

Тобто пропонується для використання АЕ-блок, – виконуватиме на циклі кристалізації температурного репера функцію реєстратора відхилення від гомогенності евтектичного РР, а на циклі топлення (“робочому” циклі роботи евтектичного температурного репера) — функцію часового “старт-стопного” маркера часу реалізації використовуюваного фазового переходу.

1. *Binary Alloy Phase Diagrams, Vol. 1, (Edited by V. T. Massalski), American Society for Metals, 1986.* 2. *McNaughton, Mortimer C.T. Differential Scanning Calorimetry. IRS; Physical Chemistry Series 2, vol.10. -1975. -London: Butterworths (Norwalk: reprinted by Perkin-Elmer Corp.).* 3. *Hemminger W., Höhne G.*

*Calorimetry – Fundamentals and Practice. Verlag Chemie, Weinheim. -1984* 4. *Hemminger W., Höhne G., Flammersheim H.-J. Differential Scanning Calorimetry. Springer, Berlin. -1996.* 5. *Прохоренко В., Паздрій І., Кондир А., Прохоренко С., Борисюк А. Високотемпературна корозія аустенітних хромонікелевих сталей у розтопах на основі галію. //ФХММ. -2004. Спец.випуск. 1, т.4, – С. 267-269.* 6. *Прохоренко С., Стадник Б., Бояр З. Контроль гравитационной седиментации рабочего элемента температурного репера с использованием Методики АЕ //IX Międzynar. sem. Metrologów < Metody i Technika Przetwarzania Sygnałów w Pomiarach Fizycznych >. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Electrotechnika. z.22. -2002. - С. 161-164.*

УДК 536.1

## НАДІЙНІСТЬ КАБЕЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ Й ТЕРМОДИНАМІКА НЕОБОРОТНИХ ПРОЦЕСІВ

© Олександр Гук, 2005

Науково-виробниче об'єднання “Термоприлад”,  
вул. Наукова, 3, 79053, Львів, Україна

*Здійснено експериментальні дослідження метрологічної й механічної надійностей кабельних перетворювачів температури, які обговорені з позицій термодинаміки необоротних процесів.*

*Осуществлены экспериментальные исследования метрологической и механической надежности кабельных преобразователей температуры, которые обсуждены с позиций термодинамики необратимых процессов.*

*The experimental investigations of metrological and mechanical refuse of cable temperature transducers were maden. Their results were discussed accordingly to thermodynamics of irreversible processes.*

**Вступ.** Перетворювачі температури (далі по тексту – ПТ) кабельного типу домінують в Україні та за кордоном, зокрема, в ядерній енергетиці. Відомо [1], що відхилення показів ПТ спричинені змінами стану матеріалів чутливих елементів (ЧЕ). Як окремо виділені термодинамічні системи вони можуть бути описані з енергетичних позицій [2].

**Місце досліджень та мета роботи.** Підхід, що базується на реологічній основі, як показано в [3], має загальний характер і може враховуватися лише у першому наближенні. Метою праці є визначення моделі ПТ кабельного типу з матеріалом ЧЕ включно; встановлення основних діючих механізмів дестабілізації показів ПТ та пошук резервів подальшого покращання метрологічної та механічної надійностей ПТ.

**Конструктивні особливості кабельних перетворювачів температури та їх надійність.** Існують

певні дефекти конструкції ПТ, зумовлені як технологією виготовлення самого ПТ, так і технологією виготовлення основних конструктивних матеріалів, що призводять до його передчасної механічної відмови. Термін “передчасний” вимагає уточнення відповідно до типової методики розрахунку механічної надійності ПТ, узгодженої з сукупністю нормативних документів [4]. Розрахунок показників безвідмовності зводиться до попередньої оцінки їх на етапі проектування для вибору оптимального варіанта конструкції та визначення слабких місць ПТ.

Ймовірність безвідмовної роботи ПТ за час  $\tau$  становить  $P(\tau) = e^{-\lambda_{\Sigma} \tau}$ . Інтенсивність відмов ПТ  $\lambda_{\Sigma}$  значною мірою визначається складовою, зв'язаною з інтенсивністю відмов елементів робочої частини ПТ в експлуатаційних умовах, що зумовлено дією температурного чинника – коефіцієнт  $K_1$  – у сукупності з

коефіцієнтом  $K_2$  загальних умов експлуатації (наприклад, в умовах транспорту  $K_2=6\dots 8$ , у той час як на підприємствах важкого машинобудування  $K_2=10$ , а в лабораторіях  $K_2=1$ ):  $\lambda_{\Sigma} \approx K_1 K_2 \sum_{i=1}^n \lambda_i$ . Значення інтенсивності відмов  $\lambda_i$  окремих конструктивних елементів визначені експериментально для різних видів ПТ. Наприклад, для гарячого з'єднання  $\lambda_1=0,26 \cdot 10^{-6}$  1/год; для термоелектрода і для захисної рурки відповідно у 20 і 130 разів менше [5].

**Термодинаміка необоротних процесів і ресурсу роботи у кабельній термометрії.** Серед численних проблем теорії надійності існують дві проблеми, які виникли практично одночасно з теорією й залишаються сьогодні такими самими актуальними, незважаючи на спроби їх вирішення. До них належать:

1) розрахунок показників надійності у змінних, зокрема циклозмінних, режимах експлуатації; особливо це стосується температурних режимів, оскільки відомо [6], що інтенсивність дифузійних процесів у металах, у середньому, зростає на порядок у разі підвищення температури на 100...200 К;

2) перерахунок показників надійності для переходу від одного режиму до іншого (зокрема від нормального – до форсованого і навпаки), що дає змогу обґрунтувати прискорені методи вивчення надійності.

На підставі вищеподаного можна розглянути можливість застосування моделі надійності, що ґрунтується на термодинаміці необоротних процесів. Відомо, що відмови виникають внаслідок деградації основних характеристик ПТ, а сама деградація найзагальніше вдало описується термодинамікою необоротних процесів. Тому виникла потреба встановити зв'язок між параметрами надійності та термодинамічними параметрами ПТ, що досі не було реалізовано у термометрії.

Складні явища перенесення, до яких згідно з [1,2] належать термоелектричні явища, дали змогу зосередити увагу на двох основних для термометрії складових рівняння термодинамічного стану. До них належать електрична й теплова складові, які разом формують спектр простих термоелектричних явищ. Коли до них долучається хемічна складова, що визначає масоперенесення, явища неминуче ускладнюються за наявності поздовжнього градієнта температури, що спостерігається у електродах термопар. Тоді згідно з [7] формується один з компонентів нестабільності НСХ, що має хемічне походження. Ана-

логічним вважається вплив механічної складової, яка відповідає за інший компонент нестабільності НСХ [8].

Локальна дисипативна функція  $\mathcal{G}$  характеризує виробництво ентропії у локальних об'ємах системи:

$$\mathcal{G} = \frac{1}{V} \frac{dS}{dt} = \sum_{i=1}^n X_i I_i, \text{ де } X_i - \text{ узагальнена сила;}$$

$I_i$  – узагальнений потік. У нас

$$\sum_{i=1}^3 X_i I_i = X_e I_e + X_\mu I_\mu + X_\sigma I_\sigma, \text{ де доданки відпові-}$$

дають трьом видам перенесення – електро-, масо- та механоперенесенню відповідно під дією електричної, хемічної та механічної сил, які діють сумісно з тепловою силою. Шлях дії цих видів перенесення – через флуктуації або внутрішні шуми [10]. Зменшення відхилень дією на внутрішні шуми термометричного матеріалу ПТ може сприяти вирішенню проблеми стабільності НСХ. Шуми, своєю чергою, мінімізуються при досягненні локального енергетичного мінімуму термодинамічного стану в матеріалах ЧЕ (за умови розташування останніх в умовах градієнта одного чи декількох термодинамічних параметрів). Під час розгляду процесу у часі це відбувається, коли період зміни конкретного термодинамічного параметра є меншим за період релаксаційної дисипації термодинамічного стану.

Експлуатація термопар передбачає створення в них розподілених вздовж електродів термодинамічних параметрів і відповідно розподіленого термодинамічного стану. Тому головна мета стабілізації НСХ ПТ вбачається в цілеспрямованому створенні у матеріалі ЧЕ саме такого стану, який би максимально відповідав умовам майбутньої експлуатації.

Жорсткі умови використання ПТ щодо температурно-часових режимів, які викликають механічні напруження в термопарах, призводять до погіршення метрологічних характеристик (інтегральна термо-ЕРС змінюється на  $\Delta U_i$ ). Зі збільшенням температури й рівня механічних напружень у термоелектродах  $\Delta U_i$  зростає. При досягненні гарячою зоною термоелектрода температури релаксації механічних напружень термо-ЕРС  $\Delta U_i$  починає спадати. Причини виникнення механічних напружень та деформацій різноманітні. Іноді механічні напруження проявляються як наслідок дії зовнішніх сил на термоелектрод. Причому вплив залежить як від структури кристалічної ґратниці, так і від фундаментальних властивостей речовини. Становить інтерес висвітлення зв'язку змін

абсолютної та інтегральної термо-ЕРС з механічними напруженнями, що виникають у матеріалах внаслідок змін їх основних термодинамічних параметрів.

Існують підстави для розгляду матеріалу ЧЕ як виокремленої термодинамічної системи, що описується основним рівнянням термодинаміки [9]:

$$dE_{int} = TdS + \sum_k \mu_k dn_k - pdV, \text{ де } E_{int} - \text{внутрішня}$$

енергія;  $S$  – ентропія;  $\mu_k$  – рівень хемічного потенціалу  $k$ -го компонента системи вмістом  $n_k$ ;  $p$  – тиск;  $V$  – об'єм. При сталому значенні внутрішньої енергії  $dE_{int} \rightarrow 0$  для квазірівноважних процесів, коли  $dS \rightarrow 0$

(для 1 г-моля речовини)  $\sum_k \mu_k dn_k = pdV$ . Корис-

туючись ним, можна досягти позитивних результатів у двох напрямках:

– визначення і прогнозування змін НСХ, тобто метрологічної надійності;

– розрахунку ресурсу роботи ПТ, тобто механічної надійності.

Стосовно першого напрямку зазначимо, що зміни інтегральної термо-ЕРС  $\Delta U$  термопар, зумовлені фізико-хемічними факторами, за умови наявності градієнта температури  $\nabla T$  і відповідно градієнта хемічного потенціалу  $\nabla \mu$ , визначаються залежністю [3]:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{1}{e} \int_0^x \nabla \mu dx = \frac{1}{e} \int_{T_c}^{T_h} \nabla \mu dT = \\ &= \frac{1}{e} \int_{T_c}^{T_h} \sum_k \nabla \mu_k n_k dT = \frac{p}{e} \int_{T_c}^{T_h} \int_{V_1}^{V_2} dV dT, \end{aligned}$$

де  $T_c$  та  $T_h$  – відповідно температури холодного та гарячого злутів. Тобто в умовах пружного деформування існує пропорційність між прикладеним тиском та змінами НСХ, що відповідає даним [11]. Для пружного лінійного деформування, що характеризується механічними напруженнями  $\sigma$  та деформаціями  $\varepsilon$ , зміни НСХ визначені [8]:  $\Delta U = \frac{\sigma}{2e} \int_{T_c}^{T_h} \int_{\sigma_c}^{\sigma_h} d\varepsilon dT$ .

Коли існує зв'язок приростів модуля Юнга та деформації:  $\Delta E_U = -\frac{\sigma}{\varepsilon^2} \Delta \varepsilon$  ( $\delta E_U = -\delta \varepsilon$ , де  $\delta E_U$  і  $\delta \varepsilon$  – відповідно відносні значення змін модуля Юнга та деформації), то зміни НСХ корелюють зі змінами модуля Юнга [8].

Вельми цікавими є дані [12] щодо впливу ударних навантажень на термо-ЕРС. Сигнал, який виникав, значно перевищував термо-ЕРС, зумовлену стрибком температури в момент удару. Так, термо-ЕРС мідь-константової термопари під дією ударного тиску 30 ГПа сягала 250 мВ (коли значення температури злуту становили  $\sim 200$  °С, термо-ЕРС повинна становити  $\sim 9$  мВ). Отже, термо-ЕРС, яка виникла, залежить більшою мірою від ударних навантажень і меншою мірою від температури злуту. Це також впливає з вищенаведених рівнянь, де термо-ЕРС залежить від градієнта температури, який припадає на напружену ділянку. Для деформації, сконцентрованої на невеликій довжині, зміни термо-ЕРС повинні бути меншими, оскільки її протяжність становить незначну частку загальної довжини зразка і на неї припадає невеликий перепад температури. Подібно, розглядаючи термодинамічну систему кабельного ПТ, не можна зосереджувати увагу лише на зоні гарячого злуту. Слід розглядати достатньо довгу ділянку ПТ, де може статися відмова. Остання може статися навіть у зоні кріплення робочої частини ПТ і відбуватися шляхом обриву.

Другий напрямок стосується механічної надійності системи. Зазначений підхід було продемонстровано у [13]. На підставі термодинаміки необоротних процесів визначено оптимальну тривалість електро-тренування складних радіотехнічних виробів. Основне припущення цієї праці полягало в тому, що швидкість зростання ентропії термодинамічної системи самого виробу  $dS/d\tau$  пов'язувалась із швидкістю зміни певної інтегральної функції стану системи  $\frac{dZ}{d\tau}$ . Остання

визначалась експоненційною залежністю  $\frac{dZ}{d\tau} \sim C \exp(-\tau/\tau_0) \sim \lambda(\tau)$ , де  $C$ ,  $\tau_0$  – константи.

Керуючись припущенням, що розв'язком рівнянь перенесення є вираз  $I_j = \sum_k L_{jk} X_k$ , де  $L_{jk}$  – кінетичний

коефіцієнт; було отримано дисипаційне рівняння

$$\frac{dS}{d\tau} = \sum_j A_j \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_j}\right), \text{ де } A_j, \tau_j - \text{сталі. На нашу думку,}$$

воно не цілком коректне, а для термоцикловання чи дії нерегулярних механічних навантажень навіть неправильне. Це зумовлено тим, що рівняння

$$\frac{dS}{d\tau} = \sum_{jk} L_{jk} X_j X_k \text{ придатне для описання процесів у}$$

термодинамічній системі закритого типу. При зовніш-

ній дії на систему (термоцикловання, прикладення механічних навантажень тощо), тобто для відкритої системи, наведене рівняння непридатне. Тоді основною стає саме зовнішня складова швидкості зміни ентропії, яку можна розрахувати, керуючись [14]. Так, для термоцикловання, коли проявляється кумулятивний ефект (за малої тривалості відпочинку ПТ та високої частоти термоударів), густина локальної дисипативної функції не може слугувати інтегральною характеристикою термодинамічної системи. Нею може бути інтеграл згаданої величини по об'єму, відомий загалом як дисипативна функція системи [9].

Вплив термоцикловання як основного для ПТ дефлектаційного процесу що відзначається в умовах експлуатації, дав змогу зупинитись на такому. Нагромадження мікротріщин у матеріалі, яке випереджає виникнення магістральної мікротріщини та механічну відмову матеріалу ЧЕ, призводить до поступової зміни термоелектричних властивостей. У полі градієнта температури це проявляється як додатковий зсув НСХ на

$$\Delta U(\tau) = A \left( \tau \frac{dS}{d\tau} \right)^{1/2} = A (\mathcal{G}\tau)^{1/2}, \text{ де інтегрувальна дія}$$

часозмінних умов замінена сталою дією. Згідно з [9] фактором, який сприяє зміні дисипативного потоку ентропії, може бути стрімка зміна температури теплового потоку  $W$ :  $T \frac{dS}{d\tau} = -\frac{W}{T^2} \nabla T$ . Інакше, чим стрімкіше

змінюють температуру і чим більший тепловий потік прикладають до матеріалу ЧЕ, тим значніші відхилення від рівноваги виникають у ньому та тим істотніших змін НСХ набуває ПТ. Коли флуктуаційно-дисипативне відновлення існуючого нерівноважного стану системи не встигає відбутися до моменту повторного термоцикловання, слід сподіватися на посилення дисипативного потоку ентропії та нерівноважності термодинамічного стану у матеріалі, пропорційно до кількості термоциклів

$$n: T \frac{dS}{d\tau} = -n \frac{W}{T^2} \nabla T. \text{ Експериментально встановлений}$$

характер змін НСХ під дією термоударів:  $\Delta U \sim \Delta T_{str}; n$  (залежно від їх кількості  $n$  та амплітуди  $\Delta T_{str}$ ) збігається з вищевикладеними залежностями.

Деформований у ході виготовлення термометричний матеріал перебуває в нестационарному нерівноважному стані. Тривала високотемпературна витримка (для цієї правильно складеної маршрутної технології карти виготовлення ПТ) переводить матеріал

у стаціонарний для цієї температури нерівноважний стан. Цей стан можна вважати основним бажаним станом матеріалу ЧЕ (у разі експлуатації ПТ за умов відсутності взаємодії їх із середовищем). Тоді енергія, що надходить, флуктуаційно дисипує за мінімальної швидкості виробництва ентропії  $dS/d\tau$ . Цей стан досягається після закінчення часу релаксації  $\tau_a$  і характеризується встановленим значенням НСХ. Він не еквівалентний вихідному нерівноважному стану з вихідною НСХ, а зсунутий стосовно неї на  $\Delta U$ . Для того, щоб зміни НСХ у разі переходу з нестационарного у стаціонарний стан були мінімальними, параметри напружень та деформацій матеріалу ЧЕ повинні бути оптимальними стосовно таких самих у стаціонарному нерівноважному стані. Такі вимоги стосуються не тільки матеріалу ЧЕ, але й матеріалу захисної рурки ПТ. Проте на вихід на її режим відпалу переважно звертають меншу увагу, оскільки інтенсивність відмови рурки на два порядки менша порівняно з термоелектродами та гарячим зльотом.

Отже, можна запропонувати виділяти два показники надійності ПТ: середнє напрацювання на відмову та середній термін служби. Основним критерієм відмови вважається вихід основної похибки за встановлені межі, а критерієм граничнодопустимого стану ПТ – механічне руйнування конструктивних елементів.

Деградаційні процеси, які розвиваються у частково відкритих термодинамічних системах, здатних обмінюватись енергією або ентропійними потоками із зовнішнім середовищем, формують термодинамічні підстави для виходу з ладу різних конструктивних елементів. Відмова повинна статися у найслабшій ланці ПТ, яка перебуває у найбільш енергетично напруженому стані. Переважно такою ланкою є зона гарячого зльоту, якщо інше не передбачено особливостями конструкції ПТ та монтажем його на контрольованому об'єкті. При некоректному монтажі, зокрема при використанні занадто твердих ущільнювальних прокладок, механічні напруження, що виникають, можуть не усуватися технологічно, що призводить до стрімкого погіршення надійності ПТ.

**Технологія виготовлення ПТ та її подальший розвиток на засадах пропонованої моделі.** ПТ на основі термопарного кабелю, як відомо, виконуються з ізолюваним та неізолюваним гарячими зльотами. Зльоти формуються лазерним або мікроплазмовим

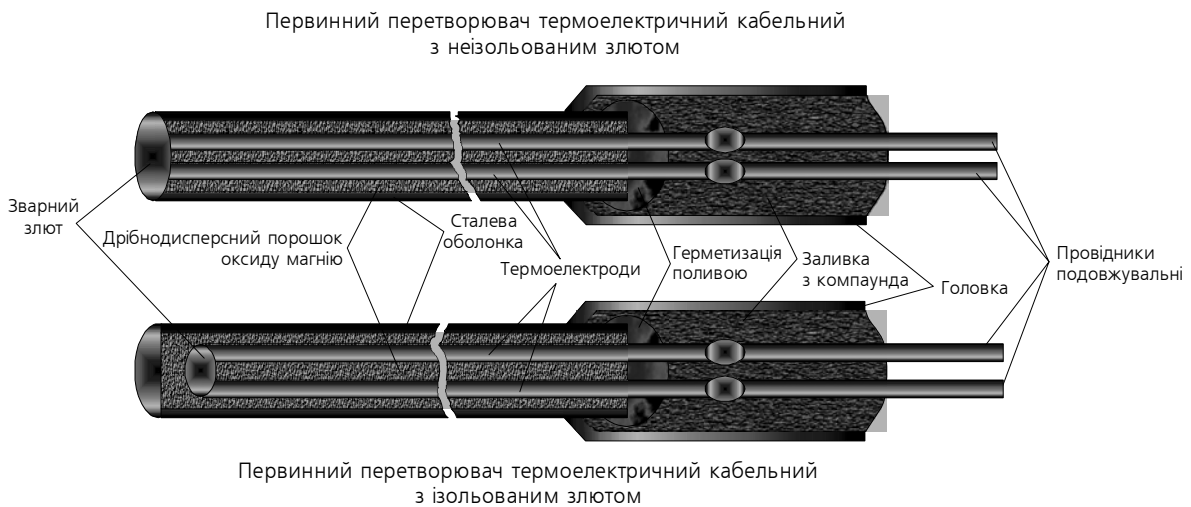
зварюванням та ізолюються, у разі потреби, засипанням порошком оксиду. Перевагу віддають порошку оксиду магнію, оскільки кабель виготовляють із застосуванням згаданого оксиду. Для неізолюваного з'єднання останній приварюється безпосередньо до дна ПТ. При ізолюванні з'єднання приварюють дно до захисної рурки кабеля, формуючи герметичну конструкцію ПТ (див. рисунок). Кожна з цих конструкцій має певні переваги та недоліки стосовно механічних напружень і, відповідно, надійності.

Важливого значення набуває подальший розвиток методів контролю герметичності місця зварювання та формування гарячого з'єднання. Досі був поширений метод контролю М1 дією гелієм під тиском 1 МПа на сформований з'єднання термоелектродів й дна з подальшим зануренням останнього у спирт. Відсутність пухирців газу з місця з'єднання свідчила про його герметичність. Цікавим вважався метод М2 виявлення прихованих дефектів зварювання, який полягав у дії на ПТ п'яти

термоударів. Контролювали електричний опір термоелектродів, а також цілісність кола "термоелектроди – зовнішня рурка". Розрив кола або різке збільшення опору свідчило про наявність дефектів виготовлення.

У цій праці модернізовано цей метод. Його поєднано з відомим методом подання імпульсу електричного струму на термоелектроди термодари, а також на запаралелені термоелектроди та захисну рурку. Вивчення перехідних електричних та теплових процесів дає інформацію про якість виготовлення. Модернізованим методом М3 продіагностовано 24 зразки ПТ кабельного типу. Внаслідок інформативності методу вдалося підвищити у 1,5...2,2 раза метрологічну та механічну надійності ПТ типу ТХА-2388М, виготовлених з кабелю діаметром 1,2 мм (див. таблицю).

Це, своєю чергою, дало змогу підвищити максимальну температуру експлуатації за незмінних вихідних показників механічної надійності приблизно на 100 К, не змінюючи самої конструкції ПТ.



Типові конструкції ПТ кабельного типу

**Порівняльні характеристики ПТ кабельного типу, діагностованих за допомогою релевантних методів (М1-М3)**

Зміни НСХ (К) за 1000 год відпалу за 1073 К			Інтенсивність відмови $\lambda_{\Sigma}$ ПТ в р-ті 1000 год. відпалу за 1073 К, $10^{-6}$ 1/год.		
М1	М2	М3	М1	М2	М3
1,5	1,6	1,1	0,31	0,29	0,24

**Висновки.**

1. На підставі аналізу умов виготовлення та експлуатації ПТ кабельного типу запропоновано застосувати методологію термодинаміки необоротних процесів для вивчення їх метрологічної й механічної надійностей.

2. Проаналізовано вплив термоциклювання на параметри надійності ПТ. Встановлено термодинамічні сили й потоки для ПТ, характерні для типових умов експлуатації, зокрема, зв'язані з механічним ступенем вільності.

3. Показано нерозривність конструктивно-технологічно-експлуатаційного підходу до аналізу проблем надійності ПТ. Запропоновано типові конструкції ПТ з удосконаленими параметрами метрологічної та механічної надійностей. Розроблено удосконалений метод діагностування ПТ на етапі їх виготовлення, внаслідок чого у 1,5 раза зменшено інтенсивність відмов, що дало змогу підвищити приблизно на 100 К максимальну температуру експлуатації ПТ (при незмінних показниках механічної надійності).

1. Новиков И.И., Стадник Б.И., Яцишин С.П. и др. О феноменологической модели нестабильности интегральной термо-ЭДС термопар // Известия АН СССР. Сер. Металлы. – 1990. – № 3. – С.211-214. 2. Стадник Б.И., Яцишин С.П. Электромеханохимичні шуми термометричних матеріалів // Термоелектрика. – 2003. – №1. – С. 56–64. 3. Гук О.І. Метрологічна надійність кабельних перетворювачів

температури // Вимірювальна техніка і метрологія. № 63, 2003. 4. РТМ 25446-81 Изделия приборостроения. Методика расчета показателей надежности. 5. Методика расчета показателей безотказности термопреобразователей сопротивления и преобразователей термоэлектрических. Л., 1987. 6. Ларионов Л.Н. Залечивание дефектов в металлах. К., 1980. 7. Яцишин С.П. Электрохимичні шуми в матеріалах чутливих елементів перетворювачів температури та зміни їх основних параметрів // Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2003. – № 475. – С. 82–88. 8. Домінюк Т.І., Яцишин С.П. До вивчення можливості термодинамічного врахування впливу механічних напружень і деформацій на термо-ЕРС // Вимірювальна техніка і метрологія. – 2002. – № 59. – С.66-69. 9. Булатов Н.К., Лундин А.Б. Термодинамика необратимых физико-химических процессов. М., 1984. 10. Колодій З.О., Луцик Я.Т., Стадник Б.І., Яцишин С.П. Різновидні флюктуації в твердих тілах та концепція їх поєданого вивчення // Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2002. – № 445. – С. 3–12. 11. Hanneman R.E., Strong H.M. Pressure dependence of EMF of the Thermocouples to 1300 C and 50 kBar // Journ. Of Appl. Phys. 1973. – v.6. – pp. 1052–1056. 12. Бужинский О.И., Самойлов С.В. Экспериментальное определение температуры на границе раздела медь-никель с помощью термо-ЭДС // Физика твердого тела. – 1969. – т.11. – № 10. – С. 2881–2886. 13. Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств. М., 1989. 14. Де Гроот С. Термодинамика необратимых процессов. – М., 1962.