

М. І. Базалєєв, С. Є. Донець, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, Є. М. Прохоренко (Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків, Україна),

Електрофізично-стимульована термографічна діагностика стану матеріалів трубопроводів

В роботі запропоновано метод активного термографічного контролю стоншення стінок трубопроводів, заснованого на їх нагріванні постійним електричним струмом в умовах руху робочого середовища. Проведено чисельний розрахунок теплового поля та показана його узгодженість з експериментом на модельному зразку.

Ключові слова: Активний термографічний контроль, дефекти трубопроводів, нагрів електричним струмом

В работе предложен метод активного термографического контроля утонения стенок трубопроводов, основанного на их нагревании постоянным электрическим током в условиях движения рабочей среды. Проведен численный расчет теплового поля и показана его согласованность с экспериментом на модельном образце.

Ключевые слова: Активный термографический контроль, дефекты трубопроводов, нагрев электрическим током

In the paper the method of the active thermography control for thin pipe walls which based on the constant electric current heat in condition of work agent movies was proposed. The temperature field was calculated by numerically method and it's result have enough good accordance with experiment on the test example.

Key words: Active thermography control, defect pipeline, heating electric current

Вступ

Безпечна експлуатація промислових та енергетичних об'єктів передбачає необхідність контролю цілісності мереж трубопроводів різноманітного призначення. На теперішній час одним з перспективних напрямів контролю є термографічні методи [1-4], засновані на реєстрації температурних аномалій, зумовлених порушенням теплофізичних характеристик матеріалів, що підлягають контролю. Одним з типових видів пошкодження трубопроводів є стоншення стінок внаслідок корозійного та ерозійного зношування. Виявити температурний прояв подібного стоншення в умовах сталої температури носія, не завжди видається можливим, оскільки тепловий потік через стінку трубопроводу вирівнює температуру на поверхні труби як в дефектній, так і бездефектній областях. В цих випадках можна застосовувати методи індукційного нагріву, але вони не завжди є зручними в умовах реально змонтованої мережі при необхідності скринінгового обстеження, тобто такого що дозволяє за коротких час обстежити мережі великої протяжності, окрім цього контактний нагрів постійним струмом дозволяє реалізувати об'ємний нагрів стінки по всій товщині, уникаючи утворення скін-шару. Якраз в певних випадках такий режим примусового теплообміну через матеріал стінки труби між штучним джерелом енергії та носієм, що проходить через трубопровід, дозволяє виявити місця розташування дефектів. У цьому зв'язку постає задача дослідження можливості застосування нагріву електричним струмом діагностованих ділянок. Ефективність такого підходу описано в роботі [5] стосовно паяних з'єднань. В ній відмінності електричного опору з'єднання мали проявлятися в аналізі діаграми температурного розподілу досліджуваної ділянки термограми. В нашому випадку задача з одного боку ускладнюється необхідністю забезпечення електричного контакту, що виключало б утворення локального іскрового пробою, а з іншого необхідністю створення примусового температурного градієнту в напрямку твірної

труби, тобто в напрямку перпендикулярному тепловому переносу від носія до зовнішньої поверхні.

Постановка задачі та методика проведення досліджень

Для перевірки можливості застосування активації електричним струмом матеріалу стінок трубопроводу необхідно, перш за все, побудувати модель, що описує просторовий розподіл електричного струму в стінці труби з урахуванням суцільності електричного контакту. Виходячи з одержаного розв'язку, побудувати карту розподілу температурного поля. Провести експериментальну верифікацію запропонованого методу на модельному зразку з дефектами типу стоншень стінки труби шляхом термографічних вимірювань з застосуванням тепловізора Fluke 32i. (температурна чутливість 0,05 К). При цьому реалізацію експерименту здійснювати в умовах руху через елемент труби охолоджуючого агенту, що має забезпечувати наявність температурного градієнту.

Розрахункові оцінки ефективності методу

Для визначення можливостей температурної активації даного засобу нагріву частини труби розв'язувалась така модель: на зовнішній поверхні труби з певним зусиллям, яке забезпечує суцільність контакту прикріплено електроди до яких підводиться струм низької напруги.

Для чисельного аналізу використано метод скінчених елементів з одночасним знаходженням як розподілу електричного струму у провідному середовищі, так і задачі теплопередачі з урахуванням конвективного теплообміну з оточуючим середовищем у стаціонарному режимі.

Геометрію розрахункової області наведено на рис. 1.

Для стаціонарного електричного струму у провідному середовищі використовувалось стаціонарне рівняння електропровідності:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0. \quad (1)$$

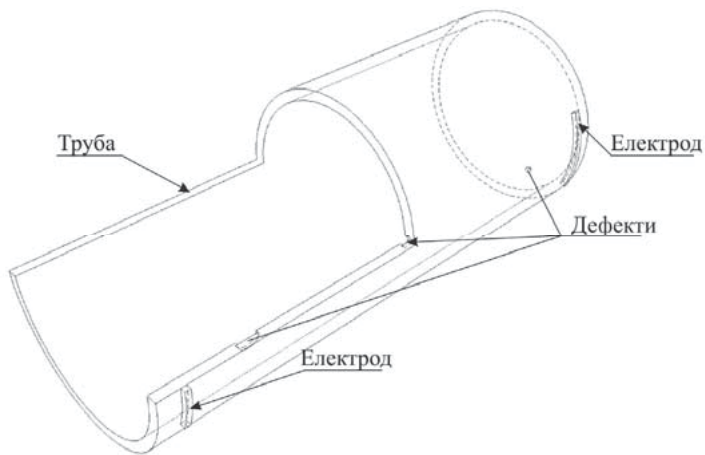


Рис. 1. Геометрія розрахункової області

У нерухомій системі координат закон Ома в диференціальній формі:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_e, \quad (2)$$

де $\sigma = \frac{1}{\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))}$ - електропровідність матеріалу

$C_{M/M}$; \vec{J} - густина струму A/M^2 ; \vec{J}_e - густина зовнішнього струму; $\vec{E} = \nabla\phi$ - напруженість електричного поля V/M .

Таким чином стаціонарне рівняння електропровідності:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi - \vec{J}_e) = 0. \quad (3)$$

З урахуванням джерел струму можна останнє рівняння узагальнити:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi - \vec{J}_e) = Q_j, \quad (4)$$

де Q_j - густина джерела струму A/M^3 .

Рівняння (4) доповнюється граничними умовами, такими як електрична ізоляваність, електричний контакт різномірних поверхонь, струм джерела, заданий потенціал.

Для електричної ізоляваності поверхні:

$$\vec{n} \cdot \vec{J} = 0, \quad (5)$$

де \vec{n} - одиничний вектор зовнішньої нормалі поверхні.

Електричний контакт поверхонь корелює з перехідною провідністю h_c двох контактуючих поверхонь. Густина струму верхньої та нижньої поверхонь залежить від різниці потенціалів відповідно до:

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{J}_1 &= -h_c (\phi_1 - \phi_2) \\ \vec{n} \cdot \vec{J}_2 &= -h_c (\phi_2 - \phi_1) \end{aligned} \quad (6)$$

На мікроскопічному рівні, контакт поверхонь можна визначити як кінчену кількість точок контакту

Мікроскопічна шорсткість поверхонь характеризується середньою висотою $\sigma_{u,asp}$ та $\sigma_{d,asp}$ відповідно верхньої та нижньої поверхонь та середнім нахилом $m_{u,asp}$ та $m_{d,asp}$. Середньоквадратичні значення σ_{asp} та m_{asp} [6,7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{asp} &= \sqrt{\sigma_{u,asp}^2 + \sigma_{d,asp}^2} \\ m_{asp} &= \sqrt{m_{u,asp}^2 + m_{d,asp}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

У роботах [5,6] показано кореляційну залежність яку можна використовувати для ізотропних шорстких поверхонь за умови пластичної деформації. Ця залежність зв'язує h_c з загрузкою на границю контакту:

$$h_c = 1,25 \sigma_c \frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}} \frac{p}{H_c}^{0,95}, \quad (8)$$

де H_c - мікротвердість більш м'якого матеріалу; p - контактний тиск; σ_c - середнє гармонічне провідностей контактуючих поверхонь:

$$\sigma_c = \frac{2\sigma_u\sigma_d}{\sigma_u + \sigma_d}. \quad (9)$$

Відносний тиск $\frac{p}{H_c}$ можна обчислити безпосередньо за значенням $\frac{p}{H_c}$ чи з використанням відповідної залежності [6,7] для відносного тиску використовуючи c_1 і c_2 , кореляційні коефіцієнти Віккерса, та розмірний індекс:

$$\frac{p}{H_c} = \frac{p^{\frac{1}{1+0,071c_2}}}{c_1 \cdot 1,62 \frac{\sigma_{asp}}{\sigma_0} m_{asp} \frac{1}{1+0,071c_2}}, \quad (10)$$

де $\sigma_0 = 1$ мкм. Для матеріалів з твердістю за Брінелем від 1,30 до 7,60 ГПа, значення c_1 та c_2 визначаються за [2,3]:

$$\begin{aligned} \frac{c_1}{H_0} &= 4,0 - 5,77 \frac{H_B}{H_0} + 4,0 \frac{H_B^2}{H_0^2} - 0,61 \frac{H_B^3}{H_0^3} \\ c_2 &= -0,37 + 0,442 \frac{H_B}{c_1} \end{aligned} \quad (11)$$

де H_B - твердість за Брінелем; $H_0 = 3,178$ ГПа.

Для граничної умови струму джерела струму:

$$-\vec{n} \cdot \vec{J} dS = I_0,$$

де S - площа поверхні; I_0 - заданий струм.

Для розрахунку теплового поля використовується стаціонарне рівняння теплопровідності:

$$\rho_p \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (12)$$

де T - температура; Q - густина джерел тепла; ρ - щільність матеріалу; c_p - ізобарна теплоємність. При проходженні електричного струму через провідний матеріал у ньому виділяється тепла енергія:

$$Q = \vec{J} \cdot (\vec{E} + \sigma^{-1} \vec{J}_e). \quad (13)$$

Рівняння (12) необхідно доповнити граничними умовами для конвективного теплообміну:

$$\vec{n} \cdot k \Delta T = h(T - T_{inf}).$$

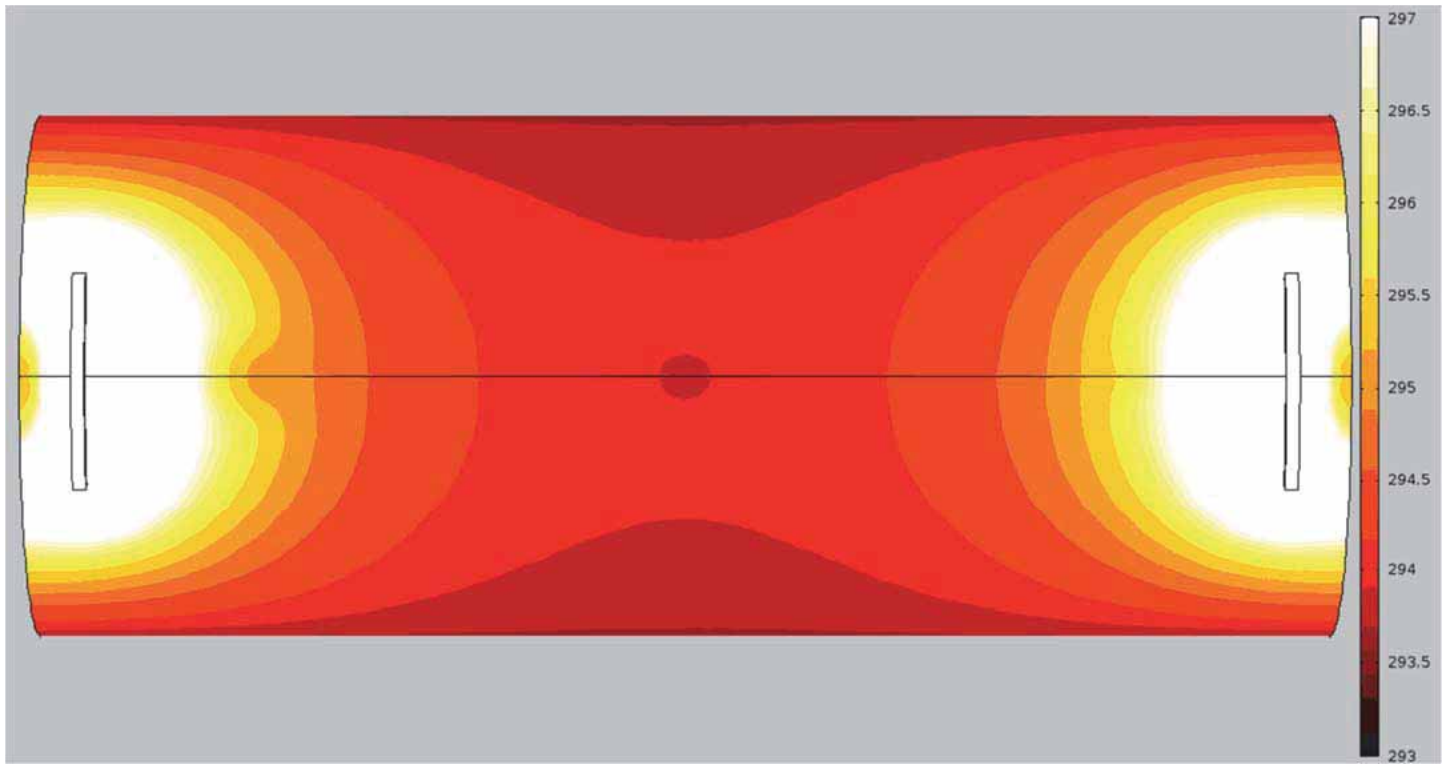


Рис. 2. Розрахунковий розподіл температури на зовнішній поверхні

Розподіл температури за рівняннями (4) та (12) з відповідними граничними умовами знаходився за методом скінчених елементів.

На рис. 2 наведено розрахунковий розподіл температури на зовнішній поверхні труби після 100 С нагріву а на рис. 3. представлено графік динаміки зміни температури на твірній прямій труби.

На графіку температури на твірній прямій труби чітко розрізняються ділянки під якими можливо знаходяться дефекти внутрішньої поверхні (рис. 3 ділянки а, б, в).

З результатів розрахунку можна встановити, що

безпосередній нагрів частини трубопроводу електричним струмом низької напруги може дозволити ідентифікувати внутрішні дефекти, які являли собою штучні стоншення стінки труби з внутрішньою поверхні з використанням термографічних методів вимірювання, за умови якщо через внутрішню поверхню відбувається відтік теплової енергії за рахунок теплообміну з теплоносієм. Це є можливим, коли по трубопроводу увесь час вимірювання відбувається рух робочого середовища.

Як видно, з розрахунків на досліджуваній ділянці є зона більшої і меншої інтенсивності росту температури. Обидві ділянки можуть використовуватись для

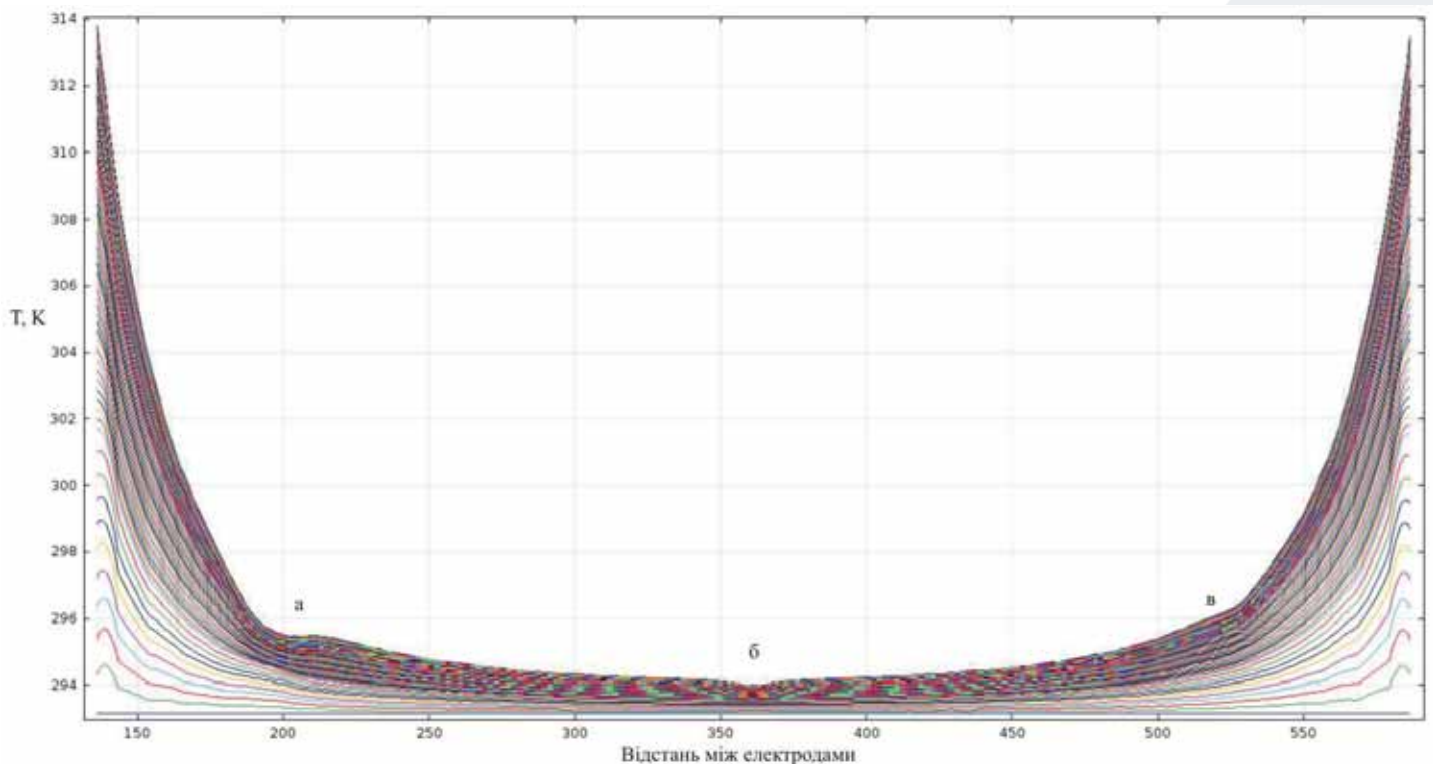
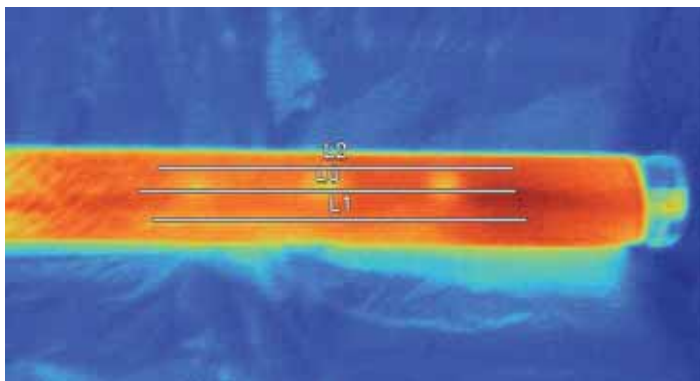
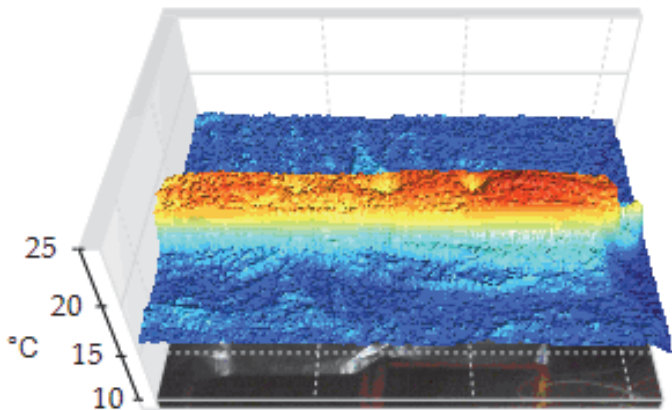


Рис. 3. Розподіл температури на твірній прямій (від 0 до 100 С з інтервалом в 1 С)



а

3D-IR™



б

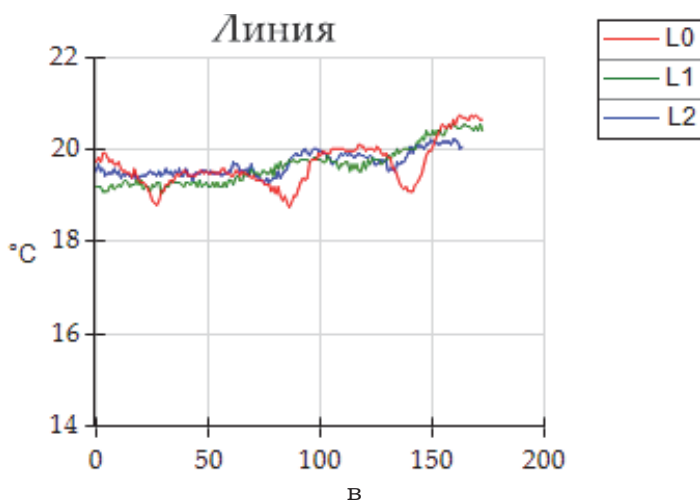


Рис. 4. Результати експериментальних вимірювань:

а) розподіл температурного поля на експериментальному зразку; б) розподіл температурного поля в тривимірному просторі; в) розподіл температури вздовж ліній L0, L1, L2, що проходять по поверхні зразка

активації температурного поля. В залежності від глибини та конфігурації дефекту.

Для проведення перевірки проведених розрахунків експериментальним шляхом було взято фрагмент сталеві труби, що містила розташовані в ряд модельні дефекти у вигляді стоншень різної глибини, до якої вздовж периметру приєднувались контактні шини, змащені графітовою змазкою, після чого подавалась постійна напруга значенням 10 В. Після нагрівання фрагменту зразку труби до температури близько 20 °C через трубу подавався потік охолоджуючого повітря з

температурою на 10 °C нижчою за температуру стінки труби. Як видно з рис. 4, вищевадені розрахунки моделі нагрівання труби струмом підтверджуються розподілом температурного поля на експериментальному зразку. На рис. 4 показані результати експериментальної перевірки, зокрема, температурні профілі вздовж твірних, в тому числі тих, що проходять через дефекти (червона лінія рис.4.в). При перетині зон розташування дефектів спостерігаються спади температури.

З порівняння експериментальних результатів та чисельного моделювання можна встановити, що застосування даної методики є перспективним для визначення значних внутрішніх дефектів у трубопроводах та судинах. Серед її переваг можна зазначити швидкість отримання результатів та їх наочність.

Висновки

Термографічний контроль має високий потенціал застосування в енергетиці та галузях промисловості, що використовують протяжні мережі трубопроводів. Ефективність створення нових технологічних рішень для здійснення контролю полягає у підвищенні інформаційної цінності температурного сигналу, що реалізуються через створення суперпозиції зондуючого теплового поля та технологічного теплового поля. При проведенні термографічного контролю стінок трубопроводів, по яким відбувається рух робочого середовища, може використовуватись контактний нагрів постійним струмом, як інструмент збурення зондуючого теплового поля для ідентифікації схованих дефектів. Цей підхід є більш ефективним, коли по трубопроводу під час вимірювання відбувається рух робочого середовища, яким зумовлюється технологічне теплове поле, тим самим забезпечуючи інформаційну цінність температурного сигналу.

Список літератури:

1. М.І.Базалеев, В.В.Брюховецький, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко, Є.М.Прохоренко / Термографічний контроль структурних неоднорідностей у феромагнетиках при активації електромагнітним полем // Компрессорное и энергетическое машиностроение.-№ 3(37).-2014 с.13-17.
2. Н.И.Базалеев, Б.Б.Бандурян, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко, Г.В.Кирик, А.Д.Стадник / Тепловизионная дефектоскопия и диагностика компрессорного оборудования // Компрессорное и энергетическое машиностроение.-2010.-№2(20).-с.37-43.
3. Н.И.Базалеев, Б.Б.Бандурян, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко, Е.М. Прохоренко / Особенности обнаружения дефектов в металлах при циклических напряжениях методом динамической термографии // Компрессорное и энергетическое машиностроение.-№ 2 (40).- 2015.- с.50-55.
- 4.Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. - М.: ИД Спектр, 2009. - 544 с.
5. В.Ю.Глуховский / Применение тепловизионной диагностики для контроля качества паяных соединений статорных обмоток электродвигателей // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.-№2.-2014.- с.23-26.
- 6.А. Bejanetal., A.Kraus Heat Transfer Handbook, Wiley, 2003.-1496 p.
- 7.Cooper M. G., Mikic B. B., Yovanovich M. M. / Thermal contact conductance// Int. J. Heat Mass Transfer.-v.12.-Iss.3.- p.279-300 (1969).