

Engineering. – 2009. – Vol. 68, No. 1. – P. 49 – 63. **5.** Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений [Текст] / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М.: Госуд. изд-во физ. – мат. лит-ры, 1962. – 1100 с. **6.** Янке, Е. Специальные функции [Текст] / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Леш; пер. с нем. под ред. Л.И. Седова. – М.: Наука, 1977. – 342 с. **7.** Бронштейн, И. Н. Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с. **8.** Тарасов, Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения [Текст] / Л. В. Тарасов. – М.: Радио и связь, 1981. – 440 с. **9.** Лебедев, И. В. Техника и приборы СВЧ: В 2-х т. [Текст] / И. В. Лебедев. – М.: Высшая школа, 1970. – Т. 1. – 440 с. **10.** Глоге, Д. Расчет оптических резонаторов и линзовых систем [Текст] / Д. Глоге; пер. с нем. и англ. под ред. Б. З. Каценеленбаума и В. В. Шевченко // Квазиоптика. – М.: Мир, 1966. – С. 280 – 314.

Bibliography (transliterated): **1.** *Shestopalov B. N.* (1985). Physical basics of millimeter and sub millimeter technologies. K.: Scientific thought. - Sources. Element base. Radio systems, 256. **2.** *Shestopalov B. N.* (1976). Diffraction electronics. Kharkov: Vyscha shkola, 232. **3.** *Volman, V. I., Pimenov, J. V.* (1971). Technical electrodynamics. M: Communications, 488. **4.** *Kuzmichev, I. K.* (2009). Excitation efficiency of quasioptical resonance systems. Telecommunications and Radio Engineering, 68, 1, 49-63. **5.** *Gradstain I. S., Ryzhik, I. M.* (1962). Tables of integrals, sums, series, and is produced deposits. Mat. literature, 1100. **6.** *Janke, E., Emde, F., Lesh; F.* (1977). Special functions. M: Nauka, 342. **7.** *Bronshhtein, I. N. Semendyaev, K. A.* (1986). Handbook of mathematics. M: Nauka, 544. **8.** *Tarasov, L. V.* (1981). Physics of processes in the generation of coherent op-optical radiation. M: Radio and communication, 440. **9.** *Lebedev, I. V.* (1970). Technology and microwave devices. High school, 1, 440. **10.** *Hlohe, D., Katsenelenbauma, B. Z., Shevchenko, V. V.* (1966). Calculation of optical resonator and lens systems. M.: Mir, 280 – 314.

Поступила (received) 12.05.2014

УДК 681.2: 620.1

Е. М. ПРОХОРЕНКО, канд. физ.-мат. наук, с. н. с. ИЭРТ НАН Украины, Харьков;

В. Ф. КЛЕПИКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф., директор ИЭРТ НАН Украины Харьков;

В. В. ЛИТВИНЕНКО, д-р техн. наук, с. н. с. ИЭРТ НАН Украины, Харьков;

С. Е. ДОНЕЦ, канд. техн. наук, с. н. с. ИЭРТ НАН Украины, Харьков;

Г. В. МОРОЗОВА, канд. техн. наук, доц., УкрГАЖТ, Харьков;

А. О. КОРЧИНСКИЙ, нач. ПТО, Змиевская ТЭС, Комсомольский;

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОПРОЯВЛЕНИЙ ДЕФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Методами тепловизионной термографии осуществлен контроль нарушения структуры материалов и дефектов электрооборудования. Степень проявления термоаномалий от нарушений, обусловлена структурными неоднородностями и внешними искажающими факторами. Изучались зависимости изменения теплового образа от силы воздушного потока и его направления. Показано, что использование параметров приведенного превышения температур, коэффициента дефектности, градиента температурного поля позволяет идентифицировать термоаномалии при воздушных потоках существенно выше нормативных. Методики апробированы на объектах Змиевской ТЭС.

Ключевые слова: термопроявления нарушения структуры материалов и дефектов, метод ИК-радиометрии, коэффициент дефектности.

© Е. М. ПРОХОРЕНКО, В. Ф. КЛЕПИКОВ, В. В. ЛИТВИНЕНКО, С. Е. ДОНЕЦ, Г. В. МОРОЗОВА, А. О. КОРЧИНСКИЙ, 2014

Введение. В условиях современного техногенного мира вопросам безопасной работы и эксплуатации электрооборудования уделяется огромное внимание. Особенно это важно для объектов атомных и тепловых станций. Важность данного вопроса не подлежит сомнению, так как любое нарушение, сбой или отказ в работе могут повлечь за собой создание аварийной ситуации. Следовательно, вопросы обнаружения в конструкционных материалах процессов старения и дефектов различной природы должны ставиться во главу угла. Дефекты, повреждения, нарушения в работе оборудования и приборов энергетики могут возникать по нескольким причинам: а) длительные сроки эксплуатации, б) тяжелые и несоответствующие паспортным условиям эксплуатации, в) несовершенство или несоблюдение технологии изготовления.

В настоящее время для контроля электрооборудования применяются различные методы. По своим параметрам и характеристикам они отличаются между собой по эффективности контроля, чувствительности, экономичности. Они базируются на различных способах взаимодействия физических полей с веществом обследуемого объекта и, соответственно, отличаются способами идентификации полученных результатов.

Среди методов контроля важное место занимает бесконтактная, неразрушающая диагностика. Широко используются следующие методы: электрические, магнитные, вихревые, тепловые, акустические, оптические (видимый диапазон), ультрафиолетовые, СВЧ, рентгеновские, гамма методы и т.д. В нашей работе рассматривалось применение метода инфракрасной (ИК) радиометрии, который является одним из методов теплового контроля [1, 2]. Наряду с прочими, в последнее время, он получил достаточно широкое распространение. Это связано с удешевлением приемных матриц, работающих в инфракрасном диапазоне, и соответственно доступностью тепловизоров. Так как метод является бесконтактным и дистанционным, то можем произвести контрольные замеры, находясь на расстоянии от обследуемого объекта. Т.е. применение ИК-радиометрии особенно эффективно, при обследовании зон с высоким напряжением, сильным магнитным полем, для мест с затрудненным доступом, протяженных тел. Все эти возможности, подтверждают целесообразность использования тепловизионной техники для диагностики и контроля электрооборудования, кабельных линий, линий электропередач, трансформаторов. Особенно эффективным является применение тепловизоров при скрининг контроле (экспресс контроле), когда принципиальным является абсолютное значение температур, а необходимо найти зоны с её аномальным отклонением и идентифицировать предаварийные и аварийные участки.

Цель работы. Целью настоящей работы является разработка и внедрение тепловизионных методов для контроля дефектности материалов, электрооборудования. При помощи методов ИК-радиометрии, экспериментально изучить изменение термопроявлений от повреждений структуры материала и дефектов оборудования.

Обоснование метода исследования и техника эксперимента. Метод ИК-радиометрии базируется на фиксации тепловой картинки с поверхности объекта обследования приборным способом (тепловизором). Тепловое поле на

поверхности формируется тепловыми потоками, проходящими через тело. Преобразование и изменение этих тепловых потоков зависит от внутренней структуры объекта. Любое нарушение однородности материала, наличие дефектов изменяет внутренне тепловое сопротивление и, следовательно, происходит перераспределение тепловых потоков, что в свою очередь изменяет тепловую картинку на поверхности. Используются два метода теплового контроля: пассивный и активный. Пассивный метод теплового контроля базируется на изучении распределения теплового поля, на поверхности объекта, вызванного собственным излучением. Активный – основывается на применении внешнего воздействия (механического, электрического [3, 4], теплового), которое стимулирует процессы перераспределения тепловых полей внутри тела [5]. В этом случае, на поверхности тела, мы наблюдаем результат суперпозиции приложенных (активационных) и собственных тепловых полей. Выделение полезного сигнала, возможно на основе решения уравнений нестационарной теплопроводности, в которой учитываются конструкционные особенности объекта обследования, параметры внешней среды, различные режимы работы [6]. При регистрации распределения теплового поля, информация фиксируется в виде снимков (термограмм), которые сохраняются и в дальнейшем используются для детализации и вторичного контроля.

Любой объект, кроме тел находящихся при температуре абсолютного нуля, излучает тепловое (инфракрасное) излучение. Интенсивность излучения тела связана с температурой поверхности определенным законом. В соответствии с законами излучения и поглощения тепловой энергии (Закон Вина) плотность теплового потока определяется по формуле:

$$F_{\lambda_2-\lambda_1} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} \frac{dR_{ч.м.}(\lambda, T)}{d\lambda} \cdot S \cdot d\lambda (Вт) \quad (1)$$

В этой формуле ε – коэффициент излучения поверхности, S – площадь поверхности, $dR_{ч.м.}(\lambda, T)/d\lambda$ – спектральная плотность излучения черного тела. Формула (1) является довольно сложной для практического применения. С целью её упрощения, проинтегрируем это выражение по всем длинам волн и получим закон Стефана-Больцмана, который показывает полную энергетическую светимость объекта в виде:

$$W_{\lambda} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ постоянная Стефана-Больцмана; T – температура в градусах Кельвина; α – угол между тепловизором и нормалью к плоскости исследуемого объекта. Проведя ряд математических преобразований, и сделав некоторые допуски, получим выражение для нахождения температур:

$$T_{\text{факт}} \approx \frac{T_{\text{рад}}}{\sqrt[4]{\varepsilon}} \quad (3)$$

здесь $T_{\text{рад}}$ – радиационная температура, измеренная тепловизором, ε – коэффициент излучения контролируемой поверхности, $T_{\text{факт}}$ – фактическая температура поверхности. Выражение (3) уже нормировано на единицу площади.

Рассматривая выражения (1) и (2) видим, что плотность теплового потока с поверхности тела и соответственно распределение температур на ней, зависят от

состояния этой поверхности, т.е. от величины ε . На значение коэффициента излучения влияет шероховатость или зеркальность, наличие ржавчины, окалины, масляных пятен на обследуемом теле [2]. Все эти параметры изменяют ε . Зеркальные участки будут иметь вид более “холодных”. Шероховатые, ржавые, с масляными пятнами более “теплых”. Влияет на точность определения температуры и угол наблюдения, т.е. угол между нормалью к поверхности и оптической осью приемника ИК-излучения. Чем больше отклонение угла наблюдения от нормали, тем сильнее температура на термограмме, отличается от истинной, в сторону понижения. Таким образом, при проведении ИК-контроля [7] необходимо учитывать взаимное расположение тепловизора и объекта наблюдения. Также в случае, если на поверхности тела имеются участки с различной кривизной, то на термограммах на их месте будут зоны с отклонениями температурного поля, которые необходимо дополнительно проверить.

При проведении обследования важным является учет влияния внешней среды [7, 8]. Так как значительное количество электрооборудования находится на открытом пространстве (линии электропередач, трансформаторное оборудование, опоры изоляторов и т.д.). В значительной степени, на показания, во время тепловизионного контроля, влияет солнечная радиация. Поток солнечной энергии, различные участки контролируемого оборудования нагреваются неравномерно. Поэтому, высока вероятность появления ложных температурных аномалий, которые по интенсивности могут превышать искажения тепловых полей, вызванные дефектами и нарушениями. На практике, для решения данной проблемы, необходимо проводить тепловизионное обследование в ночное время или в пасмурную погоду [8].

Следующим фактором, который необходимо учитывать из-за значительных искажений на результат тепловизионной съемки есть ветер. При обдуве объекта воздушным потоком, происходит его охлаждение, как по всему объему, так и локально. При скорости ветра до 5м/сек в расчетах можно использовать приближенную формулу[8]:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{0.448} \quad (4)$$

где V_1 – скорость ветра в первом случае; V_2 – скорость ветра во втором случае, ΔT_1 - превышение температуры в первом случае; ΔT_2 – превышение температуры во втором случае. Данное выражение справедливо в случае, когда воздушный поток направлен параллельно к поверхности объекта, т.е. максимального теплоотбора от поверхности. Изменение этих характеристик оказывает значительное влияние на тепловую картинку в области дефекта.

В данной работе рассмотрено влияние на изменение термоизображения дефекта в случае сильного порывчатого ветра с произвольным направлением.

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 $23^{\circ} \times 17^{\circ}$; диапазон измеряемых температур от -20°C до $+1500^{\circ}\text{C}$ (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. Методика тепловизионного обследования включает в себя несколько направлений, проводится поэтапно и требует выполнение ряда процедур.

Одним из наиболее простых путей есть: а) провести тепловизионную съемку и получить термограммы, б) выделить на них области с тепловыми аномалиями, в) произвести ремонт или замену оборудования. К недостаткам данной методики следует отнести низкую точность и достоверность полученных результатов (порядка 27 %) за счет наличия наводок, ложных дефектов, влияния различных внешних и внутренних источников тепла, паразитного нагрева. В нашем случае использовалась более затратная, более медленная, но намного эффективнее методика проведения тепловизионной диагностики состоящая из нескольких шагов.

На первом этапе получают эталонные снимки, и создается паспорт обследуемого объекта.

С этой целью, обычно, тепловизионная съемка будущих объектов контроля производится в период пуска. В нашем случае все оборудование уже эксплуатировалось достаточно длительное время, поэтому в качестве опорных, будем использовать снимки первичного обследования. Для проведения измерений было подобрано время и внешние условия, максимально соответствующие требованиям инфракрасной съемки. Т.е. минимальное количество факторов, которые могут создать дополнительные случайные погрешности. Контроль оборудования происходил при таких параметрах: а) пасмурная погода, б) отсутствовал ветер, в) внешняя температура составляла величину 9.2°C (282.2°K), г) отсутствие тумана, дождя, снега, д) все оборудование уже проработало под нагрузкой значительный промежуток времени.

Каждое из перечисленных выше условий отвечает за определенные факторы, вносящие искажения в результаты измерений. а) При пасмурной погоде отсутствует солнечная радиация и исключается неравномерность нагрева различных деталей, нет переотраженных сигналов. б) Безветренная погода обеспечивает равномерность нагрева плоских поверхностей, выпуклых деталей и оборудования, находящегося во впадинах и полостях. Так как на выступающих элементах, происходит ускорение воздушного потока и увеличение теплоотдачи, то скорость их остывания выше, чем плоских. Соответственно, остывание элементов во впадинах слабее. в) Условие работы оборудования в интервале температур 260°K - 320°K , связана с тем, что погрешность результатов измерения тепловизора в этом интервале минимальна. г) Отсутствие тумана, дождя, снега свидетельствует о том, что на поверхности обследуемого объекта нет областей, излучательная способность которых искажена наличием влаги. д) В случае, когда

оборудование проработало под нагрузкой определенный промежуток времени происходит выход на состояние термодинамического равновесия, т. е. тепловые потоки, вызванные включением питания, вышли на режим насыщения.

При проведении тепловизионного обследования (ИК-термографии) важным является не только обнаружение термоаномалий, но и их идентификация. Для определения дефектной зоны используется параметр превышения температуры. Т. е. он показывает, на сколько градусов отличается температура в точке от температуры внешней среды. Его использование позволяет фиксировать резко выраженные повреждения. Однако при неравномерной нагрузке, наличии засветок, влиянии внешних помех точности недостаточно. Поэтому, был введен дополнительный контрольный параметр – избыточное (приведенное) превышение температур ($\Delta t_{изб} = t_d - t_u$), где t_d – температура в точке дефекта, t_u – температура в аналогичной исправной точке. Для определения степени нарушения введем специальный диагностический параметр – коэффициент дефектности ($K_d = \Delta t_d / \Delta t_k$) где. где Δt_d – превышение температуры над внешней средой в точке дефекта, Δt_k – превышение температуры над внешней средой в любой сходной точке объекта на расстоянии не менее 0.5м от дефектной области. Использование этих величин дает возможность выявить дефекты, определить степень их развития и сделать заключение о очередности проведения ремонтно-восстановительных работ.

Для отработки методик обследовались контакты разъединителей. В результате проведения тепловизионной съемки была обнаружена точка с аномальным превышением температур. Термограмма тепловой зоны и график температур через нее представлены на рис. 1. На рис. 1а приведена термограмма разрядника, в контактной зоне которого было обнаружено температурное

превышение. На рис. 1б представлен график изменения температур по линии сечения вдоль дефекта. Наблюдаем температурное превышение на 1.7°C над телом разрядника и 5.6°C , по сравнению с внешней средой.

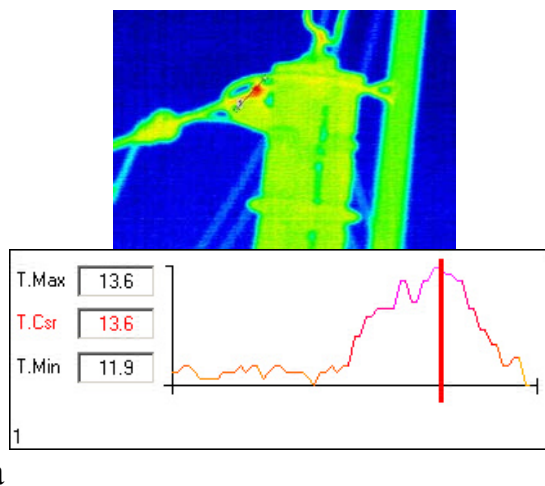


Рис. 1 – Результаты начального термографического обследования: а – термограмма дефектной зоны, б – график температур по сечению аномальной зоны

Тепловизионная съемка проводилась при следующих внешних условиях: пасмурная погода, отсутствие дождя и влажности. Скорость ветра 3м/сек в направлении перпендикулярном плоскости снимка, от наблюдателя. Внешняя температура 8°C . Для определения степени повреждения вычислили $\Delta t_d = 13.6 - 8 = 5.6^\circ\text{C}$ и $\Delta t_k = 12.8 - 8 = 4.8^\circ\text{C}$ (избыточные превышения температур в точке

дефекта и в бездефектной зоне). Из этих величин значение коэффициента дефектности составляет величину $K_d=1.17$. Из требований [7, 8] следует, что дефект находится в начальной стадии развития, т.е. его устранение во время очередного планово предупредительного ремонта. На основании уже проделанных работ, можем сделать вывод о причинах, которые могут инициировать данный тепловой след. Это может быть: обрыв отдельных проводников из-за их перетирания, дефект контактного соединения в месте присоединения ошиновки к аппаратному зажиму, дефект болтового или прессованного соединения.

Для выяснения динамики развития повторный анализ провели через двадцать дней. Во время тепловизионных съемок погодные условия были такие: переменная облачность, скорость ветра 9м/сек, с порывами до 15м/сек тс разных сторон, внешняя температура 6°C. Термограмма аномальной зоны и график изменения температур вдоль неё представлены на рис. 2. Свечение в области

дефекта на рис. 2 а слабее, чем в начальном случае из-за более сильного ветрового обдува. По этой же причине более низкая температура (рис. 2 а), как всего разрядника, так и дефектной области. Из термограммы видно, что при сильных

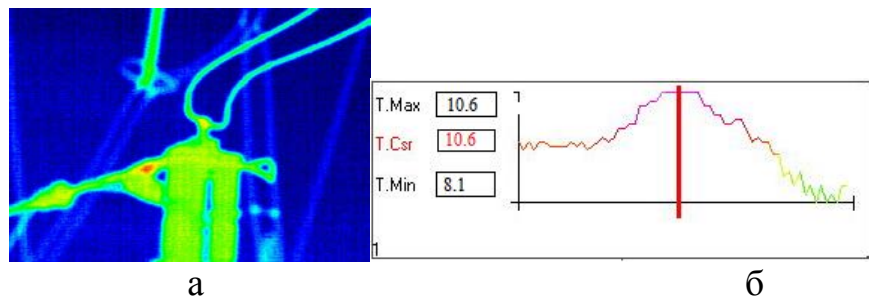


Рис. 2 – Результаты контрольного термографического обследования: а – термограмма дефектной зоны, б – график температур по сечению аномальной зоны

воздушных потоках абсолютное превышение температуры в зоне дефекта меньше, чем в отсутствие ветра. Это связано с разной степенью остывания под воздействием различных потоков ветра. Значения температур, полученные при помощи выражения (4) становятся недостаточно точными. Соответственно, увеличивается вероятность не заметить дефектную область. На термограмме рис. 2 абсолютное превышение температур незначительное. Сделать вывод о наличии дефекта затруднительно [9]. Для определения повреждения снова воспользуемся коэффициентом дефектности. Найдем приведенные превышения температур в точке дефекта $\Delta t_d=10.6-6=4.6^\circ\text{C}$ и в бездефектной зоне $\Delta t_k=9.9-6=3.9^\circ\text{C}$. Значение коэффициента дефектности $K_d=1.18$. Дефект, находится в начальной стадии. Однако наблюдаем незначительный рост коэффициента дефектности, что свидетельствует о развитии нарушения.

На основании полученных результатов можем сделать вывод, что есть возможность расширить область применения методов ИК-радиометрии для контроля исправности электрооборудования и диагностики изменений структуры материала. Результаты получены в условиях сильных воздушных потоков с разнонаправленными порывами.

Более точные результаты определения дефектных зон дают математические методы, базирующиеся на компьютерной обработке полученных термограмм [10]. Были построены градиенты температурного поля на всем пространстве

термограмм. Результаты вычислений представлены на рис. 3. Так как воздушные потоки охлаждают объект обследования несимметрично, то на термограммах тепловые проявления дефектов будут слабо выражены. При расчетах градиента температур рассматриваем соседние точки. В математическом приближении расстояние между соседними точками мало и можем считать, что остывание у них одинаково. Таким образом, градиент температур не зависит от неоднородности остывания в макро масштабе, т.е. не зависит от воздушного потока. На Рис.3а приведен расчет градиента температурного поля для первичной тепловизионной съемки, на рис. 3 б – обработка вторичного снимка. На обоих снимках наблюдаем усиление градиента температур в зоне аномального отклонения температур.

Это свидетельствует о наличии постоянного дефекта в области крепления контакта. Сравнивая рисунки в области аномалии, наблюдаем концентрацию градиентов температурного поля на рис. 3 б по сравнению с рис. 3 а. Можем сделать заключение о дальнейшем развитии дефекта.

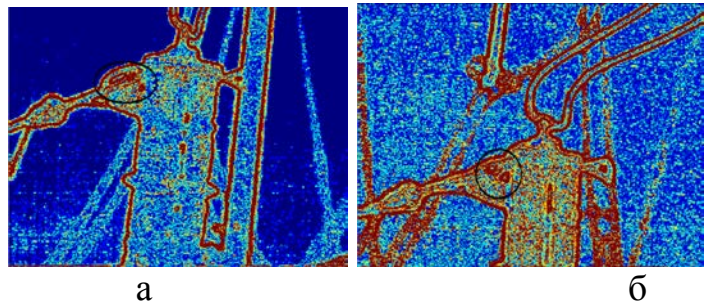


Рис. 3 – Градиенты температурного поля для разрядников: а – первичный снимок; б – вторичное обследование

Таким образом, после проведения

тепловизионной съемки для анализа термопроявлений необходимы различные приемы. Необходимо изучение значения абсолютного превышения температур, определение избыточного превышения температур, анализ коэффициента дефектности, вычисление градиента температурного поля. Комплексное использование всех этих характеристик позволяет определить наличие дефекта степень его развития и дать рекомендации по срокам его устранения.

Выводы

1. На основании рассмотрения изменения термопроявлений изучены изменения структуры материалов и дефектов электрооборудования.
2. Проведена доработка методов ИК-радиометрии для контроля электрооборудования.
3. Обследована часть электрохозяйства Змиевской ТЭС при наличии ветровых потоков.
4. Обнаружены дефекты контактной группы разрядников, определена степень развития нарушений и даны рекомендации по срокам их устранения.
5. С помощью численных методов получены градиенты температурных полей.
6. Даны предложения по расширению границ применения методов ИК-радиометрии в условиях сильных ветровых потоков.

Список литературы: 1. Вавилов, В. П. Инфракрасный и тепловой контроль. [Текст] / В. П. Вавилов. – М.: Спектр, 2009. – 544 с. 2. Клепиков, В. Ф. Розробка та впровадження радіаційних технологій модифікації твердих тіл та обробки конденсованих середовищ. [Текст] / В.Ф. Клепиков, М.І. Базалєєв, В.В. Литвиненко, С.М. Прохоренко і ін. // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 2, № 5 (62). – С. 4–9. 3. Henneke, E. G. Thermography. An NDI method for damage detection [Text] / E. G. Henneke, K. L. Reifsnider, W. W. Stinchcomb // Journal of

Metals. – 1979. – Vol. 31. – P. 11–15. **4. Nordal, P. E.** Photothermal radiometry [Text] / *P. E. Nordal, S. O. Kanstad* // *Physica Scripta*. – 1979. – Vol. 20. – P. 659–662. **5. Thomas, R. L.** Thermal NDE Techniques – from Photoacoustics to Thermosonics [Text] / *R. L. Thomas* // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 21*, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, Melville, NY. – 2002. – Vol. 615 – P. 3–13. **6. Мацевитый, Ю. М.** Обратные задачи теплопроводности Т.1. Методология. [Текст] / *Ю. М. Мацевитый*. – Киев: Наукова думка, 2002.— 408 с. **7.** Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. [Текст] // РД 153 – 34.0-20.363-99. – Утв. 8ин.энерго России 12.12.1999. – М.: Мин.энерго, 1999. – 58 С. **8. Гобрей, Р. М.** Диагностирование электроустановок 0,4-750кВ средствами инфракрасной техники. [Текст] / *Р. М. Гобрей, В.Ф. Чернов, Е. И. Удод*. – Киев.: «КВЦ», 2007. – 374 с. **9. Прохоренко, Е. М.** Тепловизионный контроль электрооборудования электрических станций для выявления аварийных режимов работы [Текст] / *Е. М. Прохоренко, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, А. И. Морозов, О. В. Кулаков*. // *Науковий вісник Укр НДІПБ*. – 2012. – № 2 (26). – С. 191–198. **10. Прохоренко, Е. М.** Способ численной обработки контрастных термоизображений для идентификации дефектов [Текст] / *Е. М. Прохоренко, Б. Б. Бандурян, Н. И. Базалеев, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, В. С. Рихвицкий, В. Н. Робук, М. А. Сагадачный*. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2011. – Т. 1, № 10 (49). – С. 15–20.

Bibliography (transliterated): **1.** Vavilov, V. P. (2009). IR and thermal control. M.: Spectrum, 544. **2.** Klepikov, V. F., Bazaleev, M. I., Lytvynenko, V. V., Prokhorenko, E. M. (2013). Development and application of radiation technologies modification and processing of solids condensed matter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 2, № 5 (62). P. 4-9. **3.** Henneke, E. G., Reifsnider, K. L., W. W. Stinchcomb W. W. (1979). Thermography. An NDI method for damage detection. *Journal of Metals*. Vol. 31. 11–15. **4. Nordal, P. E. S. O. Kanstad, S. O.**, (1979). Photothermal radiometry *Physica Scripta*. Vol. 20. 659–662. **5. Thomas, R. L.** (2002). Thermal NDE Techniques – from Photoacoustics to Thermosonics. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 21*, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, Melville, NY. Vol. 615. P. 3–13. **6. Matsevity, J. M.**, (2002). Inverse heat conduction problems V.1. Methodology. Kiev: Naukova Dumka, 408 **7.** Spec, K. (1999). Main provisions of the infrared technique and the diagnosis of VL. [Text] // RD 153 - 34.0-20.363-99. Approved. 8in.energo Russia M.: Min.energo, 58. **8. Gobrya, R. M., Chernov, V. F., Udod, E. I.**, (2007). Diagnosis 0.4 750kV electrical means infrared technology. Kiev. "KVITS", 374. **9.** Prokhorenko, E. M., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V., Morozov, A. I., Kulakov, O. V., (2012). Thermal control of electrical power plants to identify emergency operation. *Ukr Naukova visnyk NDIPB*. № 2 (26). 191-198. **10.** Prokhorenko, E. M., Klepikov, V. F., Bazaleev, M. I., Lytvynenko, V. V., Rihvitsky, B. C., Robuk, V. N., MA Sagadachny, V. N., (2011). Method numerical processing contrast thermal images to identify defects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol 1, № 10 (49). 15-20.

Поступила (received) 22.05.2014

УДК 66.099.2

М. С. СКИДАНЕНКО, ассистент, СумГУ, Сумы;
В. И. СКЛАБИНСКИЙ, д-р техн. наук, проф., СумГУ, Сумы;
Н. П. КОНОНЕНКО, с. н. с., СумГУ, Сумы

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЯ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИЛЛЕРА

В статье рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса нестационарного истечения струи жидкости из отверстия, что является базовым для расчета виброгранулятора. Определена закономерность регулируемого распада струй жидкости на капли и проведены исследования, которые подтверждают возможность создания грануляторов розплава, для получения продукта в узком фракционном диапазоне.