

ПРИМЕНЕНИЕ ИК-ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Стороженко Владимир Александрович

д.т.н., профессор, профессор кафедры физики Харьковского национального
университета радиоэлектроники

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7609-2955>

Мешков Сергей Николаевич

к.т.н., доцент, доцент кафедры физики Харьковского национального
университета радиоэлектроники

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>

Орел Роман Петрович

к.т.н., доцент, доцент кафедры физики Харьковского национального
университета радиоэлектроники

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>

Хорошайло Юрий Евгеньевич

к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедры проектирования и эксплуатации
электронных аппаратов Харьковского национального университета
радиоэлектроники

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4239-4357>

Известно, что большое число энергоемкого промышленного оборудования в Украине приближается или превысило сроки эксплуатации, и его технические параметры достигли критических значений. Последствия техногенных аварий могут приближаться к катастрофическим. В современной

индустрии, в первую очередь атомной энергетике, нефтегазовой и химической промышленности появилась потребность разрабатывать методы контроля и оценки критических условий эксплуатации оборудования и конструкций.

Наиболее востребованными оказываются технологии диагностирования, которые предполагают контроль без вторжения в исследуемый объект, в реальном режиме времени и с быстрым просмотром обширных областей с целью последующего применения выборочно или локально стандартных методов неразрушающего контроля. К таким технологиям относится ИК-термография или тепловой неразрушающий контроль. Тепловой метод, как правило, не предусматривает подготовительных работ или в отдельных случаях – самый их минимум. Обследуемое оборудование может работать без остановки в своем рабочем режиме.

Сегодня ИК термография (теповидение) является одним из наиболее эффективных и широко используемых средств диагностики состояния материалов, промышленных изделий и объектов. Уникальность метода состоит в его универсальности, высокой производительности и безопасного характера функционирования.

В настоящее время термография представляет собой высокотехнологичную сферу теоретических и прикладных исследований, которые объединяют достижения в области теплопередачи, ИК-технологии, материаловедения и компьютерной инженерии. Научно-педагогический коллектив ХНУРЭ, где помимо сертифицированных термографистов трудятся специалисты по всем направлениям, составляющим современный тепловой неразрушающий контроль, проводит исследования более 40 лет, за которые накоплен большой опыт.

Целью настоящей работы является показать примеры эффективного применения ИК термографии для диагностирования промышленного оборудования и оценивания тепловых потерь зданий и сооружений.

1. Применение ИК-термографии для диагностирования газоперекачивающего оборудования. Коллективом специалистов ХНУРЭ было проведено тепловизионное обследование газоперекачивающего оборудования компрессорной станции, входящей в состав газодобывающего комплекса Шебелинка (Харьковская обл.). Объектом обследования являлся ряд газомоторных компрессоров типа 10ГКН, которые широко используются в газовой отрасли Украины. Штатные средства технического состояния агрегата ГКН контролируют ряд усредненных характеристик, по которым трудно или невозможно выделить конкретный дефектный узел. Кроме того, существует также несколько дефектов (низкая плотность стыков элементов конструкции, нарушение циркуляции охлаждающей жидкости и др.), которые наиболее оперативно можно выявить только термографическим методом.

Особенностью этого объекта контроля является наличие ряда однотипных узлов, которые имеют близкие температурные режимы при эксплуатации. Поэтому выявить предположительно дефектный элемент можно путем сравнения термограмм этих узлов [1]. Характерная термограмма одного из таких выделенных узлов (компрессорный цилиндр) показана на рис.1.

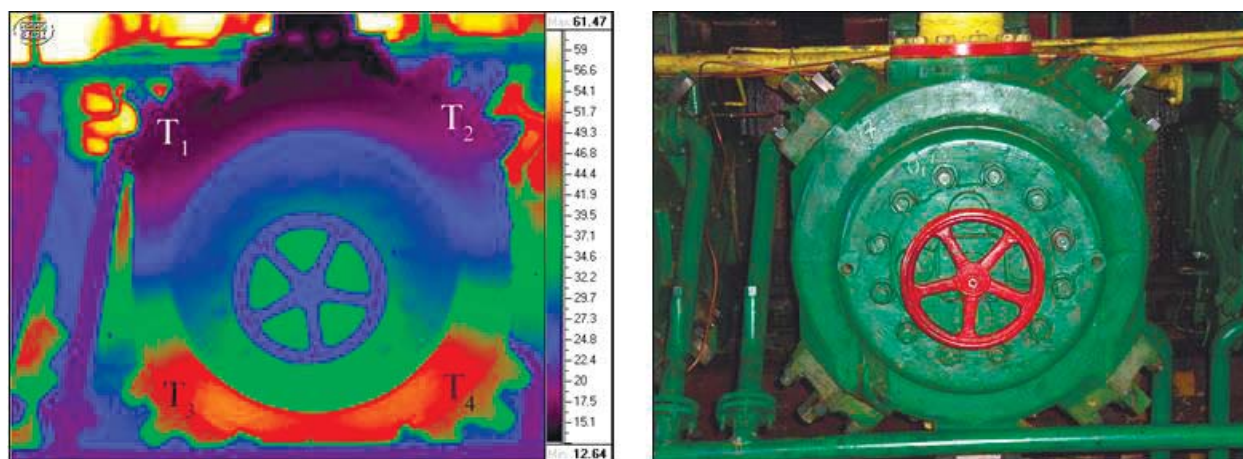


Рис.1. Компрессорный цилиндр (5 единиц на один агрегат)

Большое влияние на результаты термографического метода оказывают следующие факторы: неточность позиционирования тепловизора при съемке, неоднородность поверхности по излучательной способности, наличие засветки

от внешних источников и др. Поэтому был предложен статистический метод, так как гистограммы температурных полей более устойчивы к влиянию указанных помех. На рис.2 приведены гистограммы пяти нагнетательных клапанов компрессорных цилиндров одного агрегата ГКН.

Гистограммы одного агрегата отличаются друг от друга по следующим признакам: форма, размещение на оси температур и содержание фона (высота пика). Резкое отличие наблюдается для клапана №4.

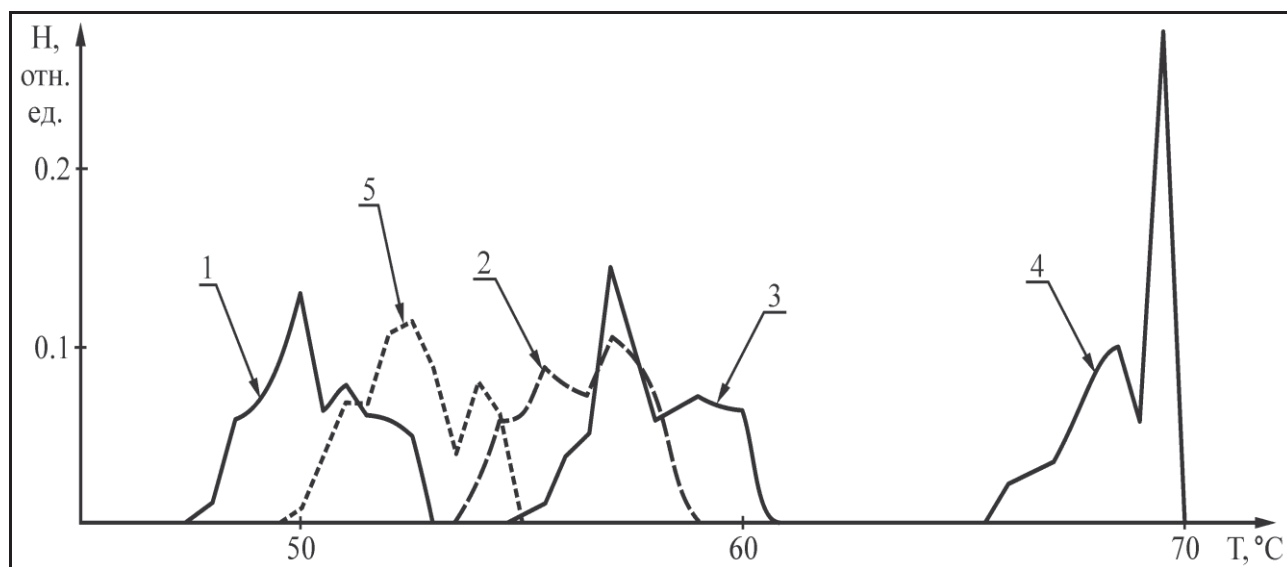


Рис. 2. Огибающие гистограмм группы (5 единиц) нагнетательных клапанов второго агрегата ГКН

Для количественного описания отличий между гистограммами были введены следующие информативные признаки:

- признак, учитывающий отличие по форме (**D1a**);
- признак, учитывающий отличие гистограмм по содержанию фона (**D2**);
- признак, учитывающий положение гистограммы на оси температур (**D3**).

Для формирования критериев дефектности по каждому из вышеизложенных информационных признаков (**D1a**, **D2** и **D3**), был проведен анализ их распределения, которые оказались близки к нормальному закону, и

это позволило использовать для критерия дефектности правило «двух сигм» [1]:

$$\begin{aligned}(D1a)_i &\geq \mu_{D1a} + 2\sigma_{D1}, \\(D2)_i &\geq \mu_{D2} + 2\sigma_{D2} \\(D3)_i &\geq \mu_{D3} + 2\sigma_{D3},\end{aligned}\tag{1}$$

где $(D1a)_i$, $(D2)_i$, $(D3)_i$ – значения признаков $D1a$, $D2$ и $D3$ соответственно для i -го контролируемого узла; μ_{D1a} , μ_{D2} , μ_{D3} – их математические ожидания по всей совокупности проконтролированных узлов; σ_{D1a} , σ_{D2} , σ_{D3} – среднеквадратические отклонения признаков $D1a$, $D2$ и $D3$ соответственно.

Применение этих критериев дефектности к термограммам выбранных узлов агрегатов 10ГКН показало существенные расхождения результатов разбраковки по каждому из них в отдельности. Поэтому в качестве критерия дефектности был использован интегральный критерий подобия I . Этот критерий объединял в себе оценку по всем трём рассмотренным признакам ($D1a$, $D2$ и $D3$), которые являются практически некоррелированными между собой (расчет парных коэффициентов корреляции дал результаты $k_{D1,D2} = 0,4$, $k_{D2,D3} = 0$, $k_{D1,D3} = 0,1$).

Предложенный интегральный критерий I имеет вид:

$$I = (D1a^*)^2 + (D2^*)^2 + (D3^*)^2,\tag{2}$$

где $D1a^*$, $D2^*$, $D3^*$ – стандартизованные значения признаков $D1a$, $D2$ и $D3$ [1].

Результаты разбраковки узлов по решающему правилу (2) позволили выявить нарушения в работе 21 узла из 104 рассматриваемых.

2. Диагностирование трубопроводов основного конденсата на АЭС.

Другим примером эффективного применения термографии для диагностирования технического состояния промышленных объектов является исследование, проведенное в агрегатных залах блоков Запорожской АЭС [2].

Термографическое обследование проводилось на участках трубопроводов второго контура при следующих условиях:

- без контакта с контролируемым объектом;
- без механической подготовки поверхности;
- при рабочих параметрах оборудования.

Гидротехническое оборудование подвержено кавитационной эрозии. Разрушение внутренней поверхности труб при кавитации происходит вследствие многократно повторяющихся гидравлических ударов струй жидкости о поверхность с образованием кавитационных каверн (рис. 3).



Рис. 3 – Фрагмент трубопровода с кавитационной каверной (дефектом)

На результаты тепловизионной съемки в закрытых помещениях, когда температура объекта соизмерима с температурой окружающего воздуха, большое влияние оказывают внешние факторы. В результате их действия на поверхности объектов формируются зоны с мнимой ("наведенной") температурой, которая не соответствует реальной радиационной температуре объекта. Кроме количественных температурных различий такие наведенные

аномалии имеют и отличительные качественные признаки. Были выявлены и изучены следующие виды факторов, влияющих на температурные поля объектов. Результаты проведенного анализа показаны в таблице 1.

Дефект с выявленной зоной кавитационной эрозии (рис.4) был обнаружен по следующим признакам:

1. Форма дефектной зоны не носила регулярный характер и отличалась от температурных искажений, вызываемых изученными внешними факторами;
2. Положение дефекта не менялось при смене ракурса съемки;
3. Максимальная температура дефекта отличалась от средней температуры остальной части трубы на 2,6 °С, что превышает уровни других температурных аномалий.

Таблица 2 – Анализ влияния внешних факторов при термографировании

| N | Фактор | Качественные отличия, особенности | Уровни температурных аномалий |
|---|---|---|-------------------------------|
| 1 | Освещение | Форма участков с мнимой температурой повторяет форму бликов от внешних источников света. Температурные аномалии имеют характерное положение и зависят от расположения источников света. | 1,6–1,9 °С |
| 2 | Влияние цилиндрической формы поверхности объекта. | Температурные аномалии имеют регулярный характер и положение по центру объекта. Нижняя часть трубы имеет, как правило, более низкую температуру. | 1,0–1,7 °С |
| 3 | Влияние мощных внешних тепловых излучателей | Вблизи мощных тепловых источников на объекте контроля в верхней части появляется узкая зона с повышенной температурой. Температурная аномалия имеет характерную форму и положение. Часто тепловой источник попадает в кадр. | 0,9–1,8 °С |
| 4 | Влияние теплообмена объекта с полом помещения | Нижняя часть трубы (до осевой) имеет более низкую температуру. Температурные аномалии имеют четко выраженный характер и положение. | 0,5–1,0 °С |
| 5 | Дефект | Форма дефектной зоны не носит регулярный характер, ее положение не меняется при смене ракурса съемки. | 2,7 °С |

В подтверждение факта выявления говорит то, что обнаруженный дефект находится на повороте трубопровода, где происходит резкое торможение потока конденсата, а такие места являются наиболее вероятными для возникновения кавитационных каверн. Полученный результат был подтвержден данными ультразвукового контроля.

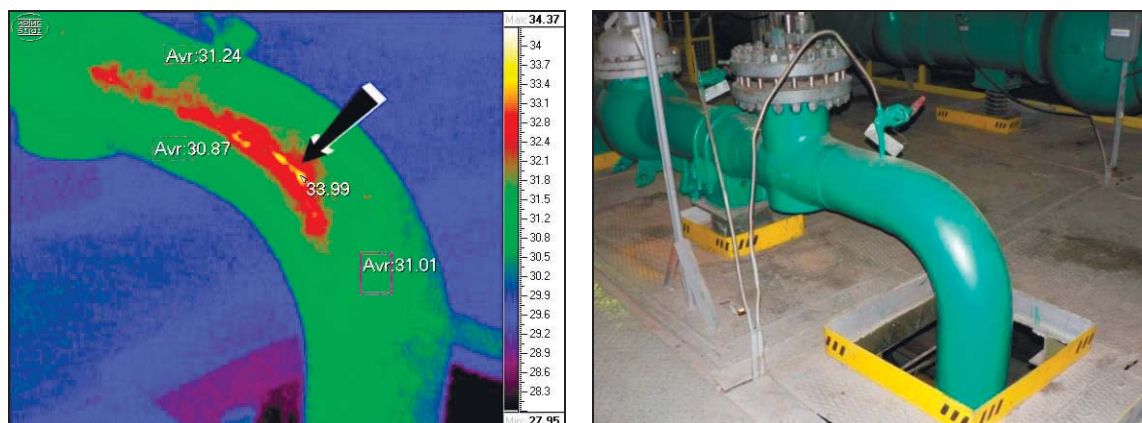


Рис. 4 – Выявленный дефект трубопровода (утонение стенки трубы)

В подтверждение факта выявления говорит то, что обнаруженный дефект находится на повороте трубопровода, где происходит резкое торможение потока конденсата, а такие места являются наиболее вероятными для возникновения кавитационных каверн. Полученный результат был подтвержден данными ультразвукового контроля.

3. Тепловизионная диагностика тепловой защиты зданий и сооружений. В настоящее время энерго- и ресурсосбережение в Украине является основополагающим направлением технической политики государства. Поэтому большая роль отводится экономии тепла на отопление жилых зданий, так как отрасль коммунально-бытового сектора составляет около трети общего потенциала экономии топливно-энергетических ресурсов страны. Реализация энергосберегающих мероприятий в жилых зданиях приводит не только к экономии энергетических ресурсов, но и несет социальный и экологический эффекты.

ИК термография, как один из методов оценки теплотехнического состояния зданий, позволяет оценить интенсивность инфильтрации воздуха, проанализировать работу системы вентиляции, а также выявить нарушения теплозащиты ограждающих конструкций.

Хотя в современной тепловизионной практике в основном превалирует качественная картина, но в последнее время особое внимание уделяется количественной интерпретации результатов ИК-термографических обследований.

Специалистами ХНУРЭ был проведен ряд тепловизионных обследований жилых и административных зданий [3]. Целью тепловизионной диагностики были:

- оценка качества теплоизоляции здания;
- оценка общих тепловых потерь здания и рекомендации по энергосбережению.

Все количественные характеристики были рассчитаны согласно рекомендациям зарубежных и российских стандартов и методик. Так, при обследовании студенческого общежития университета анализ термограмм выявил наличие в некоторых помещениях общежития запрещенных нагревательных приборов (рис. 5). Источниками потерь тепловой энергии также являлись ниши под окнами, где установлены радиаторы центрального отопления, а также некачественно установленные металлопластиковые окна (рис.5). Расчетные тепловые потери составили около 2,02 Гкал/год.

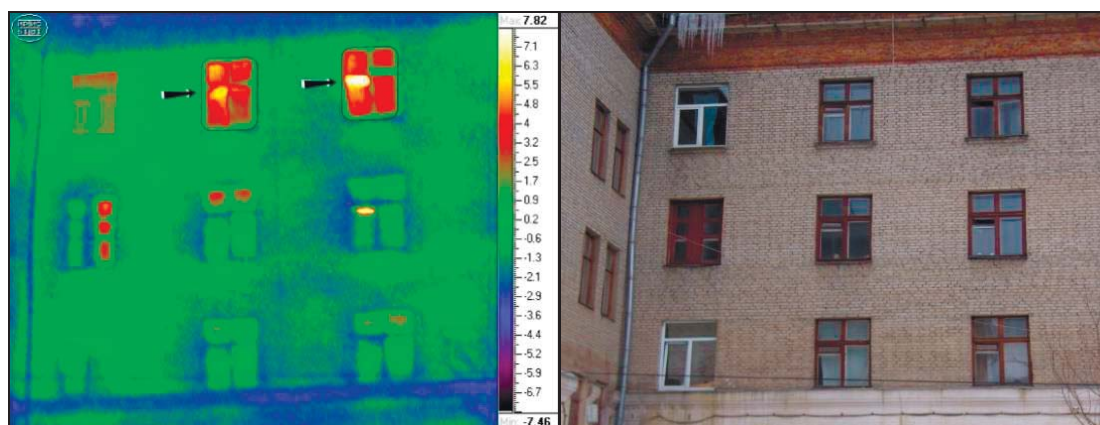


Рис. 5. Потери из мест установки радиаторов центрального отопления и помещения с дополнительными нагревательными приборами

Интересный расчет тепловых потерь был проведен для здания спального корпуса школы-интерната посёлка Кочеток Харьковской области (рис.6). Внутри корпуса находились душевые комнаты, стены которых была выложены с нарушением строительных норм и имели низкую влагоизоляцию. Расчетные потери тепла на момент съемки составили 184 Вт.

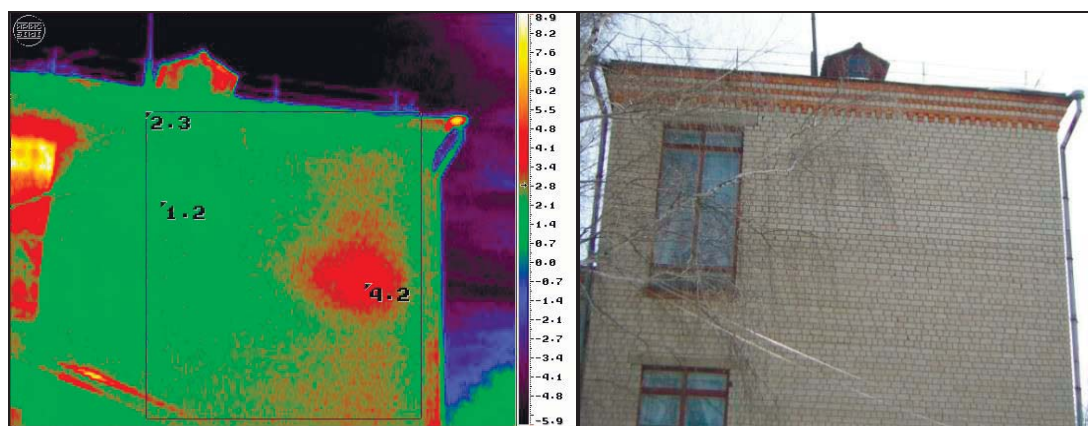


Рис.6. Тепловые потери здания спального корпуса школы–интерната

Заключение. ИК-термография является динамично развивающимся направлением исследований и не имеет альтернатив во многих сферах современного производства. В настоящее время перед ИК-термографией стоят задачи, связанные с необходимостью получения большего количества информации, что усложняется большим числом внешних факторов. Решение этой задачи существенно повысит промышленную безопасность в условиях истощения ресурса промышленного оборудования.

Список использованных источников

1. Malyk-Zamorii S.B., Meshkov S.N., Orel R.P. Statistical Approach in Thermal Testing of the Machines and Mechanisms Technical Condition. *Proceedings of XXVIII International Scientific Symposium "METROLOGY AND METROLOY ASSURANCE 2019"* Sozopol, Bulgaria, September 10-14, 2018. P. 250–256.
2. Мешков С. Н. Орел Р. П. Факторы, снижающие достоверность тепловизионной диагностики трубопроводов агрегатных залов АЭС. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ", Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка*. 2018. №8 (1284). С. 39–44.
3. Meshkov S.N., Orel R. P., Korotenko A. E. Estimation of Heat Losses of Buildings and Constructions by Thermal Impact Diagnostics. *Proceedings of XXIX International Scientific Symposium "METROLOGY AND METROLOY ASSURANCE 2019"* Sozopol, Bulgaria, September 6-10, 2019. P. 105–108.

