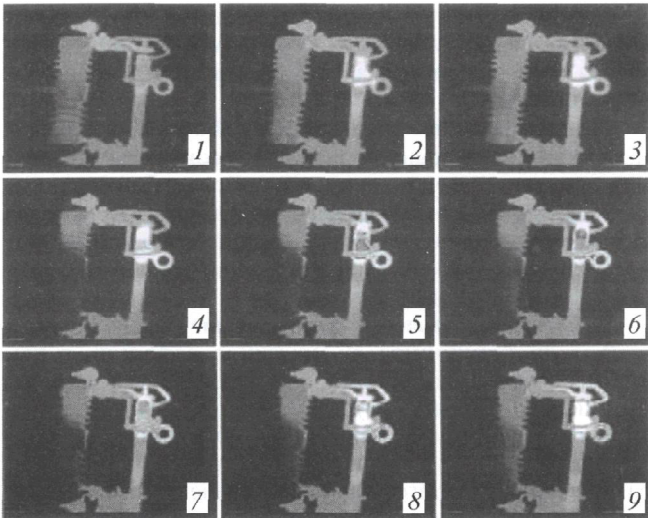


Рис. 4. Термограммы процесса развития дефекта в контакте разъединителя:
1 – начальная стадия развития; 2–8 – процесс развития; 9 – дефект через 27 месяцев

зации эксплуатации оборудования, обнаружения дефектов и их ремонта на стадии минимальных затрат на данные операции.

Выводы

1. Проведение тепловизионного контроля электрооборудования регламентировано "Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденными Приказом Министерства энергетики РФ от 13.01.2003 г. № 6 и является обязательным.
2. В настоящее время созданы технологии (методики) теплового неразрушающего контроля электрооборудования, которые утверждены Министерством энергетики РФ и аттестованы Госстандартом РФ.
3. Своевременное проведение тепловизионной диагностики электрооборудования позволяет предотвратить

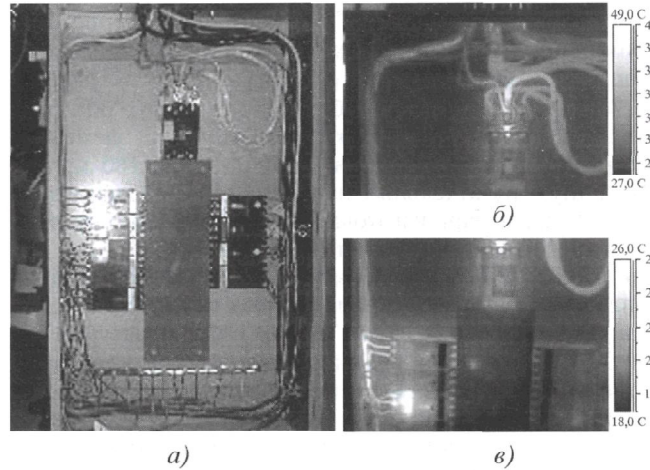


Рис. 5. Щит силовой ЩС1-2:
а – внешний вид; б – подгорание фазы "В" на вводном автомате со стороны ввода (температура до 40 °С); в – подгорание контакта (в 3-м сверху автомате)

аварии, оптимизировать затраты на его ремонт и эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будадин О.Н., Бажанов С.А., Зуев В.И., Круторов О.С., Троицкий-Марков Р.Т., Щербаков М.И. Тепловизионный контроль и диагностика электрооборудования // Энергослужба предприятия. 2003. № 4(6). С. 8–12.
2. Методика тепловизионной неразрушающей диагностики электрооборудования (основные положения): 08.00.00.000 ДМ / Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО". М., 2003. 168 с.
3. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 472 с.
4. Бажанов С.А. ИК-диагностика электрооборудования распределительных устройств. М.: НТФ "Электропрогресс", 2000. 76 с. (Биб-чка электротехника. Прил. к журн. "Энергетик". Вып. 4(16)).

Рисунки к статье Будагина О.Н., Троицкого-Маркова Т.Е.

"Технология комплексного теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений"

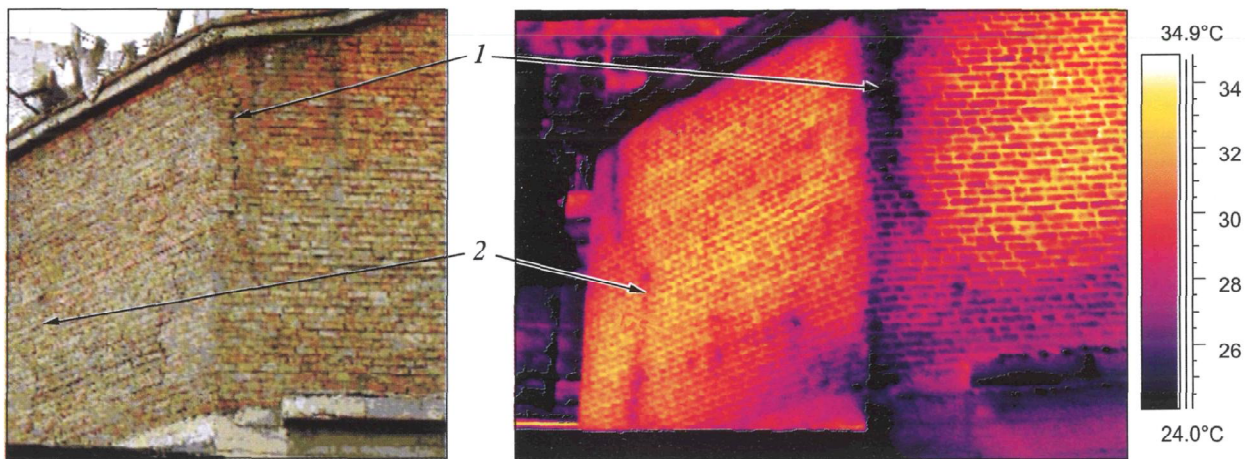


Рис. 4. Тепловой контроль газоходов:
1 - приток воздуха через трещину в кирпичной кладке, разрушение теплоизоляции внутри газохода;
2 - внутренняя трещина

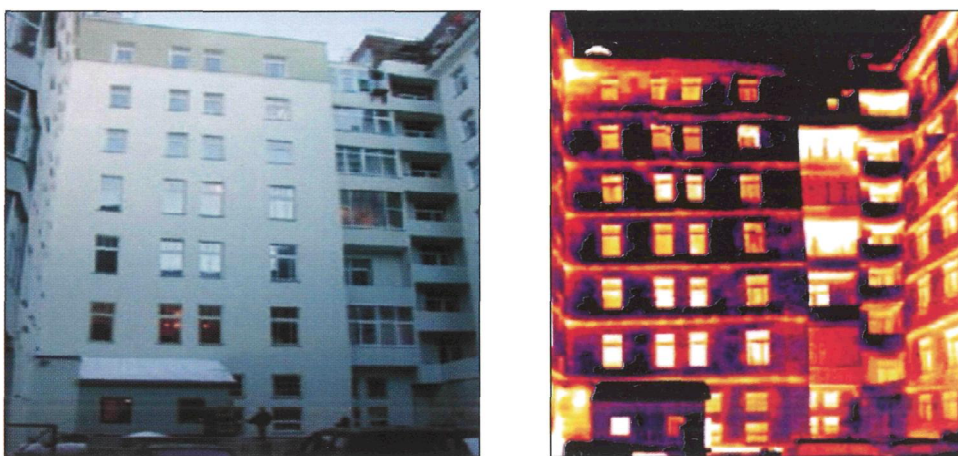


Рис. 5. Тепловой контроль ограждающих конструкций.
Повышенные теплотери через перекрытия между этажами



Рис. 6. Некачественное выполнение облицовки навесного фасада с вентилируемым зазором. Не выдержано расстояние между керамическими плитками, вследствие этого нарушен тепло-влажностный режим работы фасада и понижено качество конструкции

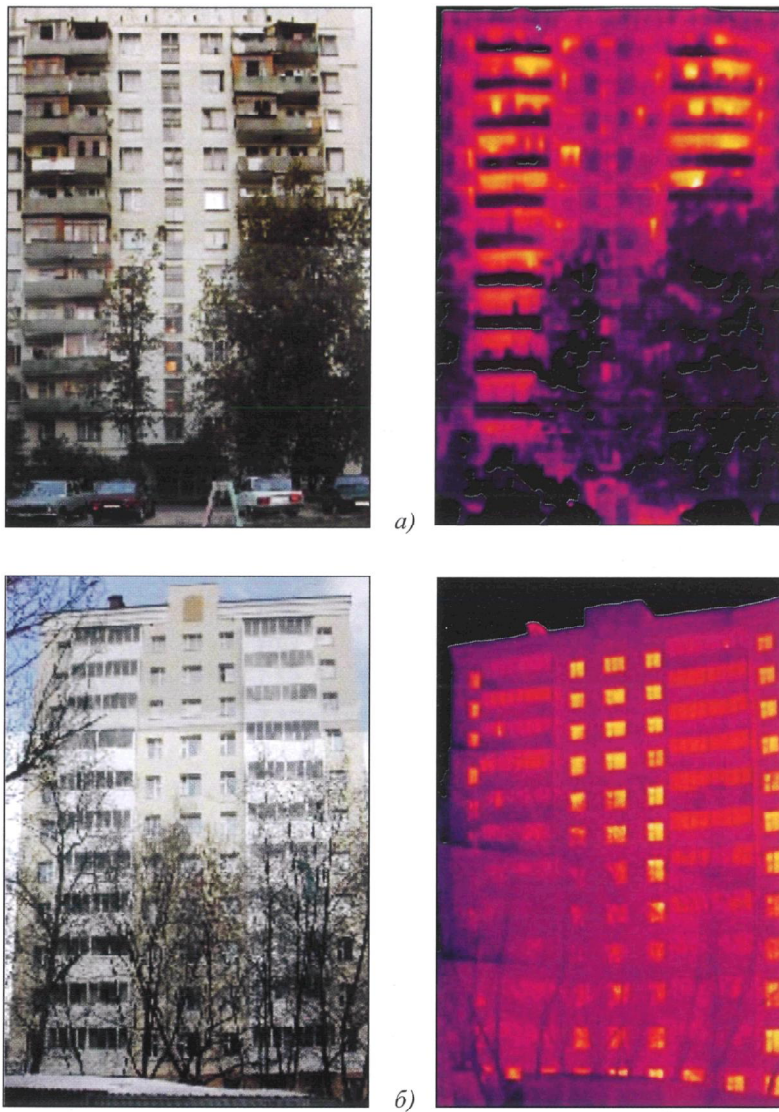


Рис. 7. Санация старого жилого фонда:
 а – до реконструкции, $R_{np} = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ (на термограмме видны ярко выраженные дефекты строительной конструкции); б – после реконструкции, $R_{np} = 3,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$

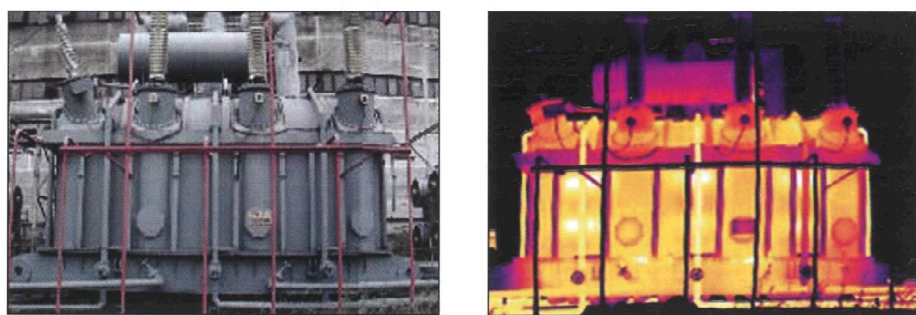


Рис. 8. Результаты контроля силового трансформатора с существенными отклонениями по температуре на левой фазе