



## ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ: КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД

Е. В. АБРАМОВА (НПО «Ин-т термографии», Москва, РФ)

*Изложены результаты комплексного подхода к задачам оптимизации диагностических систем теплового контроля, который включает технологию контроля, аппаратуру диагностики, обучение специалистов, проведение работ обслуживающим персоналом (дефектоскопистами), методики диагностики, направленные на повышение безопасности функционирования и энергоэффективности различных объектов промышленности, в том числе потенциально опасных технических устройств, зданий и сооружений, объектов электроэнергетики и ЖКХ.*

*Results of an integrated approach to problems of optimization of diagnostic systems of thermal control are set forth, covering: control technology, diagnostic equipment, specialist training, work performance by service personnel (flaw detection operators), diagnostic procedures aimed at increase of safety of functioning and energy effectiveness of various industrial facilities, including potentially hazardous technical devices, buildings and constructions, electrical engineering facilities and housing and communal services.*

Повышение надежности и эффективности эксплуатации объектов различных отраслей промышленности в течение всего необходимого срока службы является важнейшей народнохозяйственной проблемой. Она решается только при комплексной диагностике объектов, несущих в себе потенциальную возможность создания аварийной ситуации с финансовыми и даже человеческими потерями. К проблеме технической надежности вплотную примыкают задачи обеспечения энергетической и экологической безопасности.

В настоящее время в России сложилась чрезвычайно опасная ситуация, вызванная тем, что значительная часть основных фондов в стране превысила допустимый ресурс эксплуатации. Данное обстоятельство подтверждает все возрастающее количество аварий и техногенных катастроф, ухудшение экологической ситуации, снижение производительности, эффективности, высокую энергоемкость оборудования и нерациональное использование энергетических ресурсов.

В электроэнергетике износ основных фондов самый высокий и приближается к 60 %, поэтому своевременная диагностика оборудования является жизненно необходимым фактором.

При этом нарушение правил эксплуатации электрооборудования в 2009 г. стало причиной каждого пятого пожара (19,4 %), а ущерб от них составил 33,3 % общего материального ущерба по стране.

Наиболее пожароопасными элементами электроустановок зданий являются электропроводки, на долю которых приходится примерно 40 % всех пожаров и возгораний, связанных с электрооборудованием и электроустройствами, что свидетельствует об актуальности их своевременной диагностики.

Одной из важнейших стратегических задач, поставленной Президентом РФ, перед страной является сокращение энергоемкости отечественной экономики на 40 % к 2020 г. Для ее реализации необходимо создание совершенной системы управления энергосбережением. Экономический эффект (в текущих ценах) составит в 2010–2020 гг. 9691 млрд. руб.

Это подтверждается законодательными актами, в том числе положениями «Энергетической стратегии России на период до 2020 г.», Федеральным законом Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

На сегодня энергоэффективность и энергосбережение входят в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития, названных Президентом РФ Дмитрием Медведевым на заседании Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России, которая состоялась 18 июня 2010 г.

Принятие Закона регламентирует проведение мероприятий по определению параметров энергоэффективности энергопотребляющих объектов. Это и производственное оборудование, промышленные сооружения, объекты электроэнергетики, жилищного сектора и т. п. Например, утепление стен жилых домов старого фонда до современных требований по сопротивлению теплопередаче позволяет снизить потери тепла через них на 60...70 %.

Одним из основных методов диагностики безопасности эксплуатации и оценки параметров энергоэффективности указанных объектов является тепловой контроль (ТК) [1]. Он позволяет выбрать оптимальные температурные нагрузки их функционирования, выявить и определить сте-

пень опасности дефектных узлов по признакам их перегрева по отношению к качественным зонам, определить утечки тепла через ограждающие конструкции зданий, оценить энергетические потери объектов и т. п.

Широкое применение ТК, несмотря на его перспективность и наличие современного парка программно-аппаратных средств, разнообразного как по техническим характеристикам, так и по стоимости, сдерживается в силу основных причин:

- в настоящее время акцент в исследованиях делается на аппаратуру контроля и методы первичной обработки информации и практически отсутствует анализ структуры материалов и изделий на основе данных неразрушающего контроля (НК);
- отсутствия комплексного подхода к внедрению ТК в различных отраслях народного хозяйства;
- отсутствия надежных, аттестованных технологий ТК для большинства объектов [2];
- использования персонала, не прошедшего специального обучения и сертификации.

Развитие метода требует комплексного подхода и включает следующие направления работ, связанные между собой конечной задачей (обеспечение безопасности: технической, энергетической, экологической), общей стратегией и удовлетворяющие принципу концептуального единства:

- глобальные задачи обеспечения безопасности функционирования различных объектов, используемых людьми в процессе своей жизнедеятельности;
- изучение объекта контроля и определение требований к нему;
- анализ возможных дефектов и определение степени их критичности;
- определение информационных параметров критичных дефектов по отношению к физическому полю;
- обоснование задач контроля, выбор метода или группы методов НК и диагностики;
- оптимизация параметров аппаратуры для обнаружения и идентификации дефектов;
- разработка методов обнаружения дефектов, определения их характеристик и оценки параметров качества контролируемого изделия;
- разработка технологий НК и диагностики: создание методик контроля, их отработка на образцах и реальных объектах и последующая аттестация с определением метрологических характеристик получаемых результатов на предмет установления соответствия заявленным в ней показателям их фактическим значениям;
- обучение персонала для проведения диагностики, определение уровня его квалификации и сертификация;
- предоставление полномочий для проведения НК и диагностики организациям (или их структурным подразделениям) путем их аккредитации в выбранной Системе оценки соответствия;

– проведение работ по НК и диагностике различных объектов в соответствии с разработанной методикой;

- оценка качества работы персонала НК с точки зрения обеспечения корректности измерений, достоверности результатов, обоснованности и полноты заключений по определению степени дефектности контролируемого объекта и оценке его технического состояния, выбор наиболее квалифицированного персонала для проведения диагностики;
- корректировка технологии контроля и диагностики по результатам работ лучшего специалиста;
- выдача заключения по техническому состоянию контролируемого объекта.

На этой базе строится прогнозирование ресурса и обеспечение безопасной эксплуатации (технической, энергетической, экологической) объектов различных отраслей промышленности, энергетики, строительства и транспорта.

Несмотря на все расширяющийся объем применения ТК проблемы повышения его качества ставятся все более остро. Это связано с большим разнообразием контролируемых объектов, появлением на рынке относительно дешевых приборов, не решающих проблемы проведения достоверного контроля многих крупногабаритных технических устройств, зданий и сооружений, сложных по конструкции и составу материалов, отсутствием в достаточном количестве методик контроля и квалифицированного персонала. В силу этих причин необходима оптимизация технологий ТК и программно-аппаратных средств под конкретные объекты, обучение и отбор персонала для его проведения с необходимой точностью, анализ и совершенствование навыков экспертов-дефектоскопистов, проводящих сам процесс контроля. Все это требует принципиально нового подхода к управлению и реализации оптимальных диагностических систем ТК.

Существующие технологии ТК имеют большой резерв с точки зрения повышения достоверности, информативности, расширения области применения, в том числе за счет применения математического моделирования, оперативного уточнения и адаптации режимов контроля, совершенствования параметров аппаратных средств применительно к решаемым задачам контроля, совершенствования процесса организации контроля и т.п.

Анализ современного состояния ТК позволил сформулировать задачи, решение которых позволит оптимизировать диагностические системы ТК с учетом свойств объектов, применяемых расчетных методов теплопередачи, используемой аппаратуры и наличием подготовленного персонала, так как любые совершенные модели и уникальные приборы «работают» только в руках квалифицированных специалистов.



Конечная цель любого метода НК — не просто выявить дефект, а оценить влияние этого дефекта на остаточный ресурс.

Опорной точкой при разработке технологии является информация о контролируемом объекте, его составе, геометрических размерах, теплофизических характеристиках, условий, в которых он находится, эксплуатационных нагрузках, возможных дефектах и повреждениях, параметрах, определяющих исправное, т. е. «качественное» состояние предмета диагностики.

Для анализа процессов, происходящих с контролируемым объектом, разработана комплексная математическая модель, позволяющая применять ее для конструкций, отличающихся различными свойствами. Она включает моделирование процесса ТК, расчет и выбор его режимов из условия минимизации погрешности результатов, анализ влияния человеческого фактора на конечные выводы, т. е. проведение оценки функционирования экспертов, проводящих контроль, и оптимизация их действий.

Указанная физико-математическая модель ТК разработана на основе обратного дискретного преобразования Фурье и реализует численное описание процесса формирования температурного поля в многослойной области с дефектами, описывающей широкий класс объектов с различными характеристиками. Разработанная модель обеспечивает повышение быстродействия теоретического анализа в 50...100 раз по сравнению с традиционными (например, с часто применяемым методом конечных разностей) и формирует погрешность расчетов не более 2...5 % [3].

В разработанной модели любой многослойный объект представляется в виде суперпозиции однородных и приграничных слоев. Далее определяется тензор тепловой восприимчивости исследуемого объекта. Рассчитанные значения тензора восприимчивости с помощью амплитуд Фурье-гармоник плотности теплового потока используются для определения его значений при прохождении через стенку контролируемого объекта на полной временной сетке. На конечном этапе решения прямой задачи теплопроводности из полного набора рассчитанных значений плотности теплового потока выбираются лишь те, которые рассчитаны на заданном временном интервале.

Для разработки метода тепловой дефектометрии использован функционал правдоподобия, зависящий только от теплофизических характеристик слоев и параметров дефектов:

$$D^{(in)}(\Theta_j) = S_1 - \frac{S_2^2(\Theta_j)}{S_3(\Theta_j)},$$

где  $S_1...S_3$  — функции начальных температурных условий и характеристик слоев и дефектов.

На основе разработанной модели тепловой дефектометрии предложен новый метод определе-

ния точности решения обратной задачи от погрешности входных данных и начальных условий.

Исследованы методическая и приборная составляющие погрешности на искомый результат. Методическая ошибка задается методикой проведения вычислений с использованием подготовленных измерительных данных и появляется вследствие ограниченной точности численных методов. Приборная ошибка определения конечного результата зависит от класса точности используемых приборов. При проведении тепловой дефектометрии значительная часть измерений проводится контактными приборами с электронной памятью — самописцами измерения температур и тепловых потоков, которые в данном случае выступают в роли источников приборной ошибки. В описанном методе определения погрешности результата в состав приборной ошибки также включена составляющая, вызванная процедурами предварительной обработки входных данных, такими как усреднение температурных серий, проводимое перед вычислениями.

По результатам исследований методическая погрешность составляет 3...5 %. Она зависит от погрешности задания теплотехнических параметров исследуемой конструкции. Учет приборной составляющей, включающей искусственно введенную систематическую приборную погрешность  $\delta$ , увеличивает погрешность вычисления сопротивления теплопередаче до 10...12 %, что вполне приемлемо для использования на практике.

На процессы теплопередачи в многослойных объектах существенное влияние оказывает наличие остаточной влаги в слоях конструкции, что может значительно увеличивать теплопроводность материалов, что особенно важно оценивать при знакопеременных температурных нагрузках, воздействующих на контролируемый объект.

Для анализа этих процессов разработана физико-математическая модель для исследования явлений тепло- и влагопереноса во время фазовых переходов жидкость — твердое тело в многослойных объектах, при этом задача о перемещении границы раздела фаз решена как задача Стефана. Применение модели позволяет проводить численный анализ положения плоскости промерзания путем применения конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения теплопроводности и условий Стефана. Задача актуальна для проведения ТК объектов, находящихся в наружных условиях эксплуатации.

С целью проведения теоретического анализа процесса ТК разработан метод математического моделирования с использованием искусственных нейронных сетей с помощью разложения по собственным функциям задачи Штурма–Лиувилля, дополняющий существующие математические методы.

Основа нейронной сети заключается в том, что бы изначально дать в качестве исходной информации наряду с входными данными еще и конечный ответ, а далее идет процесс изучения отношений между входными и выходными данными. Впоследствии обученная сеть используется для предсказания результатов других наборов входных данных, где ответ еще неизвестен.

Для целей дефектоскопии решены задачи определения внутренних несплошностей материалов и конструкций как на основе решения обратных задач, так и по результатам прямых измерений температурных историй и реализаций тепловых потоков.

Разработаны следующие методы оптимизации технических параметров диагностических систем ТК.

*Метод оптимизации основных режимов проведения ТК*, включающий метод обнаружения дефектов, определения характеристик дефектов, оценку пространственной и временной дискретности регистрации информации.

*Метод оптимизации основных параметров аппаратуры ТК:*

- параметров тепловизионной аппаратуры — оптимальное сочетание величин: поля обзора оптической системы тепловизионной аппаратуры, разрешающей способности по температуре, погрешности измерения температуры, геометрической разрешающей способности и поля обзора, частоты регистрации информации;

- параметров контактных преобразователей регистрации теплового потока и температуры для обеспечения корректного определения этих характеристик на основе анализа и коррекции возмущений температурного поля, вносимых преобразователем;

- времени и скорости прогрева стенки контролируемого объекта и параметров нагревателя (теплообменника) на основе решения краевой задачи нестационарной теплопроводности с использованием критериев Фурье и Био;

- способа регистрации и обработки теплового изображения объектов при взаимном перемещении средств контроля и исследуемой поверхности с высокой скоростью относительно друг друга.

*Метод оптимизации процесса аттестации методик ТК*, важнейшим этапом которого является разработка методик контроля, учитывающих все особенности контролируемых объектов, параметры аппаратуры, режимы контроля и др., которые позволяют получить искомый результат с погрешностями, определяемыми нормативными документами. Подтверждение точности получаемых величин осуществляется на этапе сертификации методики НК на основе их метрологической аттестации, включающей сопоставление характеристик реальных и эталонных дефектов, их площадей,

координат и определение погрешности результатов контроля в зависимости от случайных изменений входных данных как при наличии эталонных образцов, так и в их отсутствие.

Проведенные исследования и разработка соответствующих процедур позволяют оценивать достоверность методик ТК как при наличии, так и в отсутствие эталона.

На основании исследований, с целью обеспечения независимости экспертизы методических документов по НК (МД по НК), разработан «Протокол балльной оценки методического документа по НК», позволяющий объективно оценивать полноту изложения положений МД по НК.

*Метод оптимизации режимов работы операторов-дефектоскопистов и технологий контроля на основе методов статистики и теории оптимального управления.* Важным фактором технологии ТК, определяющим значительную часть погрешности результатов, является человеческий фактор.

Для оценки качества работы и квалификации специалистов-операторов ТК (как в период обучения, так и в производственном цикле контроля реальных объектов) на основе методов статистического анализа и оптимального управления с целью решения задачи дифференциации использования специалистов на предприятиях при обслуживании и обеспечении безопасной эксплуатации сложных технических систем обоснован и идентифицирован обобщенный критерий оценки качества управления процессом НК, позволяющий классифицировать способы управления по степени их «агрессивности» по отношению к нему в рамках решения вопросов безопасного оперативного управления и обеспечения качества готовой продукции. Это позволяет оценить квалификацию оператора и принять управляющие решения по повышению качества контроля.

По результатам проведенных исследований разработаны методики комплексного ТК, включающие определение оптимальных параметров аппаратуры контроля, обнаружение дефектов, оптимальное измерение входной информации (температурных полей и теплового потока), определение оптимальных режимов контроля и оценка и оптимизация функционирования экспертов-дефектоскопистов.

Реализация указанных принципов легла в основу разработки технологий ТК различных объектов. Ниже приведены примеры некоторых из них.

**1. Контроль макро- и микродефектов сосудов под внутренним давлением.** Применение ТК позволяет обнаружить негерметичность фланцевых соединений, дефектов намотки и т. п. Увеличивается достоверность выявления дефектов и безопасность обслуживающего персонала. На рис. 1 показана термограмма баллона из



полимерного материала с обнаруженными дефектами.

**2. Оценка качества и энергоэффективности строительных конструкций для заполнения энергетического паспорта.** Решается обратная задача нестационарной теплопроводности по измерительным и проектным данным, рассчитывают функционал правдоподобия и термическое сопротивление в этой зоне. Затем в соответствии с термограммами фасадов с учетом обнаруженных температурных аномалий определяют интегральную величину приведенного сопротивления теплопередаче  $R_{пр}$ . Технология используется при вводе зданий в эксплуатацию и заполнении «Энергетического паспорта здания». Разработан метод определения энергоэффективности строительных конструкций по результатам прямых измерений температурных полей и тепловых потоков. На рис. 2 показаны результаты ТК здания с определением теплозащитных характеристик слоя утеплителя на основе решения обратной задачи нестационарной теплопроводности.

**3. Контроль технического состояния и безопасности эксплуатации электрооборудования на примере обнаружения дефектов и оценка безопасности функционирования электрических кабелей и электропроводки.** Технология применяется при анализе технического состояния и безопасности эксплуатации электроустановок зданий, оборудования подстанций, объектов промышленности. Контроль электроустановок зданий социальной сферы г. Москвы (детских садов,

школ) показал, что в 40...45 % имеются дефектные элементы и узлы. На рис. 3 показаны результаты ТК электрических кабелей, расположенных в стене. Проведение контроля позволяет своевременно устранить дефекты, в том числе и аварийные с возможными человеческими жертвами.

**4. Контроль технического состояния теплотехнических инженерных систем и оборудования.** Инженерное оборудование, для которого применяют ТК (диагностика), объединено в четырех основных блоках:

дымовые, вентиляционные трубы и газоходы; теплофикационное оборудование (теплообменники, трубопроводы, отопительные приборы и др.); обмуровка и тепловая изоляция оборудования и трубопроводов;

электрооборудование (электродвигатели, защитная и коммутационная аппаратура, проводка, контактные соединения и др.).

Разработанная технология позволяет выбрать оптимальные характеристики и состав средств контроля, проводить оперативный мониторинг, корректно оценивать результаты. Методика контроля дымовых труб и газоходов позволяет определять дефектные зоны с погрешностью не более 15 %.

**5. Контроль концентраторов напряжений и дефектов сложных конструкций в условиях реальной эксплуатации при циклическом воздействии.** Технология используется для проведения предварительного контроля и выявления дефектных зон в конструкциях мостовых кранов (рис. 4).

Конечным итогом диагностики является оценка остаточного ресурса конструкции, т. е. продолжительности работы до первого отказа (под отказом принимается момент времени, когда параметры хотя бы одного элемента будут ниже порогового значения).

Оценка остаточного ресурса на примере объектов из полимерных композиционных материалов включает соответствующие критерии:

– в условиях отработки изделия по результатам ускоренных испытаний;

– в реальных условиях эксплуатации— по результатам измерений температурных полей объекта, его технического состояния и их ретроспективного анализа.

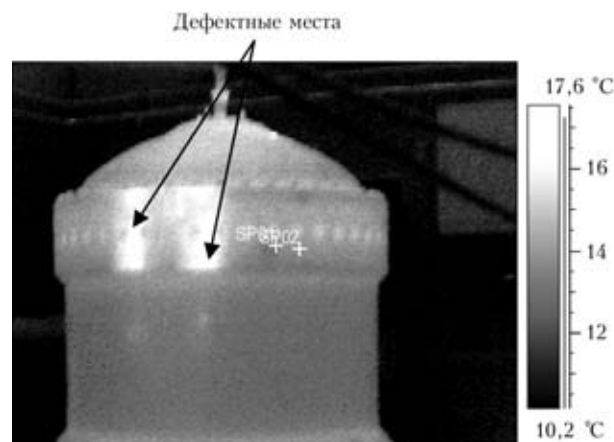


Рис. 1. Дефектные зоны на фланцевом соединении баллона, изготовленного из полимерного материала



Рис. 2. Термограмма, фотография и результаты контроля здания

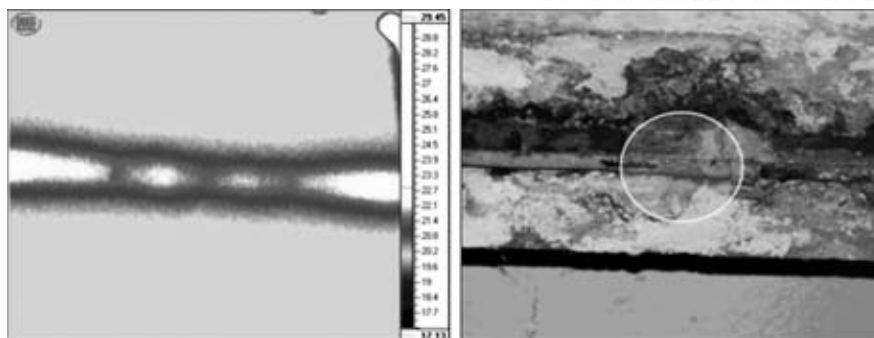


Рис. 3. Термограммы и фотографии силовых электрических кабелей с дефектом

Развивающееся температурное поле дефекта



Рис. 4. Пример обнаружения дефекта (концентрактора напряжения) в металлическом образце мостового крана при циклическом механическом воздействии

*Первый критерий.* Ускорение испытаний достигается интенсификацией деградационных процессов путем создания такого ряда эксплуатационных нагрузок, которые оказывают наибольшее влияние на повреждающее воздействие применительно к данному изделию. В основе методов прогнозирования лежат математические модели изменения параметров объектов во времени, а также в зависимости от уровня внешних воздействующих факторов.

*Второй критерий* основан на ретроспективном анализе характерного информационного (температурного) параметра объекта.

С помощью тепловизионной системы проводят измерения температурных полей поверхности в моменты времени  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ :

$$t_i = t_0 + \Delta t_{\min} i; i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

где  $t_0$  — начальный момент измерения температурного поля.

При этом интервал времени  $\Delta t_k$  на  $k$ -м элементе (потенциально критически опасном дефекте) и минимальный интервал времени  $\Delta t_{\min}$  определяют по числу  $p$  критически опасных дефектов.

Далее приводят полученные температуры  $T_{\max k}(t_i)$  к единым условиям измерений. Экстраполируют зависимость  $R_{\max}(t_{ji})$  по времени  $t$  и по выполнению условия  $R_{\max}(t_{ji}) \leq R_{\text{крит}}$  определяют остаточный ресурс — время выхода элемента из строя  $t_{\max}$ .

## Выводы

Принципы оптимизации включают в себя соответствующие инженерные решения всех основных этапов процесса диагностики — от разработки технологии контроля до проведения аттестации и выбора квалифицированного персонала с целью оценки энергоэффективности, безопасности эксплуатации и остаточного ресурса диагностируемого объекта.

Оптимизация касается применения эффективных расчетных моделей теплопередачи, технологии проведения контроля, включающей выбор аппаратуры и способов анализа измерительных данных с заданной точностью, режимов контроля и обработки результатов, оценки квалификации и эффективности специалистов по НК и, в конечном итоге, прогнозирования эксплуатационных характеристик контролируемого объекта.

1. *Тепловой неразрушающий контроль изделий* / О. Н. Будадин, А. И. Потапов, В. И. Колганов и др. — М.: Наука, 2002. — 476 с.
2. *РД-13-04-2006*. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Сер. 28. Вып. 11 / Под общ. ред. К. Б. Пуликовского. — М.: ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2007. — 32 с.
3. *Инженерные основы ТК. Опыт промышленного применения* / З. Г. Салихов, О. Н. Будадин, Е. Н. Ишметьев и др. — М.: ИД МИСиС, 2008. — 476 с.

Поступила в редакцию  
02.03.2011