

Валентин УЧАНІН, Олексій АЛЕЩЕНКО, Володимир ЧЕРВАТЮК

ВИСОКОВОЛЬТНИЙ ЕЛЕКТРОІСКРОВИЙ КОНТРОЛЬ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИВІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна. E-mail: vuchanin@gmail.com*

Valentyn UCHANIN, Oleksii ALESHCHENKO, Volodymyr CHERVATYUK

HIGH-VOLTAGE SPARK INSPECTION OF NONCONDUCTIVE ANTICORROSIVE COATINGS ON METALLIC SUBSTRATE

*Karpenko Physico-mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
5, Naukova St., Lviv, 79060, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com*

ABSTRACT

The inspection of anticorrosive coating integrity is an important part of the maintenance of the metallic structures exploited in the corrosive environment. The applications of the high-voltage spark inspection techniques for monitoring of nonconductive coating quality are regulated by some foreign and national documents. The main interest to high-voltage inspection technique is related to the possibility to detect the discontinuities (holiday) in the coating possible to deteriorate the anticorrosive properties, such as porosity, cavity, pinhole, inclusion or crack. The inspected coating must be deposited on the surface of a conductive substrate (metals or concrete with sufficient moisture content to be conductive). There are two types of high-voltage inspection techniques related to the continuous or pulsed types of test voltage. The energy in the pulsed systems is contained within the short-time pulses. In this case, the test voltage can be maintained on slightly conductive coatings and only significant release of energy through a defect is monitored. Modernized PULSAR type holiday detector can detect 0.3 mm diameter pinhole type defects in 9.5 mm thick dielectric coatings. The maximal speed of the test electrode scanning – 0.35 m/sec. PULSAR type holiday detectors have a relatively low size and weight due to the high-voltage transformer design. PULSAR type holiday detector was successfully applied in many enterprises. The intention to develop a new holiday detector based on the corona discharge phenomena application is proposed. Methodological aspects are discussed. To improve the inspection reliability the optimal test voltage must be adjusted in accordance with the electric strength of inspected material.

KEY WORDS: *protective coating, high-voltage, spark, inspection, holiday detector, corona discharge*

ВСТУП

З метою захисту металевих конструкцій від корозії їх поверхню покривають різними діелектричними захисними покриттями (ЗП), які запобігають контакту металу з корозійним середовищем. Крім традиційних нафто-бітумних і лакофарбових покриттів для захисту від корозії усе частіше використовують ефективніші покриття на основі епоксидних і поліуретанових синтетичних смол, стабілізованого поліетилену, різні стрічкові матеріали холодного нанесення [1, 2]. Оцінювання якості ЗП полягає у виявленні дефектів засобами неруйнівного контролю, проблема вдосконалення яких є актуальною.

Дефекти (несуцільності) матеріалу ЗП суттєво зменшують їх захисні властивості. До технологічних дефектів відносять тріщини, пори, чужорідні вclusions (у тому числі метали), порожнини, кратери, неприпустимі стоншення покриття, непрофарбування (може мати місце за високої шорсткості поверхні металу) тощо. До дефектів експлуатаційного походження, зазвичай, відносять тріщини, сколювання, потоншення покриття за рахунок можливого зношування та механічні пошкодження. Тим більше, що довготривалий вплив експлуатаційних чинників (температура, сонячне випромінювання тощо) можуть призводити до деградації

захисних і механічних властивостей матеріалу. Основні типи дефектів ЗП різного походження схематично зображено на рис. 1.

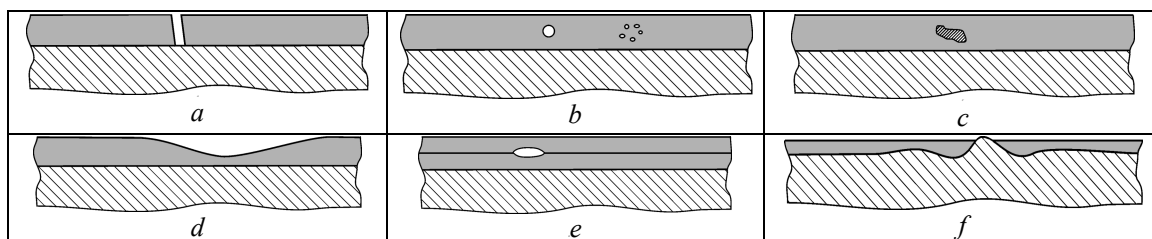


Рис. 1. Основні види дефектів ЗП: *a* – наскрізні дефекти (тріщини, кратери); *b* – пори або скупчення пор; *c* – металеві включення; *d* – стоншення; *e* – розшарування; *f* – непрофарбування.
 Fig. 1. Main types of defects in protective coating: *a* – through type (cracks, craters); *b* – pores or gathering of pores; *c* – metal inclusions; *d* – thinning; *e* – delamination; *f* – lack of coating.

Контроль суцільності ЗП передбачений низкою стандартів [3-6]. Ці документи передбачають використання двох методів: 1) електролітичний метод за допомогою мокрого електрода (пористої губки, просоченої електролітом) і 2) електроіскровий метод за допомогою високих напруг. За товщини захисних діелектричних покриттів більше 500 мкм рекомендовано використовувати електроіскровий метод [3-8], за якого до поверхні ЗП покриву прикладають за допомогою тестового електрода високу напругу, а металева основа конструкції заземлюється. За наявності дефектних ділянок формується електричний розряд (іскровий пробій). Струм, що виникає під час іскрового пробію, реєструється приладом (електроіскровим дефектоскопом). Метод дозволяє з високою продуктивністю і достовірністю виявляти практично усі подані вище (рис. 1) види дефектів. Сьогодні електроіскровий метод широко використовують перш за все у нафтогазовій і хімічній галузях, комунальному господарстві. У авіаційному КБ морської авіації ім. Г.М. Берієва (м. Таганрог) електроіскровий метод використовували для кількісного оцінювання якості ЗП за значеннями пробійної напруги під час їх випробувань [9].

Відома низка електроіскрових дефектоскопів (ЕД), які відповідають вимогам стандартів (Таблиця 1). ЕД різняться за видом прикладеної напруги, яка може бути постійною або імпульсною. Перевагою ЕД з постійною напругою є незалежність чутливості від швидкості пересування електрода. Ці ЕД вимагають підвищених заходів безпеки і більших витрат енергії. У більшості сучасних ЕД використовують імпульси високої напруги однієї полярності тривалістю 10–20 мкс з частотою слідування 20–60 Hz. Зауважимо, на відмінність ЕД типу Корона-1, який дає можливість проводити контроль за частоти 600 Hz [7]. Такий режим передбачає використання високих напруг до 2 kV, що звужує можливості контролю покриттів великої товщини. Перевагою імпульсних ЕД є менше споживання енергії, що збільшує автономність їх роботи. Крім того, це зменшує ефект старіння матеріалу покриття через зменшення часу прикладення високої напруги.

Таблиця 1. Технічні характеристики сучасних ЕД.
 Table 1. Technical characteristics of modern electric spark holiday detectors.

Назва ЕД	Виробник, країна	Вид напруги	Діапазон напруг, kV	Частота імпульсів, Hz
Elcometer 266	Elcometer, Англія	Постійна	0,5–30	–
Elcometer-280	Elcometer, Англія	Імпульсна	0,5–35	30
Inspect 8.0	Isotest, Німеччина	Імпульсна	0,5–8	50
Корона-1	Константа, РФ	Імпульсна	0,7–4	600 (0,7–2 kV) 50 (2–4 kV)

Проаналізуємо фізичні процеси дотичні електроіскрового методу [10, 11]. Залежно від властивостей середовища, типу і розташування електродів та прикладеної напруги можуть виникати різні види самостійного розряду: тліючий, дуговий, іскровий і коронний. Тліючий розряд спостерігається в газах за низького тиску (менше декількох десятків міліметрів ртутного стовпа). Дуговий розряд є однією з форм газового розряду, що здійснюється за великої густини

струму і невеликої напруги між електродами (усього декілька десятків вольт). Дуговий розряд формується розігрітим катодом шляхом інтенсивної емісії термоелектронів, які прискорюються електричним полем, що створює умови для ударної іонізації молекул газу. Явища тліючого і дугового розряду для дефектоскопії захисних покривів не використовують.

Коронний розряд виникає за нормального тиску в газі, що знаходиться в сильно неоднорідному електричному полі. За коронного розряду іонізація і свічення газу відбуваються лише поблизу електродів. Коронувати може катод (негативна корона), коли електрони, що викликають ударну іонізацію молекул газу, зароджуються на катоді під час бомбардування його позитивними іонами. Під час коронування аноду (позитивна корона) електрони утворюються шляхом іонізації газу поблизу анода. Ефект коронного розряду має перспективи для індикації дефектів захисних покривів, що буде розглянуто далі. Зі збільшенням напруги між електродами коронний розряд переходить в іскровий.

Іскровий розряд має вид яскравих розгалужених каналів, які заповнюють розрядний проміжок. Канали іскрового розряду починають рости від катоду або аноду. Але можливе формування іскрових каналів від будь-якої точки між електродами, так як іонізація ударом відбувається не в усьому об'ємі газу, а окремими каналами, що проходять в тих місцях, в яких концентрація іонів найбільша. Через електронну і йонну лавини в іскрових каналах розряд супроводжується свіченням газу, потрійкуванням і виділенням тепла.

Електричним пробоем діелектричного матеріалу називається формування каналу провідності (іскри) за деякого значення напруженості електричного поля. Його наслідком є струм короткого замикання I_{SC} , який не залежить від типу діелектрика і визначається тільки потужністю джерела напруги і опором зовнішнього кола. Струм короткого замикання призводить до механічного і теплового руйнування твердого діелектрика з утворенням наскрізного проплавленого отвору. Для правильного застосування електроіскрового методу важливо знати електричну міцність, яка є однією із основних характеристик ізоляторів [11, 12]. За деякого значення напруги цілісність діелектрику порушується, через нього проскакує іскра і настає його пробій. Найменше значення прикладеної напруги, що призводить до пробію, називають пробійною напругою U_d . Відповідно електричну міцність E визначають найменшим значенням напруженості електричного поля, що викликає пробій. Для однорідного електричного поля використовують вираз $E = U_d/t$, де t – товщина шару діелектрика у місці пробію. Електрична міцність залежить від однорідності, хімічного складу і будови матеріалу, частоти и часу прикладення напруги, тиску, вологості тощо. По теперішній час не існує теорії, яка би враховувала вплив усіх факторів для визначення електричної міцності (і, відповідно, пробивної напруги) будь-якого діелектрика [13]. Можна виділити теоретичну роботу, в якій зроблено спробу врахувати наявність пор в поліетилені. Явище електричної міцності у ній розглянуто на основі теорії вільного об'єму, згідно якої пробій ініціюється вільними електронами, що прискорюються електричним полем в найбільших порожнинах, які присутні в усіх полімерах. Пробій трактується як фінальна стадія непропорційного зростання струму, яке має місце, коли енергія вільних електронів під час прискорення на вільному шляху (в порах) досягає граничної енергії. Показано залежність електричної міцності від розподілу пор у поліетилені за розмірами. На практиці електрична міцність діелектричних матеріалів визначається експериментально (див. таблицю 2).

Таблиця 2. Електрична міцність E для різних діелектриків і захисних покривів.
Table 1. Electric strength of different dielectrics and protective coatings.

Матеріал	E , kV/mm	Матеріал	E , kV/mm
Дерево сухе	4	Поліетилен	40
Плексиглас	18	Фторопласт-4	25
Полістирол	30	Пентапласт А-2	35-40

Електрична міцність ізоляційних матеріалів E лежить у широкому діапазоні від 2 kV/mm для сухого повітря до 100 kV/mm для слюди. Для вологого повітря електрична міцність є набагато меншою і може складати 0,1 kV/mm. З таблиці 2 видно, що електрична міцність E більшості діелектриків суттєво більша за електричну міцність повітря, що забезпечує високу достовірність електроіскрового методу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Останні десятиріччя для дефектоскопії ЗП використовується ЕД типу ПУЛЬСАР-2І, під час розробки якого враховано окремі недоліки відомих ЕД (табл. 1) [8-10]. За цей час ЕД типу ПУЛЬСАР-2І постійно вдосконалювались, що дозволяє віднести цей прилад до найкращих у світі. Принцип роботи дефектоскопу оснований на застосуванні імпульсної напруги. Узагальнена функціональна схема ЕД типу «ПУЛЬСАР-2І» представлена на рис. 2.

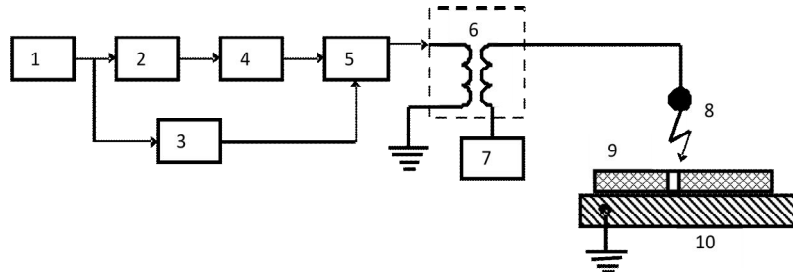


Рис. 2. Узагальнена схема ЕД типу ПУЛЬСАР-2І.
Fig. 2. Generalized scheme of PULSAR-2I electric spark holiday detectors.

Електроіскровий дефектоскоп типу ПУЛЬСАР-2І складається з генератора 1, перетворювача проміжної напруги 2, пристрою синхронізації керування тиристорно-діодним ключем 3, ємнісного накопичувача заряду 4, тиристорно-діодного ключа 5, виносного високовольтного трансформатора 6, блоку індикації 7 та високовольтного тестового електроду 8. На рис. 2 умовно показано також пошкодження ЗП 9, який нанесено на металеву основу 10. На рис. 3 *a* подано зовнішній вигляд дефектоскопу типу ПУЛЬСАР-2І з винесеним високовольтним трансформатором і тестовим електродом.

Досліджували вплив форми імпульсу високої напруги на функціональні можливості ЕД. Порівнювали достовірність виявлення дефектів покривів за різної швидкості переміщення тестового електроду за умови використання імпульсів різної форми. Досліджували уніполярний аперіодичний і уніполярний коливний (рис. 3 *b*) і біполярний коливний (рис. 3 *c*) види високої напруги. Найефективнішим виявився біполярний коливний імпульс (рис. 3 *c*), який характеризується короткою від'ємною частиною з великим градієнтом наростання напруги і суттєво тривалішим позитивним імпульсом високої напруги, під час якого формується іскра.

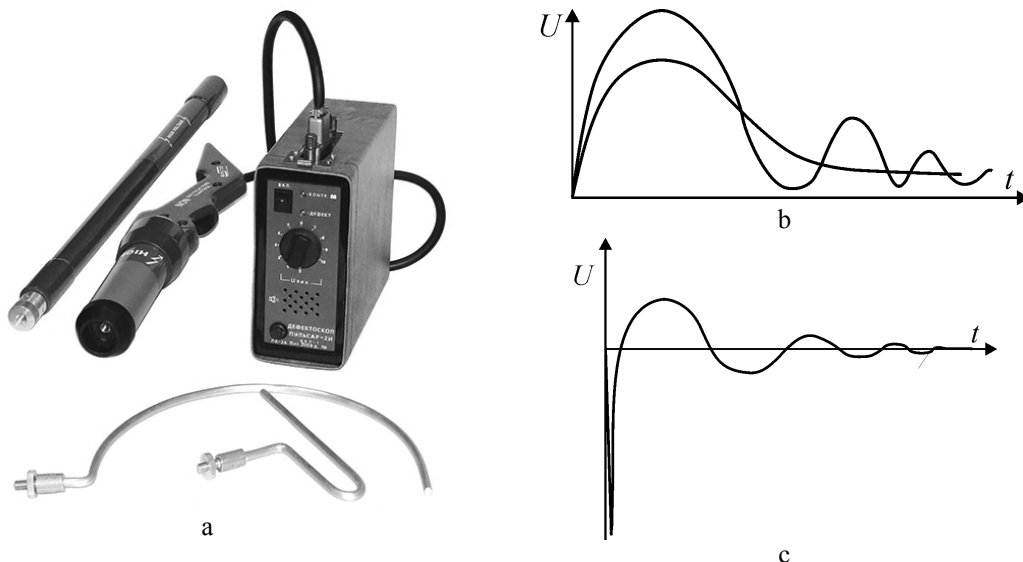


Рис. 3. Зображення ЕД типу ПУЛЬСАР-2І (*a*) та форми високовольтних тестових імпульсів: уніполярні аперіодичний і уніполярний коливний (*b*) та біполярний коливний (*c*).

Fig 3. Image of the PULSAR-2I type electric spark holiday detector (*a*) and high-voltage testing signal waveforms: unipolar aperiodic and unipolar oscillating (*b*); bipolar oscillating (*c*).

Технічні характеристики ЕД типу ПУЛЬСАР-2І забезпечують контроль за допомогою напруги позитивної полярності частотою 30 Hz і значеннями амплітуди імпульсу за еквівалентного навантаження опором $(3,5 \pm 0,2)$ МОм і ємністю (30 ± 3) пФ від 1,5 до 36 kV. Основна відносна похибка установки високовольтної напруги - не більше $\pm 15\%$. ЕД забезпечує виявлення наскрізних дефектів діаметром не менше 0,1 mm в ізоляційних покриттях товщиною до 12 mm за швидкості переміщення тестового електрода не більше 0,25 m/s. Роздільна здатність (відстань між двома дефектами, що фіксуються окремо) не 12...15 mm залежно від конструкції тестового електрода. ЕД забезпечує світлову і звукову індикації дефектів (електричного іскрового пробою). Живлення ЕД здійснюється автономно від герметичної батареї з номінальною напругою 12 V, ємністю 7А/h і ресурсом більше 1000 циклів «заряд-розряд». Час безперервної роботи від зарядженої батареї не менше 5 годин. Маса вузлів: високовольтного трансформатора не більше 0,8 kg; блоку контролю не більше 3,7 kg.

Принциповою відмінністю ЕД типу ПУЛЬСАР-2І є високі технічні характеристики високовольтного трансформатора, що дозволяє розширити функціональні можливості ЕД щодо використовуваних тестових електродів, підвищити високовольтну напругу без збільшення потужності споживання. Це дозволяє значно знизити габарити і вагу приладу порівняно з аналогами, що особливо важливо для роботи у польових умовах. Подача тестової напруги здійснюється кнопкою замиканням низьковольтного первинного кола трансформатора, яка розташована на рукоятці оператора (рис. 3 а). Дефектоскопи типу ПУЛЬСАР-2І забезпечуються електродами різного типу: щітковими, прямими (для вибіркового контролю), кільцевими пружинними для контролю зовнішньої або внутрішньої поверхні труб тощо. Калібрування та повірка ЕД типу ПУЛЬСАР-2І проводиться державними центрами стандартизації, метрології та сертифікації. Сьогодні ЕД типу ПУЛЬСАР-2І найчастіше використовують на підприємствах нафтогазової галузі (зокрема на підприємствах ДК «Укртрансгаз» та ПАТ «Укртранснафта»), в комунальному господарстві (ПАТ «Львівгаз», ПАТ «Дніпрогаз», ПАТ «Київоблгаз») тощо.

ЕД типу ПУЛЬСАР-2І використовуються в лабораторії сертифікаційних випробувань протикорозійних ізоляційних покриттів ФМІ НАН України згідно з [6]. Тут мають місце два основних напрямки їх використання. Перший передбачає безпосередню сертифікацію захисних покриттів на їх цілісність. Інший напрямок стосується оцінювання цілісності покриттів електроіскровим методом після їх випробування на ударну міцність.

Проведений нами аналіз сучасного стану електроіскрової дефектоскопії ЗП дозволяє сформулювати наступні задачі щодо вдосконалення відповідних технологій.

Найперспективнішим напрямком вважаємо розробку методів контролю цілісності захисних покриттів на основі ефекту коронного розряду. Це зменшить пошкодження покриття, так як струм короткого замикання під час пробою може призводити до механічного і теплового руйнування матеріалу покриття з утворенням проплавленого отвору. Роботи в цьому напрямку вже ведуться. В роботі [13] показано можливість виявлення дефектів діелектричних покриттів розміром більше 10 мкм шляхом вимірювання струму коронного розряду і його візуальної реєстрації. Для обмеження струму короткого замикання до значень, які не викликають пошкодження (пробою) ЗП використано нелінійний елемент (кенотрон). Загалом, експериментальна установка містить регульоване джерело постійної напруги (0...30 kV), нелінійний елемент для обмеження струму, реєстратор струму корони, засоби візуальної реєстрації оптичних ефектів коронного розряду. В роботі показано принципову можливість дефектоскопії діелектричних ЗП на основі коронного розряду, за якого електричний пробій (і відповідне руйнування діелектрика) відсутні. До недоліків представленої установки можна віднести вибір кенотрону в якості нелінійного елемента. Нами напрацьовані пропозиції по створенню керованих нелінійних елементів на сучасній елементній базі, які можна використати для побудови дефектоскопів ЗП на основі коронного розряду.

Існує нагальна і обґрунтована потреба у вдосконаленні методології електроіскрового контролю. Під час електроіскрової дефектоскопії найчастіше використовується спрощений підхід щодо вибору тестової напруги. Для цього попередньо вихрострумівим або магнітним методом визначають товщину ЗП. Високу напругу на електроді (у kV) встановлюють помноживши отримане значення товщини у міліметрах на п'ять. Тобто, тестову напругу вибирають залежно тільки від товщини ЗП без врахування типу електрода, виду напруги і, найголовніше, електричної міцності матеріалу ЗП. Це може призводити до пошкодження

якісного ЗП в процесі проведення контролю, тобто електроіскровий метод вже не можна вважати неруйнівним. Для запобігання електричного пробою ЗП високовольтну тестову напругу U_t потрібно вибирати в діапазоні $U_{\min} < U_t < U_d$, де: U_{\min} – найменша напруга, необхідна для формування іскри у місці наскрізного дефекту; U_d – максимальна напруга, яка призводить до електричного пробою якісного ЗП. Для оптимального вибору максимальної тестової напруги U_d необхідно враховувати електричну міцність матеріалу ЗП [3, 6]. Для реалізації нових підходів щодо оптимального вибору тестової напруги необхідно дослідити електричну міцність (пробійну напругу) сучасних ЗП [1, 2] для різних тестових електродів. Проведені дослідження стануть основою розробки нового нормативного документу по електроіскровому контролю діелектричних ЗП на металах.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано сучасний стан розвитку електроіскрового методу виявлення дефектів захисних покриттів та фізичні явища, що лежать в його основі. Подано особливості електроіскрового дефектоскопу ПУЛЬСАР-2І і результати з оптимізації форми тестової напруги. Показано перспективу виявлення дефектів ЗП на основі ефекту коронного розряду, що дозволить зменшити їх пошкодження під час проведення контролю. Обґрунтовано необхідність вдосконалення методології електроіскрового контролю шляхом вибору оптимальної тестової напруги на основі інформації про електричну міцність контрольованих покриттів. Поставлено задачу розробки нового нормативного документу на основі досліджень електричної міцності сучасних ЗП для різних тестових електродів і форми тестової напруги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідниковий посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Том 11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів // Г.М. Никифорчин, С.Г. Поляков, В.А. Черватюк та інші. – Львів: СПОЛІОМ. – 2009. – 504 с.
2. Сучасні протикорозійні матеріали для захисту об'єктів нафтогазового комплексу України: Довідник-каталог // В.М. Василюк, В.А. Черватюк, В.П. Васьківський, Ю.Г. Федоренко, С.В. Ткач. – Львів: СПОЛІОМ. – 2008. – 170 с.
3. ASTM D 5162:2015. Standard practice for discontinuity (holiday) testing of nonconductive protective coating on metallic substrate. 2015.
4. NACE International SP0188. Standard Practice – Discontinuity (holiday) testing of new protective coatings on conductive substrates.
5. ГОСТ 34395—2018. Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. Міждержавний стандарт. 2019.
6. ДСТУ 4219-2003. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. 2003.
7. Алещенко А.Г., Учанин В.Н., Кенс И.Р. Приборы неразрушающего контроля качества защитных неэлектропроводных покрытий // Оборудование и инструмент. – 2004. – № 12. – С. 46–49.
8. Мусихин А.С., Сясько В.А. Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий // В мире НК. – 2018. – Т. 21. – № 2. – С. 42–45.
9. Пат. 2087854 РФ, МКИ G 01 B 07/06. Устройство для контроля параметров диэлектрических покрытий // В.Н. Учанин, О.Л. Годовник, В.Я. Владычин та інші. Заявл. 05.06.1991; Оpubл. 20.08.1997.
10. Лозанский Э.Д., Фирстов О.Б. Теория искры. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.
11. Физика диэлектриков (область сильных полей) // Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов– Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 244 с.
12. Artbauer J. Electric strength of polymers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1996. – 29. – P. 446–456.
13. Лавринович В.А., Меженский А.А., Рахимов Р.С. Установка для бесконтактного поиска скрытых дефектов в тонких диэлектрических пленках методом коронного разряда // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 58–65.