

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОГРАФИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ

С. Н. МЕШКОВ, Р. П. ОРЕЛ

Харьковский нац. ун-т радиоэлектроники. 61166, г. Харьков, пр-т Ленина, 14. E-mail: fizika@kture.kharkov.ua

Рассмотрены результаты термографического обследования паропроводов высокого давления и основного конденсата атомной станции. Указаны условия и методика проведения теплового контроля отдельных участков трубопроводов. Обнаружено, что кавитационные дефекты имеют «тепловой след». Предложено применение термографии как эффективного метода экспресс-контроля, который позволяет быстро определять по температурным аномалиям места для детального изучения другими методами. Библиогр. 8, рис. 5.

*Ключевые слова:* паропроводы высокого давления, термографическое обследование, термические нагрузки, кавитационные дефекты

В процессе эксплуатации конструкционные материалы, применяемые в энергетике, изменяют свои свойства, что является причиной появления дефектов, которые могут привести к техногенным авариям и катастрофам.

Высокие термические нагрузки, которые испытывает оборудование тепловых и атомных станций, ведет к снижению термического сопротивления металла, в результате чего повышается температура на поверхности оборудования и трубопроводов. Поэтому температура является важнейшим диагностическим показателем.

Применение контактных приборов не всегда возможно вследствие габаритов объекта контроля или трудностей доступа к нему. Трудоемкость обследований можно существенно снизить при применении термографии. При обследовании можно использовать те же тепловизоры, что и при строительной диагностике, однако диапазон измеряемых температур может быть расширен до 1500 °С.

При регулярном термографическом мониторинге путем сравнения результатов можно оценить состояние объекта, выявить дефектные участки и наметить пути их устранения.

В мировой атомной энергетике программы технического обслуживания АЭС предусматривают до 50 тыс. тестовых процедур, среди которых возрастает роль тепловизионного мониторинга. В США тепловизионный метод применяется на всех АЭС. Есть сведения о применении тепловизионного метода на ряде российских АЭС [1]. В отечественной энергетике тепловизионный метод пока применения не нашел.

Цель работы – определение возможности применения термографии для обнаружения скрытых дефектов металла трубопроводов с последующим детальным обследованием традиционными методами контроля.

**Методика и условия обследования.** С точки зрения проведения тепловизионной съемки трубы представляют сложный объект. Даже при равномерно нагретой трубе и ее однородном покрытии возникают эффекты, обусловленные сферичностью исследуемой поверхности [2]. Значительно усложняется и количественная оценка параметров скрытых дефектов [3, 4].

Термографическое обследование проводилось на участках трубопроводов:

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

Термографирование проводили в производственных помещениях при температуре 30 °С. Освещение производственных помещений соответствовало общим принципам, основным из которых является создание равномерного уровня освещенности на всей площади. Уровень освещенности учитывался как шумовая составляющая радиационной температуры и на исследуемых объектах составлял  $\Delta T_{\text{зас}} = 1,5...2,0$  °С.

Для лучшей привязки результатов обследования проводили фотографическую съемку обнаруженных дефектов в тех же ракурсах, что и тепловизионная съемка. Во время исследования также измеряли температуру окружающего воздуха вблизи объектов контроля.

Обследования регламентировали техническими требованиями на проведение работ «Контроль металла трубопроводов и оборудования энергоблоков методом тепловой термографии» от 02.10.2007 г.

Места тепловизионной съемки были выбраны согласно схеме, составленной по различным видам износа металла рабочего тракта ТУ К-220-44, которая являлась условной картой, полученной на основе опыта эксплуатации турбоустановок насыщенного пара.



Обследование металла выполняли в соответствии с ПНАЭ Г-7-008-89 «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок», а также на основании документации на тепловой метод контроля, результатов научных исследований и опыта работы НТЦ «Термоконтроль».

**Результаты исследований паропроводов высокого давления.** Большой практический интерес представляет обнаружение скрытых дефектов в паропроводах высокого давления. Термографирование открытых участков дает положительные результаты: по характеристикам стационарного температурного поля на поверхности можно оценить величину утонения металла в месте дефекта [5]. Однако согласно действующим на тепловых станциях нормам паропроводы высокого давления покрыты рубашкой из теплоизоляции (стекловата) и помещены в защитный металлический экран. Металлические экраны имеют неровную, волнистую поверхность. Температурные градиенты такой поверхности создают на термограммах набор локальных тепловых аномалий (рис. 1).

Если поверхность достаточно гладкая, то диагностирование возможно. Признаком развивающегося внутреннего дефекта является площадь тепловой аномалии, что показано на рис. 2.

При средней температуре поверхности экрана  $T_{\text{ср}} = 49,7^\circ\text{C}$  тепловая аномалия имеет температуру

$T_{\text{деф}} = 59,6^\circ\text{C}$ , занимает значительную площадь и может являться признаком развивающегося дефекта.

При термографировании выявлен эффект «тепловой засветки» или наложения тепловых полей. Температурные поля зависят от взаимного расположения объектов теловизионной съемки, что надо учитывать при выборе ракурса при съемке.

В ходе работ было обследовано шесть фрагментов паропроводов высокого давления. Для объектов данного вида, работающих в штатном режиме, теплоизоляция сильно ослабляет и искажает температурные поля труб. Поэтому тепловизионным методом обнаруживать скрытые дефекты можно только в заключительных стадиях их развития.

**Результаты исследований трубопровода основного конденсата.** Гидротехническое оборудование подвержено кавитационной эрозии. Кавитационная эрозия обусловлена явлением кавитации, возникающим в движущемся потоке жидкости при определенных гидравлических условиях. Эрозионное разрушение поверхности при кавитации происходит вследствие многократно повторяющихся гидравлических ударов струй жидкости о поверхность. На рис. 3 показан фрагмент трубопровода с дефектом, обусловленным кавитационным износом.

Экспериментальные факты подтверждают, что скорость кавитационного разрушения металла в 5000...10000 раз превосходит скорость коррозионного разрушения. Хотя общепринятой теории

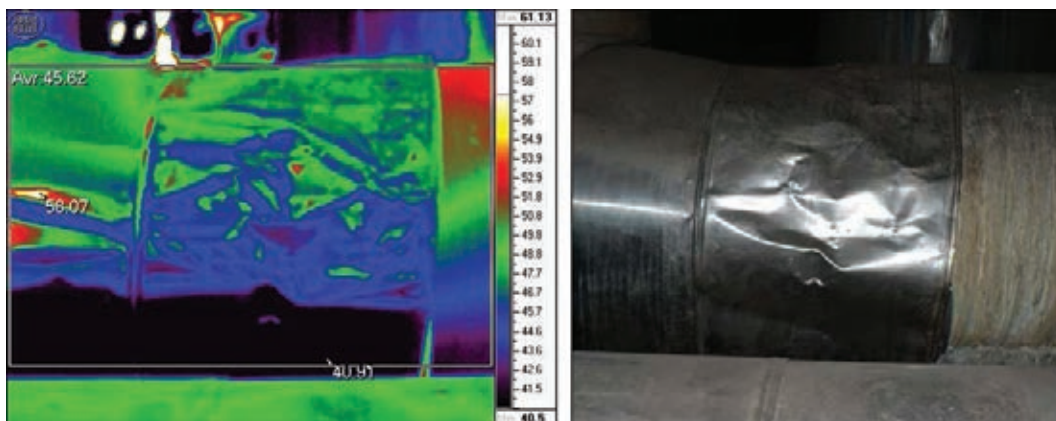


Рис. 1. Локальные тепловые аномалии, вызванные рельефом поверхности паропровода

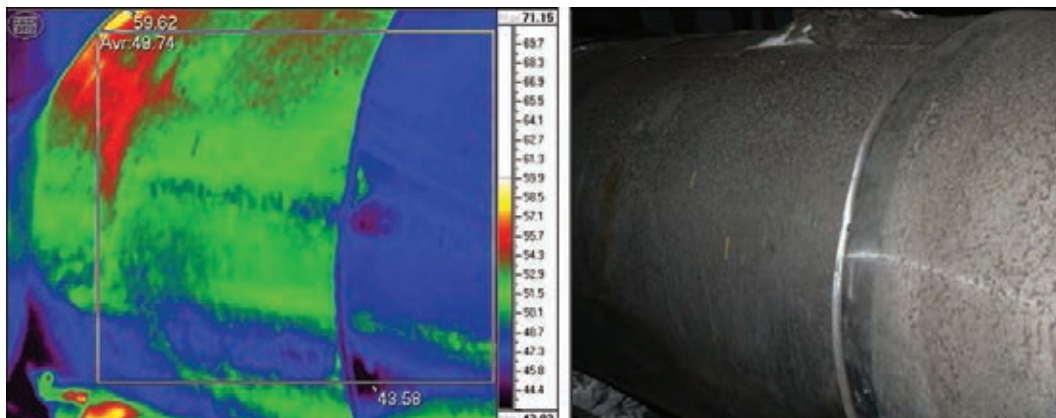


Рис. 2. Участок паропровода высокого давления с возможным развивающимся дефектом





кавитации не существует, но по некоторым оценкам пики давлений при сжатии (или разрушении) кавитационных каверн доходят до 250 МПа, а температур до  $10^4$  К [6–8].

Следовательно, места образования кавитационных каверн являются локализованными источ-



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

никами аномально высокой температуры. Если внешняя поверхность металла чистая и гладкая, то сформировавшиеся стационарные температурные поля могут быть зарегистрированы современными тепловизорами. Кавитация может иметь «тепловой след». Это предположение нашло подтверждение при обследовании трубопровода основного конденсата.

На рис. 4 показаны два фрагмента трубопровода конденсата с выявленными зонами кавитационной эрозии. Проведенные исследования показали, что при термографировании уровень засветки от посторонних источников составляет не более  $\Delta T_{\text{зас}} = 1,5$  °С. Средняя температура поверхности трубы составляла  $T_{\text{тр}} = 31$  °С. Обнаруженные температурные аномалии имели температуру  $T_{\text{деф}} = 34$  °С, что превышало уровень внешней засветки более чем в 2 раза, поэтому выявленные места с более высокой температурой предположительно являются ка-

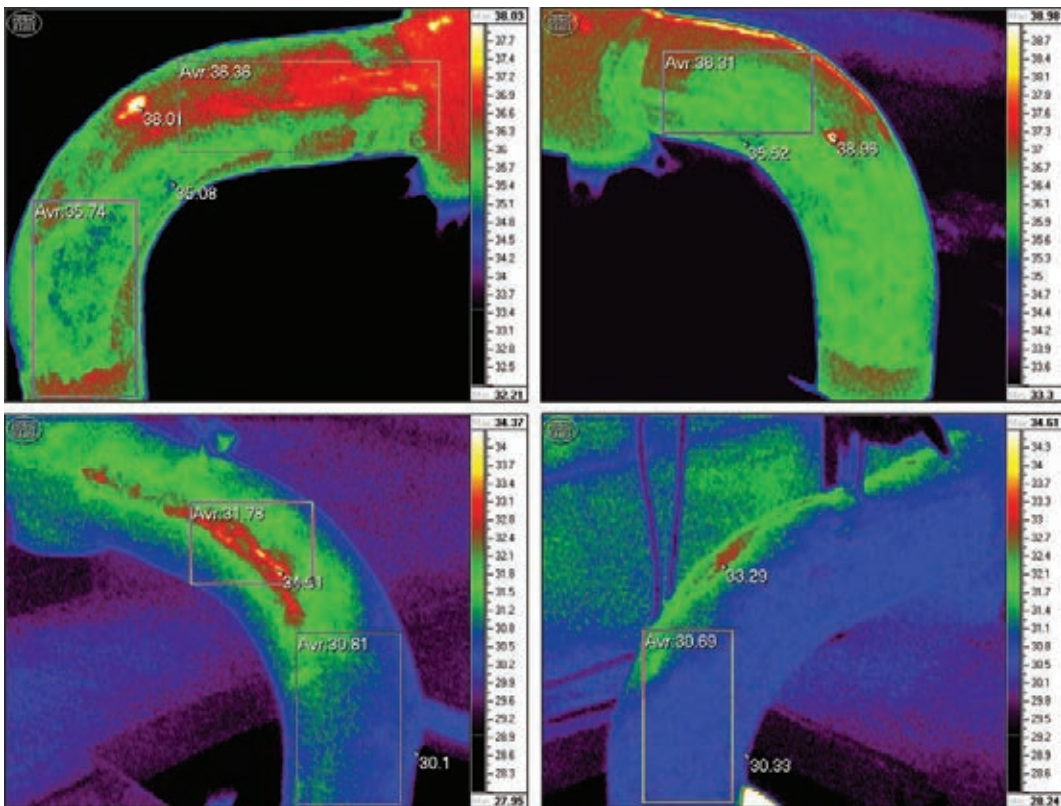


Рис. 4. Зоны кавитационной эрозии, выявленные при смене ракурсов на двух участках трубопровода

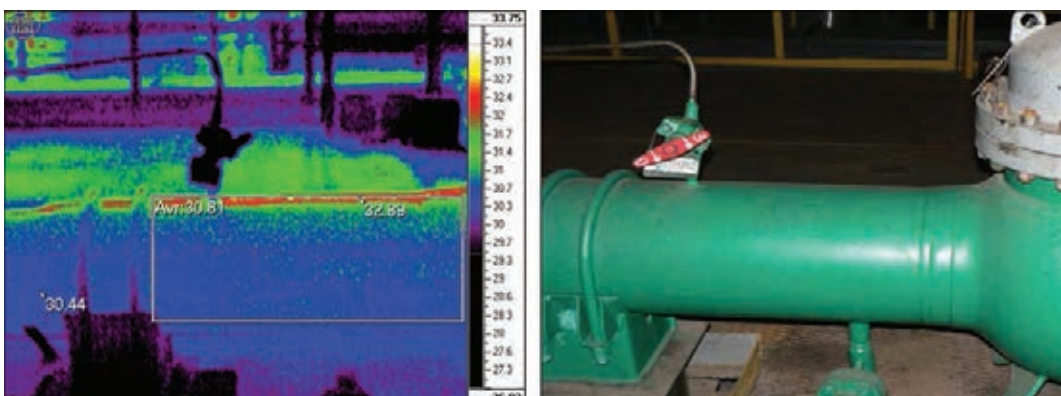


Рис. 5. Температурная аномалия, выявленная на участке трубопровода с запорным устройством



витационными дефектами. В подтверждение этого факта свидетельствует то, что обнаруженные места находятся на повороте трубопровода (где происходит резкое торможение потока конденсата); при смене ракурса тепловизионной съемки обнаруженные зоны не изменили своего положения.

Схожие результаты были получены при термографировании нескольких участков трубопроводов с аналогичной формой.

Согласно теории кавитационные области образуются в местах повышения давления в потоке жидкости при дросселировании (уменьшении сечения трубопровода), местах стыков и на участках с запорно-регулирующей аппаратурой. Кавитация вызывает разедание элементов проточной части запорных органов. Было исследовано несколько таких объектов.

Полученные результаты подтвердили критичность указанных мест к возникновению дефектов. На рис. 5 показана одна из выявленных температурных аномалий.

Средняя температура трубы составляет  $T_{тр} = 30,81$  °С. Уровень засветки от посторонних источников колеблется в пределах  $\Delta T_{зас} = 1,5$  °С. В месте предполагаемого дефекта температура составляла  $T_{деф} = 33,89$  °С.

На рис. 5 обнаруженные температурные аномалии отличаются от зарегистрированных ранее (см. рис. 4) на поворотных проточных участках. Очевидно это связано с особенностями движения потоков после механизма управления потоком в запорно-регулирующей аппаратуре.

Результаты, полученные при термографировании, совпали с результатами проведенной УЗ-дефектоскопии.

### Выводы

Проведенные исследования дали положительный результат и показали перспективность применения термографии для определения состояния металлов в трубопроводах.

Для прогнозирования сроков эксплуатации трубопроводов необходимы точные значения уменьшения толщины труб, которые можно получить с помощью контактного УЗ-метода. Термография дает возможность быстрого получения информации о наличии несоответствий состояния металла в период эксплуатации и в период планово-предупредительных ремонтов.

The thermographic examination results of nuclear power plant high pressure pipelines and main condensate pipelines are considered. The conditions and technique of several sections thermal control are specified. It is found, that cavitation defects have a "heat trace". The use of thermography as an effective express-control method for quickly determining the temperature anomalies space for a detailed study of other methods is proposed.

*Keywords: high pressure steam piping, thermographic examination, thermal load, cavitation defects*

Термографию можно определить как экспресс-контроль, позволяющий быстро устанавливать по температурным аномалиям области для детального изучения другими, более точными методами. Это позволит экономить время и повысить качество и оперативность контроля. Внедрение метода тепловой термографии позволит определять участки первоочередного неразрушающего контроля с целью оптимизации объема контроля (планирование объемов и сроков ремонта оборудования и трубопроводов по их фактическому состоянию).

Закономерности кавитации и меры борьбы с ней до настоящего времени мало изучены и потому задача эффективного обнаружения кавитационных каверн в гидрооборудовании является очень важной. Использование акустического метода диагностирования кавитационных дефектов в элементах проточной части гидросистем нецелесообразно, так как требует длительного времени, во много раз большего, чем обнаружение другими методами. Поэтому обнаружение «теплого следа» при кавитации является важным результатом. После проведения дополнительных исследований тепловой метод может стать еще одним методом прогнозирования кавитационных разрушений гидравлических систем.

1. *Вавилов В. П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Спектр, 2009. – 544 с.
2. *Xavier P. V. Maldague.* Theory and Practice Infrared Technology for Nondestructive Testing. – New York, JohnWiley&Sons INC, 2001. – 684 p.
3. *Стороженко В. А., Мешков С. Н., Гантракинов А. А.* Теплофизическое моделирование процессов выявления дефекта в объектах цилиндрической формы при тепловом неразрушающем контроле // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2004. – № 4. – С. 37–40.
4. *Применение термографического метода контроля для определения содержания жидкой фазы в газопроводах / В.А. Стороженко, А.В. Мягкий, С.А. Сапрыкин, С.Н. Мешков // Методы та прилади контролю якості. – 2009. – № 23. – С. 12–15.*
5. *Мешков С. Н., Малик С. Б., Мягкий А. В.* Оценка возможности применения тепловизионного метода для обнаружения дефектов в напорных трубопроводах // Сб. докл. 6-й Межд. НТК «Метрология и измерительная техника». – Харьков: ННЦ «Институт метрологии», 2008. – С. 154–157.
6. *Нефедов Ю. И., Стороженко В. А., Брагин С. С.* Кавитационный энергосберегающий теплогенератор-гидротаран // Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит. – 2011. – № 5. – С. 9–14.
7. *Пирсол И.* Кавитация – М: Мир, 1975. – 96 с.
8. *Богачев И. Н.* Кавитационное разрушение и кавитационные сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 192 с.

Поступила в редакцию  
16.04.2015