

УДК 681.2:620.1, 614.84

**Е.М. Прохоренко**

**В.Ф. Клепиков**

**В.В. Литвиненко**

**Н.И. Базалеев**

**О.Е. Брюховецкая**

Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, Харьков

**А.И. Морозов**

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

**А.А. Захарченко**

Национальный научный центр ХФТИ НАН Украины, Харьков

**И.Я. Сафонов**

Змиевская ТЭС, г.Комсомольский

**В.В. Колесникова**

Донецкий национальный технический университет, Донецк

### **ИК-РАДИОМЕТРИЯ, КАК ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ, ДЛЯ НУЖД ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩИХ ОБЪЕКТОВ**

Обосновано применение методик инфракрасной (ИК) радиометрии для экологического мониторинга оборудования энергогенерирующих объектов. Показаны результаты тепловизионного обследования электро и теплооборудования. Выявлены дефекты, повышающие риск аварии и прослежена динамика их развития. Предложена очередность проведения ремонтных работ. Доработаны отдельные приемы методики ИК-радиометрии.

**Ключевые слова:** ИК-радиометрия, тепловизионное обследование, теплоэнергетика, ТЭС, энергогенерирующие объекты.

#### **Введение**

Вопросы экологического мониторинга являются необычайно важными, так как затрагивают ухудшение среды обитания человека. Их многоплановость и разнонаправленность позволяют охватить разные стороны экологической безопасности. Сюда включаются такие вопросы как: определение наиболее вероятных мест экологических аварий; контроль за сооружениями, оборудованием; мониторинг состояния окружающей среды, ликвидация последствий экологических аварий. Одним из направлений деятельности, требующей постоянного внимания, есть вопрос безаварийной работы электрогенерирующего комплекса. Так как, авария на ТЭС, ГЭС или АЭС будет причиной резкого ухудшения экологической ситуации. И как следствие, значительные затраты материальных и людских ресурсов при ликвидации последствий[1]. Важность проблемы возрастает на фоне значительного износа (до 50%) всего оборудования и приборов. Учитывая, жесткие требования к надежности работы и безопасности эксплуатации объектов энергетики вопросы оценки состояния оборудования и сооружений находятся на постоянном контроле. Среди вопросов требующих постоянного внимания находятся: диагностика электро и тепло оборудования с целью предотвращения возникновения внештатных ситуаций, поломок, выхода со строя, возникновение пожароопасных точек. Это позволяет продлить срок службы, предупредить и снизить аварийность.

Для контроля применяют различные приемы и методы диагностики. Среди методов диагностики можно выделить: акустические, вибрационные, химические, магнитные. В последнее время широкое распространение приобретает метод инфракрасной (ИК) радиометрии[2].

### Цель работы

Целью настоящей работы является доработка и внедрение методов ИК-радиометрии для экологического мониторинга, диагностики безаварийной работы электрогенерирующих объектов.

### Обоснование метода исследования и техника эксперимента

Развитие методики ИК-радиометрии обусловлено тем, что появились и начали широко использоваться неохлаждаемые детекторы. Её эффективность связана с высокой информативностью регистрируемого ИК-излучения, находящегося в диапазоне 3-5мкм или 8-14мкм. Методика ИК-контроля является бесконтактной (проведение обследований без вмешательства в процесс, т.е. вся диагностическая работа, проводится без отключения и вывода из работы оборудования). Существенным преимуществом применения данного метода контроля есть дистанционность (расстояние до объекта изменяется от сантиметрового диапазона, до нескольких сотен метров). Также в настоящее время созданы унифицированные программы для обработки и анализа полученных результатов.

Тепловизионный метод основывается на фиксации инфракрасного излучения с обследуемой поверхности, с последующим анализом пространственных и временных характеристик температурного поля на поверхности объекта обследования[3]. Изменение теплового поля связано с изменением температуры в дефектной точке или области с нарушением. Дефектная зона соответствует величине аномального отклонения радиационной температуры и характеристикам её распределения на поверхности излучения в сравнении с фоном или неповрежденными участками. Тепловизионный мониторинг эффективно используется для диагностики работы различных машин и механизмов, систем охлаждения и вентиляции; дефектоскопии, как целых узлов, так и отдельных деталей; контроля состояния сооружений и коммуникаций. Его применение тормозится отсутствием: а) наработанной научно-методической базы данных для конкретных объектов; б) принятых методических рекомендаций по проведению экологического мониторинга; в) утвержденных стандартов применения ИК-термографии.

В качестве объекта контроля могут выступать любые объекты, в которых происходит или выделение тепла, или перераспределение проходящих тепловых потоков. Для проведения соответствия термоаномалии на поверхности обследуемого объекта с самым дефектом, необходимы данные о изменении температуры и первоначальном состоянии объекта. Точность обнаружения дефекта, глубины нахождения, его структуры, размеров, повышается при учете известных технических данных на изделие, условий его эксплуатации. Кроме того необходимо учитывать результаты, полученные другими методами диагностики (электромагнитными, ультразвуковыми, вибрационными и т.д.).

Изменение температурного поля на поверхности связано с изменением интенсивности излучения при помощи закона Стефана-Больцмана, который показывает полную энергетическую светимость объекта в виде:

$$W_{\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

В этой формуле  $\varepsilon$  – коэффициент излучения поверхности,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup> – постоянная Стефана-Больцмана,  $T$  – температура на поверхности объекта в градусах Кельвина,  $\alpha$  – угол наблюдения (угол между тепловизором и нормалью к плоскости исследуемого объекта). Из выражения (1) видно, что температура, полученная при помощи тепловизора, может отличаться от реальной температуры на

некоторый коэффициент. В значение коэффициента вносят вклад: а) коэффициент излучения поверхности, б) угол наблюдения, в) форма поверхности наблюдаемого объекта и т.д. Коэффициент излучения зависит от состояния поверхности. Шероховатость или зеркальность, наличие ржавчины, окалины, масляных пятен существенно изменяют величину  $\varepsilon$  и соответственно, повышают или понижают значение температуры на термограммах. На зеркальных участках, измеренная температура – более низкая. На шероховатых, ржавых, с масляными пятнами наблюдаемая температура – выше, чем реальная. При увеличении угла наблюдения, измеряемая температура изменяется в сторону понижения. Поверхности, отличающиеся кривизной, но с одинаковой температурой, на термограмме имеют различное температурное поле. Зависимость полученной температуры от угла наблюдения и от кривизны объекта связано с характеристиками распределения ИК-излучения в пространство.

При проведении ИК-радиометрических обследований используются активный и пассивный способы получения термограмм. Пассивный метод – фиксация собственного теплового поля тела, т.е. объект, находится в тепловом равновесии со средой. Активный – применяется тепловое воздействие, которое перераспределяет тепловые потоки и температурные поля внутри обследуемого объекта и на его поверхности.

Проведение тепловизионного контроля проводится с целью решения нескольких взаимосвязанных задач:

а) тепловая дефектоскопия (выявление дефектов, определение места его расположения, т.е. проведение качественной оценки);

б) тепловая дефектометрия (количественная оценка глубины залегания дефекта и его размеров);

в) анализ дефекта (определение степени развития, контроль за ростом, вероятностная оценка создания аварийной ситуации);

г) выдача заключения по очередности проведения ремонтных работ.

Обнаружение зон с аномальным отклонением температуры (точек, где температура повышена) проводится как в ручном режиме, так и аппаратно. При ручном способе – визуально производится просмотр термограмм с выделением температурных нарушений. При машинно-аппаратном способе – компьютерная обработка результатов путем сравнения с опорными снимками или анализ поля градиентов температур. Как в первом, так и во втором случаях, при обнаружении зон с повышенной температурой, необходимо проведение дополнительного анализа, с целью выявления причин нагрева. Для повышения эффективности контроля целесообразно применять эти два метода параллельно. При обнаружении термоаномалий следует выяснить причины нагрева и определить их связь с Т.е. выяснить, не является ли тепловое пятно наводкой. Наводки могут быть вызваны неоднородностью коэффициента излучения, нагревом от внешних источников тепла, отражением тепловых потоков. Поэтому, следует провести дополнительные обследования другими методами, для оценки каждого дефекта. При подтверждении, что обнаруженная термоаномалия вызвана дефектом, необходимо произвести оценку с точки зрения аварийноопасности.

Для количественной оценки нарушений используется несколько показателей[4]:

1) абсолютное превышение температуры  $\Delta t_{np} = t_d - t_e$ ;

2) избыточная температура  $\Delta t_{изб} = t_d - t_u$  (по сравнению с аналогичными исправными узлами);

3) коэффициент дефектности  $K_d = \frac{\Delta t_d}{\Delta t_k}$ ,

где  $\Delta t_d = t_d - t_e$ ,  $\Delta t_k = t_k - t_e$ ,  $t_d$  – температура в точке дефекта,  $t_e$  – температура воздуха.  $t_u$  – температура точки на исправном блоке, которая сходна с дефектной.  $t_k$  – контрольная температура на оборудовании в точке где нет влияния дефекта.

Для избыточной температуры ( $\Delta t_{изб}$ ) и коэффициента дефектности ( $K_d$ ) различают, по степени неисправности, такие области:

- а)  $5^\circ\text{C} < \Delta t_{изб} < 10^\circ\text{C}$ ;  $1 < K_d < 1,2$  – дефект в начальной стадии неисправности;
- б)  $10^\circ\text{C} < \Delta t_{изб} < 30^\circ\text{C}$ ;  $1,2 < K_d < 1,5$  – развившийся дефект;
- в)  $30^\circ\text{C} < \Delta t_{изб}$ ;  $1,2 < K_d$  – аварийный дефект.

В зависимости от степени развития дефектов рекомендуются различные мероприятия по их устранению.

В качестве диагностического прибора использовался тепловизор Ti-814 фирмы LAND Instruments International Ltd, на основе неохлаждаемой болометрической матрицы (320×240) элементов с основными параметрами: спектральный диапазон 7.5 – 14 мкм; температурная чувствительность при 30°C составляла 0.08°C; пространственное разрешение 1,3 мрад; поле зрения составляет 23° × 17°; диапазон измеряемых температур от -20°C до +1500°C (опционно). Посредством данного прибора определение температурного поля проводится дистанционно и с высокой точностью. Он хорошо зарекомендовал себя при проведении проверок на стендовом оборудовании. Комплектация и компоновка тепловизора Ti-814 позволяет решать вопросы контроля протяженных и громоздких объектов в полевых условиях.

### Проведение обследования. Обсуждение результатов.

Тепловизионное обследование проводилось на Змиевской ТЭС. Проверялась теплоизолирующая обшивка котлов, паропроводы, электрооборудование, генераторы.

Отработка методик обследования электрооборудования проводилась на генераторах ТГВ-200. Генератор ТГВ-200 предназначен для выработки электроэнергии в непрерывном режиме при непосредственном соединении с паровой турбиной. Охлаждение обмоток водородно-водяное. Корпус статора конструктивно выполнен в виде сварного цилиндра, заполненного водородом под давлением. Уплотнения на валах выполнены из баббита. При износе, повреждении уплотнений, ухудшается работа генератора. Это связано не только с повышением трения, но и

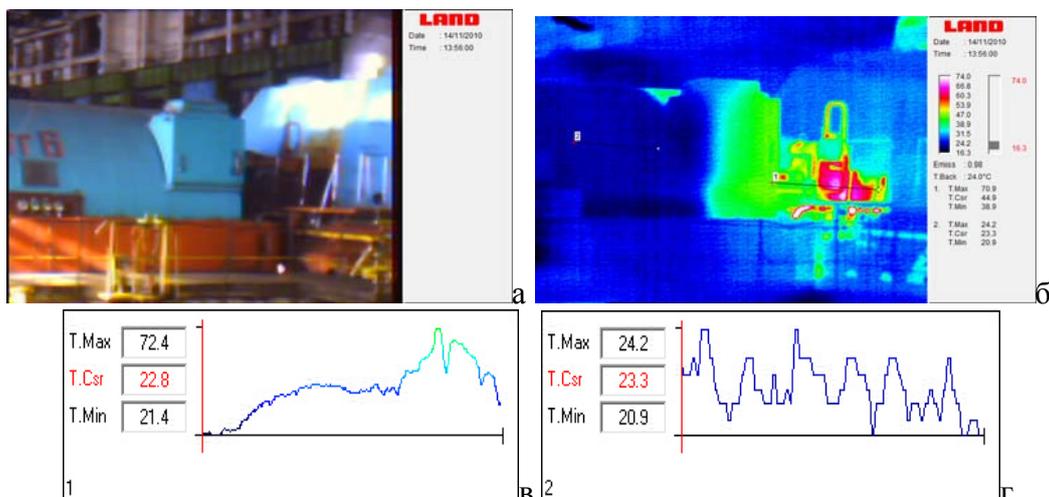


Рис.1. Генератор ТГВ-200: а) изображение в видимом диапазоне, б) термограмма, в) термопрофиль вдоль периферийных систем, г) термопрофиль по корпусу генератора

возможностью вытекания водорода, что повлечет за собой ухудшение охлаждения. Ухудшаются расчетные параметры и при прочих повреждениях и нарушениях режима эксплуатации.

Результаты обследования правой части работающего, в нормальном режиме, генератора ТГВ-200 представлены на рис.1.

На Рис.1а представлено изображение правой части генератора в оптическом диапазоне. Обнаружить повреждение или дефект затруднительно. Термограмма этого же участка, в ИК-диапазоне, дана на Рис.1б. Наблюдаем температурные аномалии в зоне периферийных систем. Изменение температур вдоль сечения 1, которое проходит по зонам с аномальным нагревом, представлены на Рис.1в. График температур вдоль сечения 2, проходящего по корпусу генератора дан на Рис.1г. Из Рис.1г видим, что колебания температур на корпусе составляют величину меньше  $4^{\circ}\text{C}$ . Проведя оценку состояния корпуса, на основании предложенных выше критериев для значений  $\Delta t_{np}$ , можем сделать вывод о удовлетворительном состоянии и исправности корпуса генератора. Для анализа состояния периферийных устройств, в зоне которых обнаружено повышение температур изучим график температур представленный на Рис.1в. Максимальное отклонение температур от фона составляет  $\Delta t_{np}=50^{\circ}\text{C}$ . Дать заключение о характере и виде нарушения на основании только одного параметра абсолютного превышения температур  $\Delta t_{np}$ , не представляется возможным. Необходимо использование еще нескольких характеристик, в частности будем использовать величину  $\Delta t_{изб}$  (избыточная температура), при определении которой происходит сравнение температур в аналогичных узлах. С этой целью были проверены еще два генератора. Данные по одному из них приведены на Рис.2. Для второго, все характеристики сходны, и по величине совпадают, поэтому материалы его диагностики не приводим.

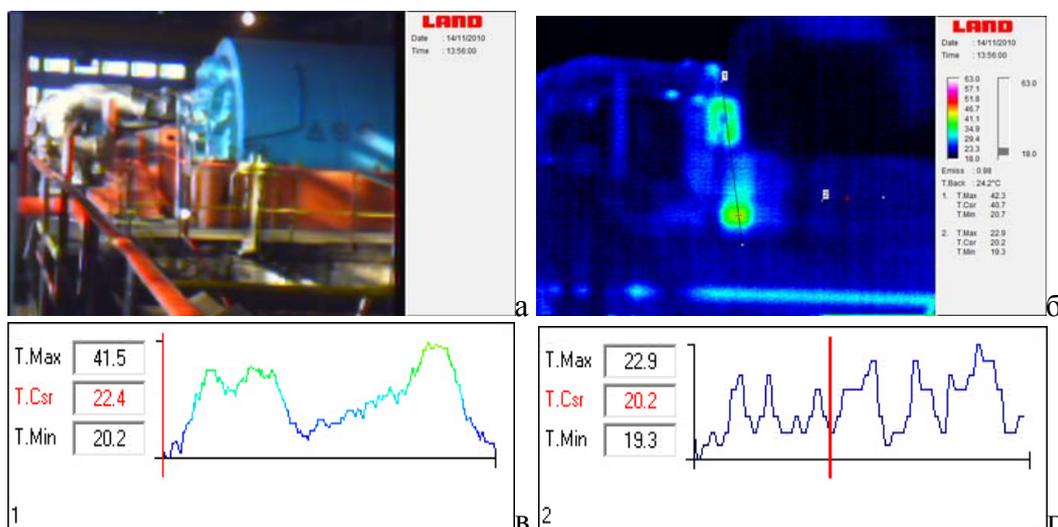


Рис.2 Генератор ТГВ-200: а) изображение в видимом диапазоне, б) термограмма в ИК диапазоне, в) график температур вдоль периферийной системы, г) график температур по корпусу генератора

Из рис.2г, на котором дан график изменения температур вдоль сечения, проходящего по корпусу, видим, что максимальное отклонение температур от фона составляет  $4^{\circ}\text{C}$ . Результаты аналогичны полученным на рис.1г. Следовательно, корпус генератора исправен. Рассмотрев Рис.1б и Рис.2б можем сделать заключение,

что существует теплообразующая зона в области периферийных устройств. Об этом свидетельствуют тепловые пятна на термограммах. Из графика температур рис.2в получаем, величину превышения температур  $\Delta t_{np} = 22^\circ\text{C}$ . Эта величина необходима для вычисления  $\Delta t_{изб}$  в первом случае. Разница температур, аналогичных мест для первого генератора и второго, составляет  $\Delta t_{изб} = 28^\circ\text{C}$ . На основании, выше предложенных, критериев оценки дефектности, это свидетельствует о наличии развитого дефекта. Дефекты данного уровня развития необходимо проводить при ближайших ремонтно-регламентных работах. Было выдано заключение о проведении наладочных работ во время ближайшей остановки генератора.

На следующем этапе, проводился тепловой контроль систем пароснабжения генератора ТГВ-200. Конструкционно они выполнены в виде труб, находящихся в защитном экране, с прослойкой теплоизолирующего материала. Проведение работ по контролю дефектности систем пароснабжения снижает потери тепловой энергии и повышает КПД работы электрогенерирующих предприятий. Серьезным дефектам является образование микросвищей, которые можно обнаружить по облаку перегретого пара. Повреждений данного класса обнаружено не было. Важным, при эксплуатации паропроводов, есть отсутствие или наличие внутри различных осадков. Обнаружить данное нарушение, средствами ИК-радиометрии, при наличии тепловой изоляции затруднительно. Также, проводилась проверка дефектности внешнего изоляционного слоя и целостности защитного экрана. Обнаружение самых больших из этих дефектов возможно и при помощи визуального осмотра. Однако применение методов ИК-радиометрии позволяет обнаружить нарушения паропроводов при малых размерах дефектов, в труднодоступных местах, с минимальными потерями времени и ресурсов. Тепловизионные методы позволяют не только провести поиск нарушений, но и дать количественную оценку развития дефекта. После проведения тепловизионного обследования паропровода результаты представлены на рис.3.

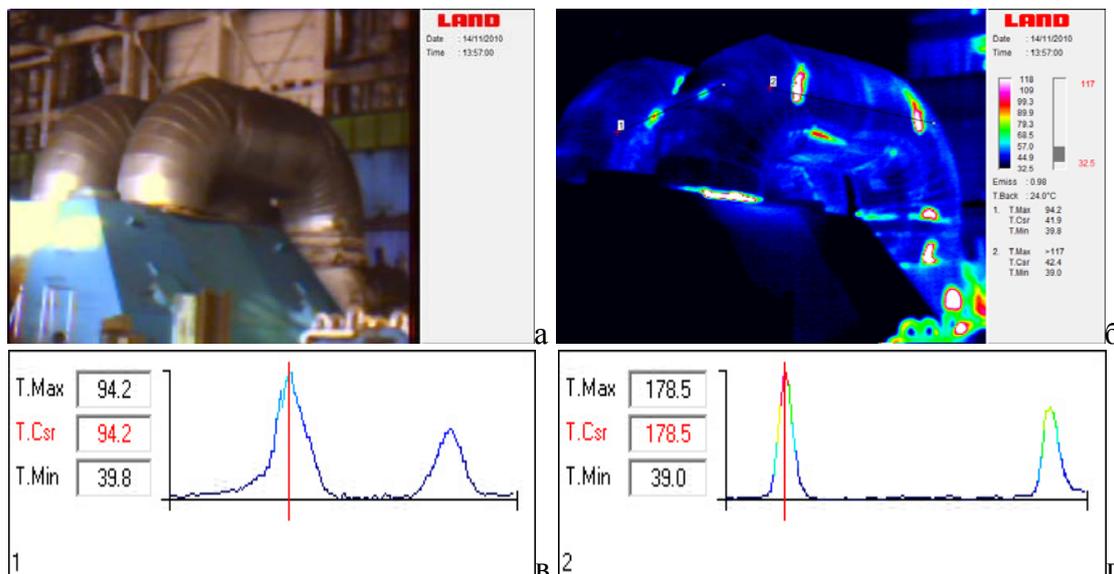


Рис.3. Паропровод: а) видимое изображение, б) термограмма, в) график изменения температур вдоль сечения 1, г) график изменения температур вдоль сечения 2

На теле паропровода наблюдаем несколько зон с повышенной температурой. Они имеют разную интенсивность свечения, что свидетельствует о различных

температурах. Проанализируем распределение температур в аномальных областях и выясним причины появления этих аномалий. С этой целью проведем сечения по точкам неоднородности. Сечение 1 проходит через точки с повышенной температурой, которые на видимом изображении ничем себя не проявляют. Их обнаружить не представляется возможным. График температур вдоль сечения 1 представлен на Рис.3в. Абсолютное превышение температур достигает величины  $50^{\circ}\text{C}$ . Проверка показала, отсутствие облака пара над зонами аномальной температуры, следовательно, сквозных трещин в теле трубы паропровода нет. На рис.3г представлен график изменения температур вдоль дефектов с высокой интенсивностью свечения. Превышение температур достигает величины  $140^{\circ}\text{C}$ . Из Рис.3а, фотографии в видимом диапазоне, видим, что в этих точках наблюдается повреждение защитного экрана (обдир, вмятина). Сравнив графики температур, представленные на Рис.3в и Рис.3г, можем сказать, что повреждения во втором случае более существенны. Об этом свидетельствует как ширина температурных пиков, так и отличие в абсолютном превышении температур. Дальнейшая проверка системы, при отключенной подаче пара, позволила выявить причины появления аномальных температурных зон. В случае 2 это и повреждение поверхностного экрана, и нарушение изолирующего слоя. Были повреждения термоизоляции глубиной до трубы паропровода. В случае сечения 1 (график рис.3в), внешний защитный слой без нарушений, внутренний термоизолирующий слой имел малую толщину, что значительно ухудшило его тепловые характеристики.

Таким образом, проведение тепловизионного контроля позволило обнаружить точки с нарушенной термоизоляцией и повреждениями защитного экрана. В этих областях тепловые потери существенно выросли. На основании результатов проверки были проведены ремонтные работы. Выполнение их существенно снизило тепловые потери.

### **Выводы**

1. Проведено тепловизионное обследование различного электро и теплооборудования Змиевской ТЭС.
2. Выявлены нарушения функционирования отдельных блоков и узлов периферийных устройств генератора ТГВ 200.
3. Обнаружены дефекты термоизоляции паропровода, которые не могут быть найдены никакими другими методами.
4. Предложены параметры определения степени дефектности обнаруженных нарушений.
5. Даны рекомендации по времени проведения ремонтных работ.
6. Дорабатывалась методика проведения тепловизионного контроля.

### **Список литературы**

1. Стан щодо пожеж та наслідки від них в Україні за 2009 рік. // Пожежна безпека. – 2010. – № 2. – С. 32 – 34.
2. Прохоренко Е.М. Применение методики тепловизионного контроля при противопожарном обследовании оборудования тепловых электростанций. / Е. М. Прохоренко, В. Ф. Клепиков, А. М. Баранов, А. И. Морозов. // Проблемы пожарной безопасности. – 2011. – №29. – С. 75 – 83.
3. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение. – 1991. – 240 с.
4. Плотников Ю.И. Точность и достоверность контроля при тепловизионном диагностировании оборудования электрифицированных линий. / Ю.И. Плотников. // Железные дороги мира. – 2006. – №3. – С. 50 – 53.

Надійшла до редакції 02.10.2012

Е.М. Прохоренко, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, Б.Б. Бандурян, М.І. Базалєєв, О.Є. Брюховецька, А.І. Морозов, А.А. Захарченко, І.Я. Сафонов, В.В. Колесникова

Інститут електрофізики та радіаційних технологій НАН України, Харків  
Національний університет громадянського захисту України, Харків  
Національний науковий центр ХФТІ НАН України, Харків  
Змієвська ТЕС, м. Комсомольський  
Донецький національний технічний університет, Донецьк

#### ІЧ-РАДІОМЕТРІЯ, ЯК ІНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЮ УСТАТКУВАННЯ, ДЛЯ ПОТРЕБ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Обґрунтовано вживання методик інфрачервоної (ІЧ) радіометрії для екологічного моніторингу устаткування енергогенеруючих об'єктів. Показані результати тепловізійного обстеження електро і тепло устаткування. Виявлені дефекти, що підвищують ризик аварії і просліджена динаміка їх розвитку. Запропоновано черговість проведення ремонтних робіт. Доопрацьовані окремі прийоми методики ІЧ-радіометрії.

Ключові слова: ІЧ-радіометрія, тепловізійне обстеження, теплоенергетика, ТЕС, енергогенеруючі об'єкти

E.M. Prokhorenko, V.F. Klepikov, V.V. Litvinenko, B.B. Banduryan, N.I. Bazaleev, O.E. Bryukhovetska, A.I. Morozov, A.A. Zakharchenko, I.Ya. Safonov, V.V. Kolesnikova

#### IR-RADIMETRYS, AS INSTRUMENT OF CONTROL OF EQUIPMENT, FOR NEEDS OF ECOLOGICAL MONITORING

Application of methods of infra-red (IR) radiometry is grounded for the ecological monitoring of equipment of energygenerating objects. The results of thermal imaging inspection are rotined electro- and warmly equipment. Defects, step-up the risk of failure and the dynamics of their development is traced, are exposed. The order of leadthrough of workovers is offered. The separate receptions of method of IR-radiometry are finished off.

Keywords: IR-radiometry, thermal imaging survey, energygenerating objects