

ЄМНІСНИЙ МЕТОД КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПЕНЕТРАНТІВ ПРИ КАПІЛЯРНІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ДЕТАЛЕЙ НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ

М.М. Чуйко, Л.А. Витвицька

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46077,
e-mail: zarichna@nimg.edu.ua

Здійснено поопераційний опис процесу проведення капілярного контролю й подано короткий аналіз якісних характеристик та параметрів пенетрантів. Запропоновано ємнісний метод комплексної оцінки якості пенетрантів за виведеною залежністю поверхневого натягу від зміни діелектричної проникності та математичною моделлю залежності ємності конденсатора від шорсткості змочуваної рідиною поверхні. Також розроблено схему приладу контролю та подано опис роботи його основних елементів. Наведено таблицю результатів вимірювань та побудовано графіки залежностей зміни імпедансу опору від часу для еталонної та досліджуваної рідин. Встановлено, що за кривизною графіка та розкидом точок можна оцінити ступінь змочування пенетрантом досліджуваної поверхні: чим краще розтікається рідина поверхню, тим пологіший графік. Метод дає можливість оцінити якість пенетранту по відношенню до стану досліджуваної поверхні твердого тіла.

Ключові слова: капілярний контроль, якість, змочуваність, пенетрант, шорсткість поверхні контролю, динамічна ємність конденсатора.

Осуществлено пооперационное описание процесса проведения капиллярного контроля и подан краткий анализ качественных характеристик и параметров пенетрантов. Предложен емкостной метод комплексной оценки качества пенетрантов по выведенной зависимости поверхностного натяжения от изменения диэлектрической проницаемости и математической модели зависимости емкости конденсатора от шероховатости смачиваемой жидкостью поверхности. Также представлена разработанная схема прибора контроля и описание работы его основных элементов. Приведена таблица результатов измерений и построены графики зависимостей изменения импеданса сопротивления от времени для эталонной и исследуемой жидкостей. Установлено, что по кривизне графика и разбросу точек можно оценивать степень смачивания пенетрантом исследуемой поверхности: чем лучше растекается жидкость по поверхности, тем более пологий график. Метод позволяет оценить качество пенетранта относительно состояния исследуемой поверхности твердого тела.

Ключевые слова: капиллярный контроль, качество, смачиваемость, пенетрант, шероховатость поверхности контроля, динамическая емкость конденсатора.

The description of capillary control stages and the short analysis of quality characteristics and parameters of penetrants are carried out in this paper. Here we've presented the capacity method of complex estimation of penetrant's quality, based on the surface tension dependence on the inductivity change and a mathematical model of the condenser capacity dependence on the wetting surface roughness. We have developed the chart of a control device and the description of its basic elements operation is also given here. The table of measurements results is presented and the graphic of the impedance resistance change dependences on time for standard and probed liquids is drawn in this article. It is proved that according to the curvature of the graph and the variation of points it is possible to estimate the degree of the probed surface penetrant's moistening. The better liquid spreads across surface, the gentler the graph is. The method enables to estimate the penetrant's quality in relation to the state of the solid probed surface.

Keywords: capillary control, quality, wetting, penetrant, control surface roughness, condenser dynamic capacity.

Основним напрямком використання капілярної дефектоскопії є пошук поверхневих дефектів (тріщин, непроварів). Капілярний контроль забезпечує виявлення саме мікродефектів, які неможливо виявити ні візуально, ні іншими методами неруйнівного контролю. Широкого застосування капілярна дефектоскопія набула у важкій промисловості, для контролю поверхневих дефектів різних деталей – у енергетичній та нафтогазовій промисловості, у приладобудуванні, машинобудуванні, авіа- та кораблебудуванні. Тому проблема підвищення якості обладнання значною мірою вирішується підвищенням якості капілярного контролю, що свідчить про актуальність даної проблеми.

Як вказано в [1], капілярний контроль є багатоопераційним процесом, що вимагає дотри-

мання певних умов та послідовності операцій у ході проведення: забезпечення чистоти поверхні об'єкта контролю (ОК), нанесення індикаторної рідини (пенетранту) з повним її розтіканням досліджуваною поверхню і проникненням у дефекти, видалення пенетранту з поверхні та усунення кольору або люмінесценції, нанесення на поверхню проявника та інтерпретація індикованих рисунків. Причому на виконання кожної операції відводиться певний обмежений час. Недотримання умов, послідовності або тривалості операцій призводить до отримання хибних результатів контролю.

Однак, поява хибних результатів, тобто зниження достовірності і чутливості контролю, як сказано в [2], значною мірою залежить від якості пенетрантів, тобто його властивостей,

що визначають здатність до змочування поверхні, інтенсивного проникнення в дефект, інтенсивного сорбування або дифундування в проявник, створення контрастного сліду на фоні проявника, а також безпечності використання. Всі ці властивості визначаються такими параметрами: крайовим кутом змочування, в'язкістю, густиною, коефіцієнтом екстинції, температурою спалаху. Визначення цих параметрів здійснюється різними засобами [3], що вимагає тривалого часу і не забезпечує високої точності та ідентичності умов їх вимірювання.

Проте у згаданих вище літературних джерелах не вказано, що у випадку взаємодії пенетранта з ОК необхідно враховувати характеристики не тільки пенетранта, але й самого твердого тіла: його шорсткості, наявності домішок у матеріалі, з якого воно виготовлене, а також характеру взаємодії системи «тверде тіло – рідина». Тому для забезпечення вибору пенетранта з оптимальними характеристиками виникає необхідність комплексної оцінки параметрів якості пенетрантів та поверхневих властивостей твердих тіл, на які вони наносяться.

Сформульоване завдання пропонується вирішити шляхом застосування ємнісного методу, що базується на використанні залежності зміни ємності конденсатора внаслідок зміни загальної діелектричної проникності середовища між обкладками конденсатора, яка змінюється в процесі змочування пенетрантом досліджуваної твердої поверхні. Швидкість розтікання пенетранта, яка залежить від стану твердої поверхні, густини та в'язкості пенетранта, крайового кута змочування, визначає швидкість зміни ємності конденсатора. Саме за цим параметром і можна проводити комплексну оцінку якості пенетрантів.

Домінуючою характеристикою пенетрантів є їх змочувальна здатність по відношенню до матеріалу об'єкта контролю. Кількісно вона визначається крайовим кутом змочування θ , який, у свою чергу, залежить від поверхневих натягів контактуючих фаз згідно з рівнянням Юнга [4]:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{m2} - \sigma_{mp}}{\sigma_{p2}}, \quad (1)$$

де σ_{m2} , σ_{mp} , σ_{p2} – поверхневі натяги відповідно на межі розділу фаз «тверде тіло – газ», «тверде тіло – рідина» та «рідина-газ» (Н/м).

Попри значну кількість методів для вимірювання σ_{p2} , на даний час не існує достатньо точних методів для вимірювання інших двох поверхневих натягів на границях розділу твердого тіла з рідиною та газом. На основі залежності Клаузіуса-Мосотті [5], яка пов'язує поляризованість молекул твердого тіла та його поверхневу енергію, встановлено залежність між поверхневим натягом твердого тіла та його діелектричними властивостями:

$$\sigma_{m2} = \frac{27N^4 h^2 e^2 s Z M^3 \epsilon_0^3 (\epsilon - 1)^3}{64^2 \sigma_{p2} m r^4 \rho^3 N_A^3 (\epsilon + 2)^3}, \quad (2)$$

де: N – концентрація молекул; h – стала Планка (Дж·с); e – заряд електрона (Кл), m – маса електрона (кг), s – валентність, Z – кількість вільних електронів, α – поляризованість, r – міжмолекулярна відстань (м), ϵ – діелектрична проникність, M – молярна маса речовини (кг/моль), ρ – густина речовини (кг/м³), N_A – число Авогадро (моль⁻¹), ϵ_0 – абсолютна діелектрична проникність (Ф/м).

У випадку повного розтікання рідини поверхнею твердого тіла через різницю електричних потенціалів їх поверхонь систему «тверде тіло – рідина (пенетрант)» можна розглядати як паралельно-пластинчастий конденсатор, одна пластина якого – гладка поверхня рідини, а інша – шорстка поверхня твердого тіла. Відстань між пластинами d – це товщина шару рідини з діелектричною проникністю ϵ . Схематично переріз даного конденсатора представлений на рис. 1, де осі координат X , Z розташовано в площині рисунку, а вісь Y – перпендикулярна до неї. Представимо висоту нерівностей поверхні твердого тіла (електродну поверхню) функцією координат площини $z=f(x,y)$. Через наявність поверхневого заряду на твердому тілі потенціал шорсткого електрода є вищим від потенціалу гладкого електрода, тому на рисунку вісь Z збігається із напрямком зростання потенціалу.

Розподіл електростатичної напруги між обкладками конденсатора описується рівнянням Лапласа другого порядку, що є функцією просторових координат x, y, z системи [6]:

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z) = 0, \quad (3)$$

де: ∇ - оператор Лапласа, Φ - функція розподілу потенціалу по просторових координатах.

Граничними умовами для розв'язання даного рівняння є нульовий потенціал поверхні рідини і потенціал на поверхні твердого тіла рівний U . Математично дані граничні умови записуються:

$$\Phi(x, y, z = 0) = 0, \quad (4)$$

$$\Phi(x, y, z = f(x, y)) = U. \quad (5)$$

Координати точок поверхні нерівного електрода, які описують западини і виступи, аналітично можуть бути представлені як приріст товщини d вздовж координати z , тобто визначаються як $f(x, y) = d + \Delta d / \Delta z$, що дає підставу розкласти в ряд Тейлора рівняння (3) в околі точки $z = d$. Дане рівняння доцільно перетворити за допомогою оператора Фур'є, що дасть змогу врахувати найбільш часто повторювані частоти зміни нерівностей поверхні. Пряме і зворотне перетворення Фур'є для n -ої складової ряду Тейлора здійснюється, відповідно, за залежностями:

$$\Phi^{(n)}(r, z) = \int \tilde{\Phi}^{(n)}(\omega, z) e^{-i\omega r} d\omega, \quad (6)$$

$$\tilde{\Phi}^{(n)}(\omega, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \Phi^{(n)}(r, z) e^{i\omega r} dr, \quad (7)$$

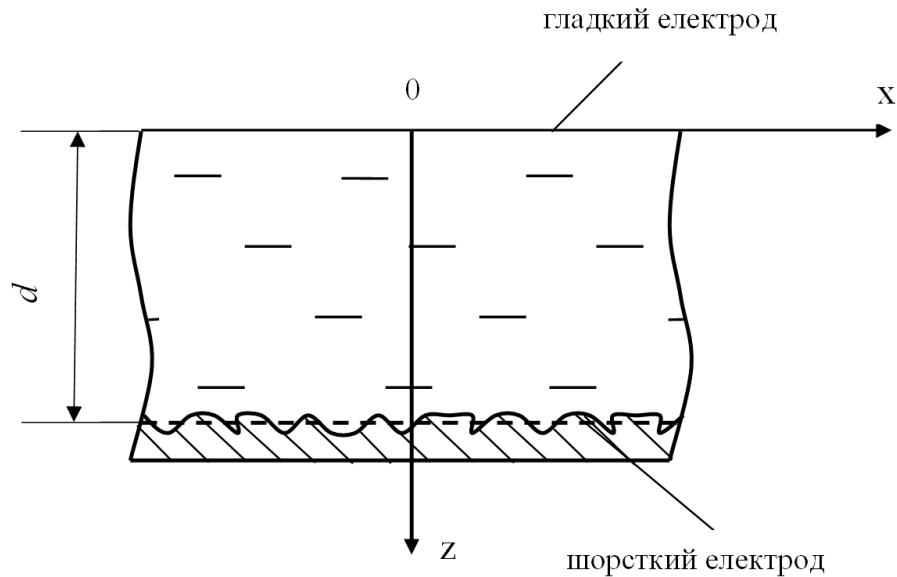


Рисунок 1 – Ємнісна система «тверде тіло - шар рідини»

де $r=(x,y)$ представляє позицію вектора в X-Y площині, ω - аргумент функції Фур'є.

Загальний розв'язок перетвореного рівняння Лапласа (3) отримуємо у вигляді:

$$\tilde{\Phi}^{(n)}(\omega, z) = A^{(n)}(\omega)e^{\omega z} + B^{(n)}(\omega)e^{-\omega z}, \quad (8)$$

де $A^{(n)}(\omega)$, $B^{(n)}(\omega)$ - коефіцієнти дійсної і уявної частини n -ої складової розв'язку рівнянь.

Кількість складових рівняння (8) збільшується зі зростанням нерівності поверхні, тому ефект нерівності збільшує ефективну напругу між двома електродами, тобто між двома поверхнями. Тож середнє значення електричного поля збільшується, що призводить до зростання ємності між поверхнями рідини і твердого тіла.

Зокрема при розтіканні краплі рідини поверхнею твердого тіла товщиною t з утворенням граничного контура розтікання довільної форми ємність, утвореного двома поверхнями конденсатора, визначається за такою залежністю:

$$C = \left(1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}\right) \frac{C_0}{2} \left[1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \frac{C_0}{4\pi\epsilon_1 t} \ln(1 - k^2)\right]^{-1}, \quad (9)$$

де: $k = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}$, ϵ_1, ϵ_2 - відповідно діелектри-

чна проникність рідини і твердого тіла, C_0 - ємність шару рідини без врахування впливу твердої нерівної поверхні, якою вона розтікається, тобто при однорідному за діелектричною проникністю середовищі розтікання (Φ), t - товщина діелектрика (м).

В даному методі між обкладками конденсатора поміщають зразок матеріалу ОК з досліджуваною поверхнею. Крізь отвір у верхній обкладці конденсатора на досліджуване тіло за допомогою шприца дозовано наносять певний об'єм еталонної рідини (наприклад, дистильованої води) для отримання порівняльної кривої

зміни ємності в часі. Після видалення еталонної рідини досліджувану поверхню просушують, після чого наносять на неї досліджуваний пенетрант. За результатами дослідів будують криву зміни в часі ємності конденсатора з досліджуваним пенетрантом. На основі порівняння кривизни та розкиду значень ємності визначається комплексний параметр для оцінки якості пенетранта та стану поверхні твердого тіла.

Даний метод контролю можна використувати як для «гладких», так і для пористих твердих тіл. В першому випадку ємність змінюватиметься внаслідок зміни форми краплі рідини, що відбуватиметься за рахунок її ступеня змочуваності і розтікання поверхнею, а в іншому – внаслідок інтенсивності проникнення в товщину тіла, на яку впливатиме, окрім попередньо зазначених величин, і пористість даного досліджуваного зразка. За даним методом можна досліджувати як діелектричні тверді тіла, так і провідники. В останньому випадку роль нижньої обкладки відіграватиме поверхня досліджуваного зразка.

Вказаний спосіб реалізований за допомогою пристрою, блок-схема якого зображена на рис. 2. Вимірювальний блок 1 - це конденсатор, між обкладками якого розміщене тверде досліджуване тіло. У верхній обкладці конденсатора виконано отвір, крізь який за допомогою шприца (дозатора) наносять фіксований об'єм рідини. Дозування крапель здійснюється передавальним механізмом 2, що приводиться в рух кроковим двигуном 3, роботою якого керує ЕОМ 6. Дискретне переміщення поршня дозатора задається блоком управління двигуном 4, що зв'язаний з ЕОМ 6 через цифро-аналоговий перетворювач 5. Одночасно із подаванням рідини на поверхню твердого тіла проводиться вимірювання ємності конденсатора через імпеданс опору у вимірювальному перетворювачі 7, звідки сигнал передається на ЕОМ 6.

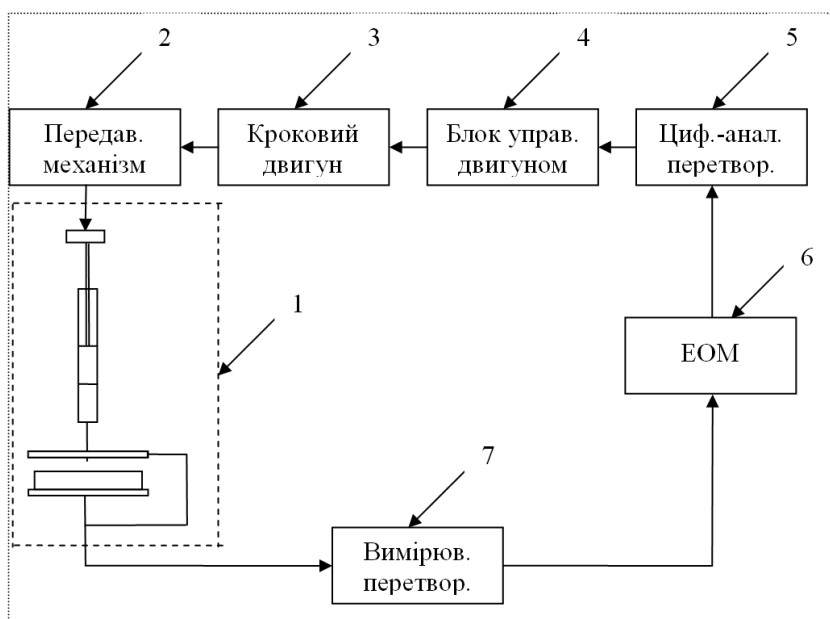


Рисунок 2 – Блок-схема пристрою для контролю змочуваності рідиною поверхні твердого тіла

Таблиця 1 – Результати вимірювання динаміки зміни ємнісного опору для досліджуваної і еталонної рідин

| Час, мс | Імпеданс опору (досл.) | Імпеданс опору (етал.) | Час, мс | Імпеданс опору (досл.) | Імпеданс опору (етал.) |
|---------|------------------------|------------------------|---------|------------------------|------------------------|
| 0 | 11117337,49 | 10667166,75 | 260 | 10509361,83 | 10526779,4 |
| 10 | 10807794,19 | 11362726,25 | 270 | 10661686,04 | 10606497 |
| 20 | 7829336,39 | 11248258,49 | 280 | 10624995,62 | 10705509,92 |
| 30 | 11285217,26 | 11737656,13 | 290 | 10837779,22 | 10486082,36 |
| 40 | 11184988,56 | 11186174,33 | 300 | 10797913,61 | 10722878,01 |
| 50 | 11472862,9 | 10621271,23 | 310 | 11001868,5 | 11100977,85 |
| 60 | 11389962,82 | 11783480,73 | 320 | 11021478,01 | 10703431,42 |
| 70 | 10819221,75 | 11192603,82 | 330 | 11076333,37 | 10811718,33 |
| 80 | 10641889,06 | 11013829,16 | 340 | 11279741,41 | 10907473,94 |
| 90 | 10996231,34 | 11694055,34 | 350 | 10751808,86 | 11231414,97 |
| 100 | 10746284,34 | 11758262,59 | 360 | 10913801,6 | 10362678,04 |
| 110 | 10857336,08 | 11962011,48 | 370 | 10579639,97 | 10726361,79 |
| 120 | 11469345,89 | 10863848,42 | 380 | 10881272,12 | 10655957,47 |
| 130 | 11561526,05 | 12093459,35 | 390 | 10583822,94 | 10525132,54 |
| 140 | 12567377,72 | 11121025,96 | 400 | 10567787,34 | 10633729,41 |
| 150 | 10550331,59 | 10633220,05 | 410 | 11195575,02 | 10542628,77 |
| 160 | 10907199,07 | 11125009,75 | 420 | 10725316,3 | 10820563,29 |
| 170 | 10657666,52 | 10840026,93 | 430 | 10413332,24 | 10759979,69 |
| 180 | 10832839,18 | 11231414,97 | 440 | 10609109,66 | 10692711,73 |
| 190 | 10296994,27 | 11496821,77 | 450 | 10811004,53 | 10243378,67 |
| 200 | 11075949,6 | 11260436,89 | 460 | 10633220,05 | 10364878,72 |
| 210 | 10870281,8 | 10714878,2 | 470 | 10777614,68 | 10538329,17 |
| 220 | 10617297,23 | 11207185,35 | 480 | 10802895,02 | 10483315,48 |
| 230 | 10550331,59 | 10986480,74 | 490 | 11040432,53 | 10879816,94 |
| 240 | 10333884,51 | 11093258,79 | 500 | 10531312,28 | 10759979,69 |
| 250 | 10435648 | 10898048,73 | 510 | 10388308,27 | 10547679,25 |

До таблиці 1 зведено результати вимірювань динаміки зміни імпедансу опору для двох рідин: пенетранту на основі «Жириноксу» і дистильованої води. Вимірювання проводилося відносно калібрувальної ємності 15 пФ.

За вимірними даними побудовано згадані часові залежності для цих рідин (рис. 3). З отриманих графіків випливає, що крива зміни імпедансу опору еталонної рідини має істотно більшу крутизну, але менший розкид, а крива

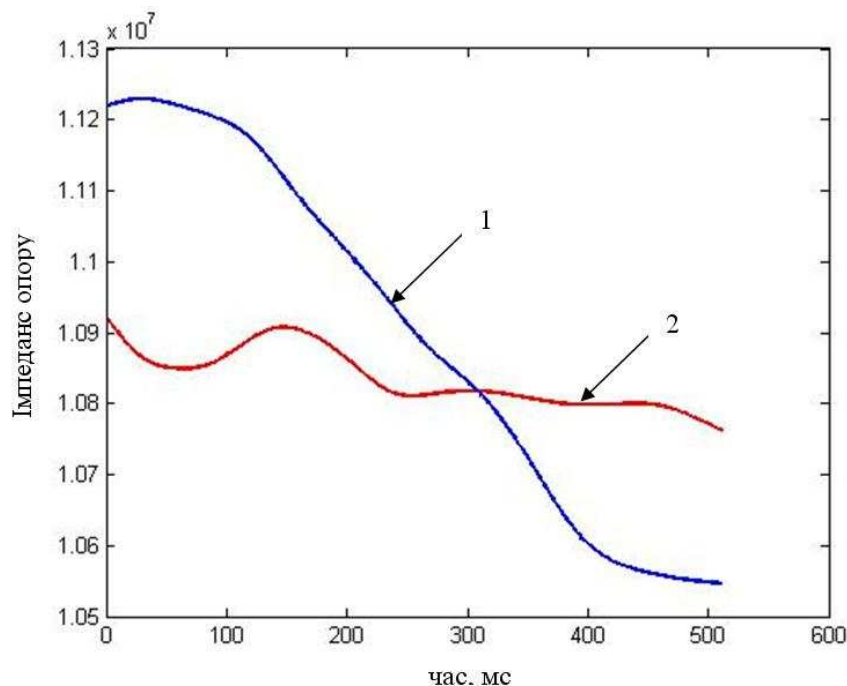


Рисунок 3 – Часові залежності зміни ємнісного опору конденсатора для еталонної (1) та для досліджуваної (2) рідин

зміни імпедансу опору пенетранту є пологішою, з більшою дисперсією навколо середніх значень. Отже, зменшення кута нахилу та збільшення ширини розкиду вимірних величин свідчить про покращені змочувальні властивості рідини, менший її поверхневий натяг, а, значить, і інтенсивнішу взаємодію між рідиною і твердим тілом.

Однією з переваг даного методу є те, що за результатами одного вимірювання можна судити про комплексну оцінку даного розчину, що зекономить час, та матеріальні ресурси. Відсутня необхідність у встановленні конкретних числових значень кожної окремої характеристики, а за характером зміни графіка можна аналізувати як властивості пенетранту, так і його взаємодію з ОК, оскільки одночасно досліджуються обидва середовища в їх безпосередньому контакті, а не кожне зокрема. На основі порівняння двох кривих - еталонної і досліджуваної - робиться висновок про фізико-хімічні параметри пенетранту та стан поверхні твердого тіла в комплексі.

В наступних дослідженнях планується розширити набір вітчизняних та зарубіжних пенетрантів для проведення досліджень на різних провідних та діелектричних поверхнях. Це уможливить встановлення кількісного значення комплексного показника і діапазону його зміни для різних матеріалів, що забезпечить проведення експертної експрес-оцінки достовірності та чутливості контролю.

Література

- 1 Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник; под ред. Г.С. Самойловича. – М. : Машиностроение, 1976. – 456 с.
- 2 Неразрушающий контроль и диагностика: справочник; под ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1995. – 705 с.
- 3 Білокур І.П. Основи дефектоскопії: підручник / І.П. Білокур. – К.: Азимут-Україна, 2004. – 496 с.
- 4 Русанов А.И. Межфазная тензометрия / А.И. Русанов, В.А. Прохоров. – С.-Петербург: Химия, 1984. – 397 с.
- 5 Curtis F. Holmes. On the relation between Surface tension and Dielectric Constant / F. Curtis // Amer. Soc., 1973. – 1014 p.
- 6 Расчет электрической емкости: 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.Я. Иоссель и др. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981. – 288 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
09.02.11
Рекомендована до друку професором
І.С. Кісілем*