



Determination of the Technical Condition of Industrial Chimneys by the Passive IR Thermography Method

Viktor GLUKHOVSKIY¹, Alexander ALEXIEV²

¹ E.O.Paton Electric Welding Institute at National Academy of Sciences of Ukraine,
11 Kazimira Malevicha Str., Kyiv-150, 03680, Ukraine, e-mail: glukhovskyy@gmail.com

² Institute of Mechanics at the Bulgarian Academy of Sciences
Acad. G. Bonchev Str., block 4, Sofia, 1113, Bulgaria, e-mail: alexiev@imbm.bas.bg

Abstract

In this paper, the main points of technical diagnostics of industrial chimneys with a passive IR thermography non-destructive testing method are considered, the main contradictions in the classical approach to diagnostics are revealed and ways to solve this problem are proposed at a higher and informative level.

Keywords: Industrial chimneys, passive IR thermography, non-destructive testing, diagnostics

Определение технического состояния промышленных дымовых труб методом пассивного тепловизионного контроля

Виктор ГЛУХОВСКИЙ, Александр АЛЕКСИЕВ

Дымовые трубы – это конструктивно сложный и важный элемент основных сооружений теплоэлектростанций (ТЭЦ), тепловых электростанций (ТЭС), нефтехимических, металлургических, газоперерабатывающих и других промышленных предприятий. Основной функцией дымовых труб является отвод дымовых газов и их рассеивание в атмосфере [1].

В зависимости от конструктивных особенностей и методов, которые используются, дымовые трубы разделяют на [2]:

- кирпичные, с футеровкой из глиняного кирпича, огнестойких или кислотостойких материалов;
- монолитные железобетонные с прижатой футеровкой из глиняного кирпича и кислотостойких изделий, с футеровкой и вентиляционными промежутками, с внутренним стволом или несколькими внутренними стволами;
- сборные железобетонные, с футеровкой или без нее;
- металлические, свободно расположенные или на растяжках, футерированные или с внутренними стволами.

За последние несколько лет, многие предприятия в Украине и не только, стали переходить на другие виды ископаемого топлива, заменяя в своих производственных циклах природный газ. Данная замена приводит к тому, что фактические условия эксплуатации начинают кардинально отличаться от проектных, что в свою очередь, влечет к ускоренной деградации внутренних слоев дымовых труб, возникновению дефектов и т.д. При этом, техническое состояние дымовых труб непосредственно влияет на надежность и экономичность работы вышеуказанных предприятий, а выход из строя дымовой трубы приводит к отключению энергетических мощностей (электрической и

тепловой энергии) и остановке технологических производств, а также к существенным финансовым затратам.

Различают температурно-влажностное воздействие и химическое воздействие агрессивных сред на дымовую трубу. В первом случае наблюдается отслоение кирпича и бетона лещадками, вертикальные и горизонтальные трещины, образование конденсата и наледей, а во втором – химическая и электрохимическая коррозия бетона, раствора, металла, разрушение защитных покрытий. При этом данный вид повреждений является наиболее опасным, так как вызывает наибольшие разрушения [1].

Таким образом, техническое диагностирование промышленных дымовых труб необходимо организовать так, чтобы исключить разрушения и различные повреждения аварийного характера, которые могут вызвать необходимость отключения агрегатов, подсоединённых к трубе [3].

Известные методы неразрушающего контроля (радиационный, ультразвуковой, магнитный и т.д.) используются в основном для диагностики металлических конструкций. В частности, для оценки качества металлических газоотводящих стволов дымовых труб применяют акустические методы, а применение ультразвукового метода для дефектоскопии бетонных конструкций не является достаточным, чтобы судить о состоянии конструкции дымовой трубы в целом.

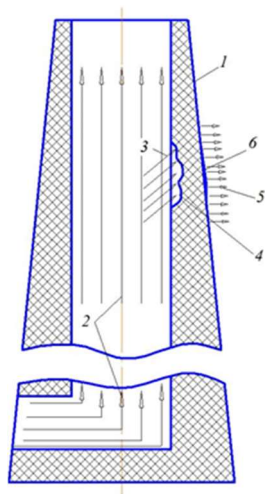
Наиболее предпочтительным из современных методов неразрушающего контроля дымовых железобетонных и кирпичных труб является тепловизионный метод с применением инфракрасной техники. Тепловизионный метод оценки технического состояния дымовых труб основан на использовании основных законов теплового излучения (Планка, Стефана-Больцмана и Кирхгофа), устанавливающих взаимосвязь между температурой поверхности тела, его энергией излучения и излучательной способностью объектов излучения и окружающей среды [4].

В процессе тепловизионной диагностики происходит визуализация теплового (инфракрасного) излучения нагретого контролируемого объекта с помощью специальной тепловизионной техники (тепловизора) и получение изображения в виде термограммы наружной поверхности объекта. Дефектоскопия дымовой трубы обеспечивается путем расшифровки теплового изображения ее наружной поверхности, так как целый ряд повреждений проявляется в виде изменения температурного поля наружной поверхности трубы.

Таким образом, для проведения тепловизионной диагностики промышленной дымовой трубы необходимо, чтобы последняя была в рабочем состоянии, без остановки соответствующего энергетического оборудования, что является основным отличием и преимуществом перед другими методами неразрушающего контроля.

При прохождении дымовых газов по стволу трубы, температура которых достигает 300 °С, происходит конвективный теплообмен с его внутренней поверхностью, далее, по средством кондуктивной теплопередачи, тепло от более горячей зоны трубы распространяется к более холодной и достигнув наружной поверхности трубы где происходит окончательный комбинированный теплообмен с окружающей средой. В последнем случае, кроме конвективной составляющей теплообмена, присутствует и радиационная (рис.1), обеспечивающая возможность применения дистанционного пассивного тепловизионного метода диагностирования.

На рис. 1. Приведена упрощенная схема образования аномального температурного поля на поверхности дымовой трубы в процессе ее эксплуатации.



- 1 – внешняя поверхность трубы;
- 2 – направление потока дымовых газов;
- 3 – направление потока дымовых газов, взаимодействующих с поверхностью ствола трубы;
- 4 – внутренний дефект ствола трубы;
- 5 – температурное поле на поверхности трубы;
- 6 – зона поверхности трубы с локальными температурными аномалиями

Рис.1. Принцип образования аномального температурного поля на поверхности трубы, в процессе ее эксплуатации

В работе [3] показано, что пассивный тепловизионный метод целесообразно применять для диагностики прежде всего дымовых железобетонных труб без вентилируемых каналов, которые наиболее распространены на современных ТЭС, и новых двуслойных конструкций. Температура наружной поверхности τ в таких трубах при стационарном режиме для нормального (проектного) технического состояния ввиду значения отношения наружного диаметра к внутреннему, близкого к 1, определяется по формуле:

$$\tau = t_H + (t_G - t_H) \frac{R_H}{R_0} \quad (1)$$

где t_G , t_H – соответственно температура дымовых газов в стволе трубы и наружного воздуха; R_0 – общее термическое сопротивление теплопередаче дымовых газов к наружному воздуху, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

В случае появления дефекта в дымовой трубе, проявляющегося в виде выпадения кирпичной футеровки или ее деградации, разрушении изоляции, в уменьшении толщины бетона и т.д., ее термическое сопротивление в месте дефекта снижается, а температура наружной поверхности дымовой трубы повышается в сравнении с нормальным состоянием. Таким образом избыточная температура наружной поверхности в дефектном сечении дымовой трубы в сравнении с ее нормальным состоянием $\Delta\tau$ будет иметь вид:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta t \cdot \Delta R \cdot \Delta R_H}{R_0 (R_0 - \Delta R)} \quad (2)$$

где ΔR – термическое сопротивление отсутствующих в месте дефекта конструктивных слоев, характеризующее степень дефектности дымовой трубы $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $\Delta t = t_G - t_H$.

Согласно (2) избыточная температура определяется температурными условиями внутри и снаружи дымовой трубы в момент термографирования, ее общим термическим сопротивлением теплопередаче R_0 и техническим состоянием (величиной ΔR). При отсутствии дефектов в дымовой трубе, когда $\Delta R = 0$, избыточная температура $\Delta\tau$ также равна 0.

Используя табличные данные, которые определяют значения термических сопротивлений различных конструктивных слоев трубостроительных материалов,

включая сопротивления теплообмену на поверхностях, используя выражение (2) может быть рассчитана избыточная температура при известных режимах эксплуатации дымовой трубы.

Тепловизионное диагностирование технического состояния дымовых труб имеет ряд отличий от других строительных конструкций, а именно то, что труба имеет цилиндрическую форму, и, согласно Закону Ламберта [5], излучает тепло не равномерно. Согласно этому закону количество, энергии, излучаемое элементом поверхности dF_1 в направлении элемента dF_2 (рис. 2), пропорционально количеству энергии, излучаемой по нормали $E_n dF_1$ умноженному на величину элементарного телесного угла $d\Omega$ и $\cos \varphi$, т. е.

$$d^2 Q_\varphi = E_n d\Omega \cos \varphi dE_1 \quad (3)$$

Следовательно, наибольшее количество энергии поверхностью излучается в направлении нормали при $\varphi = 0$; с увеличением φ количество излучаемой энергии уменьшается, и при $\varphi = 90^\circ$ оно становится равным нулю.

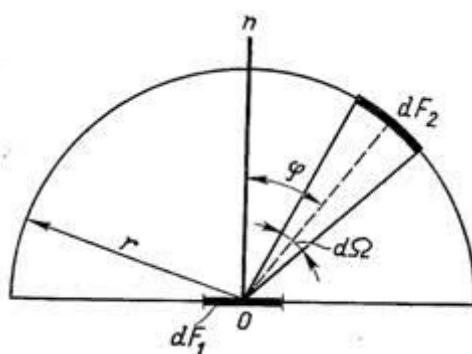


Рис. 2. Излучение элемента dF_1 в направлении элемента dF_2 .

Таким образом, для полноценного диагностирования поверхности трубы необходимо проводить термографию с нескольких позиций. Принято считать, что таких позиций должно быть не менее 3-х (рис. 3).

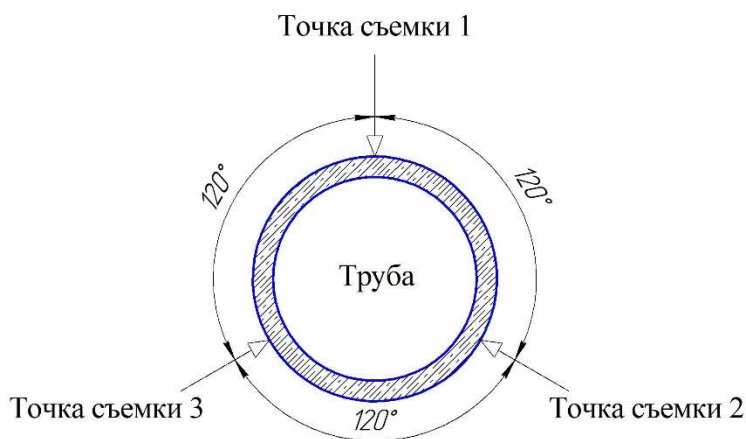


Рис.3. Схема дистанционного диагностирования технического состояния дымовой трубы методом пассивного тепловизионного контроля

Съемка с каждой из позиций, позволяет запечатлеть небольшой вертикальный участок трубы без искажений, а «склеив» их друг с другом, получить полноценную, информативную термограмму всей поверхности трубы. Подобная процедура описана в [6], где рекомендуют использовать три точки визирования. Предложенная схема является не совсем корректной, так как влечет за собой неминуемое возникновение «слепых» на поверхности дымовой трубы. При этом, использование схемы с четырьмя равноудаленными друг от друга точками визирования сводит возникновение «мертвых» зон к минимуму.

Данная схема пассивного теплового контроля был применен на практике при диагностировании дымовой трубы одной из Киевских ТЭС. На рис. 4 представлены результаты тепловизионной диагностики указанной дымовой трубы, где рядом с термограммой участка трубы приведен и одномерный температурный профиль центрального вертикального участка этой же трубы. Труба имеет трехслойную структуру, состоящую из внешнего бетонного ствола, промежуточного слоя теплоизоляционных матов и внутреннего слоя кирпичной футеровки. В результате контроля выявлены горизонтальные перегретые участки, которые проявлены температурными пиками на соответствующих температурных профилях. В [6] представлена таблица дефектов и соответствующих им температурных аномалий. При этом, одни и те же температурные аномалии отвечают разным типам дефектов, что ставит под сомнение правильность выводов о наличии тех или иных дефектов.

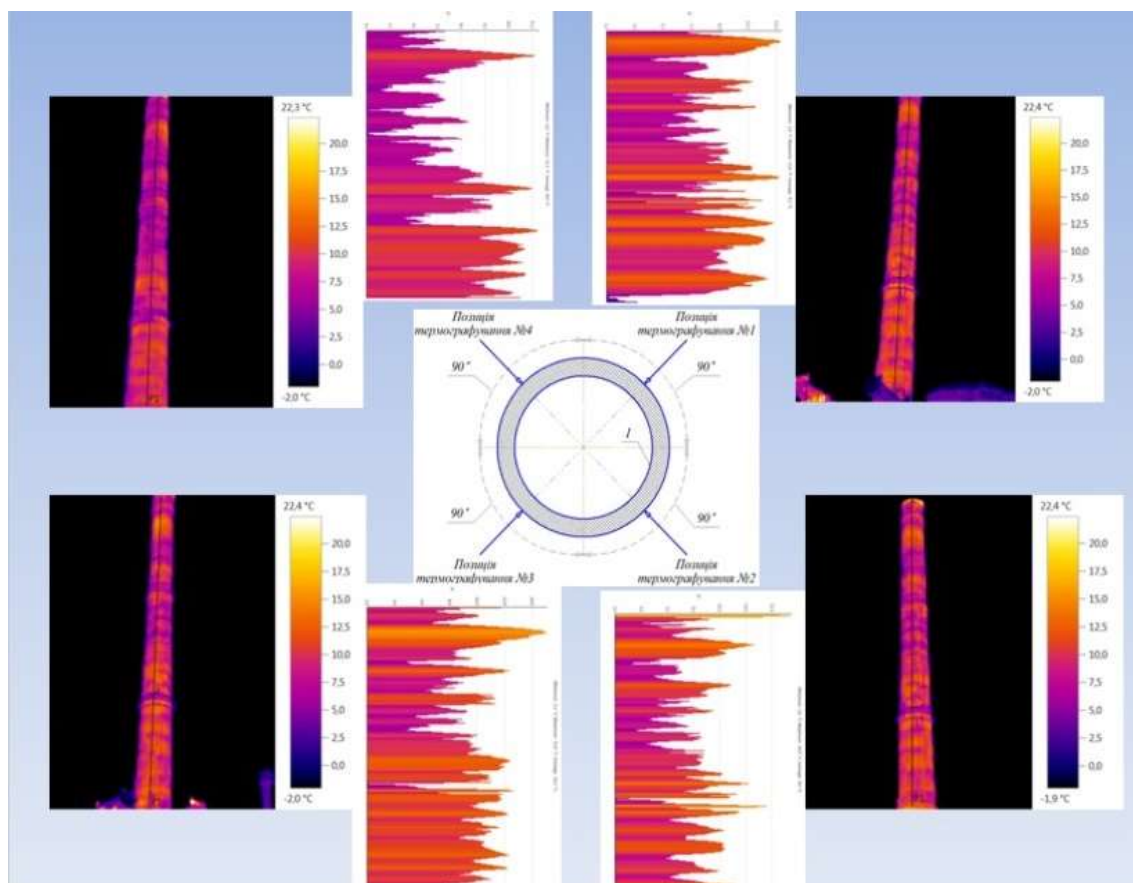


Рис. 4. Результаты пассивного тепловизионного контроля промышленной дымовой трубы ТЭС

Таким образом, возникает необходимость в создании эталонных термограмм с искусственно заложенными дефектами в тело исследуемого объекта, а именно, дымовой трубы указанного выше типа. В следствии того, что на реальных объектах закладывать искусственные дефекты не составляет возможности, одним из возможных решений является создание математических моделей реальных объектов с заложенными искусственными несплошностями.

Предложенное решение является весьма перспективным, так как позволяет рассмотреть максимальное количество различных дефектов в каждом из слоев, при этом также накладывать дефектные слои один на другой с последующей визуализацией не только температурных полей, но и самих дефектов в трехмерной проекции.

Реализация данного подхода позволит в будущем более точно классифицировать дефекты при диагностировании промышленных дымовых труб, а также определять геометрические параметры выявленных дефектов и определять дефектный слой.

Выводы

Для полноценного тепловизионного диагностирования поверхности трубы необходимо проводить термографирование с более чем трех равноудаленных позиций.

Одни и те же температурные аномалии отвечают разным типам дефектов, что ставит под сомнение правильность выводов о наличии тех или иных дефектов.

Создание эталонных термограмм подразумевает проведение натуральных испытаний на реальных, бездефектных объектах и эта возможность крайне мала.

Одним из полноценных и доступных способов получения наборов эталонных термограмм, является создание адекватных математических моделей процесса теплообмена через стенки дымовой трубы с последующей визуализацией полученных результатов.

Такое решение позволяет перейти от задачи тепловой дефектоскопии к задачам тепловой дефектометрии и томографии.

Благодарности

Работа выполнена по совместному научному проекту "Исследование влияния параметров штамповки на напряженно-деформируемое состояние элементов трубопроводов" в рамках двухстороннего сотрудничества между Болгарской академии наук и Национальной академии наук Украины.

Литература

1. Героев А.Е. Тепловизионный контроль дымовых труб. «Науковедение» №3 2013, с. 1-6
2. Бабушкин Р.А., Гмызов Д.С., Иванов Ю.П. Тепловизионная диагностика дымовых труб. «Инновационная наука» №9/2015 с. 52-57
3. Дужих Ф.П. Тепловизионное обследование температурных полей в дымовых трубах. «Теплоэнергетика» 1988 №5 с. 51-55
4. Энно И.К., Дужих Ф.П., Мелентьев Н.М. «Электрические станции» 1988 №6 с.31-34
5. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А.Г. Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.
6. РД-153-34.0-20.364-00 «Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования» 01.05.2000 г., Москва, 50с.