

DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2020-40-10

УДК: 621.38

**Павленко Вячеслав Якович**, науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0003-0925-4173>

**Підпригора Юрій Анатолійович**, науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0002-6310-6780>

**Кузьменко Тетяна Михайлівна**, науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0003-1485-929X>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

## ЕЛЕКТРОННИЙ МІКРОСКОП ЯК ОДИН ІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ 3D ВИМІРЮВАНЬ

**Павленко В.Я., Підпригора Ю.А., Кузьменко Т.М. Електронний мікроскоп як один із сучасних засобів 3d вимірювань.** Розкрито сучасні засоби 3d вимірювань у вигляді електронного мікроскопу. Визначено поняття електронної мікроскопії, що являє собою сукупність методів морфологічного дослідження об'єктів за допомогою потоку електронів, структурованих електричними полями в електронних мікроскопах. Досліджено будову сучасного електронного мікроскопу. Наголошується, що електронний мікроскоп використовує замість променя світла (фотонів) потік електронів, у яких довжина хвилі значно менше, і цим він відрізняється від світлового мікроскопа. Як відомо з фізики, чим швидше швидкість електронів, тим менше довжина хвилі, а швидкість потоку електронів залежить від різниці потенціалів, яка в деяких моделях становить кілька мільйонів вольт і при цьому збільшення може досягати до двох мільйонів крат. Визначено принцип роботи електронної мікроскопії. В основі принципу лежить цифрова технологія, як комплекс, який складається з мікроскопа і персонального комп'ютера зі встановленим спеціальним програмним забезпеченням. Підкреслюється, що цифровий мікроскоп складається безпосередньо з мікроскопа і фото- або відеокамери, яка відповідає за виведення зображення, забезпечити належну якість якого можна тільки використовуючи професійне обладнання для цифрової мікроскопії. Наведено структурно-функціональну схему цифрової мікроскопії та описано структурні елементи. Розкрито принцип формування зображення та перехід від 2D до 3D моделі. Визначено, що для з'єднання фото- або відеокамери і мікроскопа використовуються адаптери, що забезпечують, крім надійного кріплення камери, передачу зображення з максимальним полем видимості і без спотворення картинки. Окреслено можливості модернізованих цифрових мікроскопів останнього покоління, головним з них є те, що з'єднання в єдину систему всіх складових дозволяє отримати нові можливості для аналізу, які недоступні для кожного окремого вузла цифрового мікроскопа.

**Ключові слова:** 3d вимірювання, інновації, механізм, мікроскопія, нанотехнологія, матеріали, конструкції, мікроелектроніка, ультраструктурний рівень, електронний мікроскоп.

**Павленко В. Я., Подопрігора Ю. А., Кузьменко Т. М. Электронный микроскоп как один из современных средств 3d измерений.** Раскрыты современные средства 3d измерений в виде электронного микроскопа. Определено понятие электронной микроскопии, представляет собой совокупность методов морфологического исследования объектов с помощью потока электронов, структурированных электрическими полями в электронных микроскопах. Исследовано строение современного электронного микроскопа. Отмечается, что электронный микроскоп использует вместо луча света (фотонов) поток электронов, у которых длина волны значительно меньше, и этим он отличается от светового микроскопа. Как известно из физики, чем быстрее скорость электронов, тем меньше длина волны, а скорость потока электронов зависит от разности потенциалов, которая в некоторых моделях составляет несколько миллионов вольт и при этом увеличение может достигать до двух миллионов крат. Определен принцип работы электронной микроскопии. В основе принципа лежит цифровая технология, как комплекс, который состоит из микроскопа и персонального компьютера с установленным специальным программным обеспечением. Подчеркивается, что цифровой микроскоп состоит непосредственно из микроскопа и фото или видеокамеры, которая отвечает за вывод изображения, обеспечить надлежащее качество которого можно только используя профессиональное оборудование для цифровой микроскопии. Приведены структурно-функциональную схему цифровой микроскопии и описаны структурные элементы. Раскрыто принцип формирования изображения и переход от 2D к 3D модели. Определено, что для соединения фото- или видеокамеры и микроскопа используются адаптеры, обеспечивающие, кроме надежного крепления камеры, передачу изображения с максимальным полем видимости и без искажения картинки. Определены возможности модернизированных цифровых микроскопов нового поколения, главным из них является то, что соединение в единую систему всех составляющих позволяет получить новые возможности для анализа, которые недоступны для каждого отдельного узла цифрового микроскопа.

**Ключевые слова:** 3d измерения, инновации, механизм, микроскопия, нанотехнология, материалы, конструкции, микроэлектроника, ультраструктурные уровни, электронный микроскоп.

**Pavlenko Vyacheslav, Pidopryhora Yuriy, Kuzmenko Tetiana. Electronic microscope as one of modern 3d measurements.** Modern means of 3d measurements in the form of an electron microscope are revealed. The concept of electron microscopy is defined, which is a set of methods for morphological study of objects using a stream of electrons structured by electric fields in electron microscopes. The structure of a modern electron microscope has been studied. It is noted that the electron microscope uses instead of a beam of light (photons) a stream of electrons, in which the wavelength is much smaller, and thus it differs from the light microscope. As is known from physics, the faster the velocity of the electrons, the shorter the wavelength, and the velocity of the electron flows depends on the potential difference, which in some models is several million volts and the increase can reach up to two million times. The principle of electron microscopy is determined. The principle is based on digital technology as a complex consisting of a microscope and a personal computer with special software installed. It is emphasized that a digital microscope consists directly of a microscope and a photo or video camera, which is responsible for the output of the image, the proper quality of which can be ensured only by using professional equipment for digital microscopy. The structural-functional scheme of digital microscopy is given and the structural elements are described. The principle of image formation and transition from

2D to 3D model is revealed. It is determined that adapters are used to connect the camera or video camera and the microscope, which, in addition to securely mounting the camera, transmit images with the maximum field of view and without distorting the image. The possibilities of modernized digital microscopes of the latest generation are outlined, the main one is that the connection into a single system of all components allows to obtain new opportunities for analysis, which are not available for each individual node of the digital microscope.

**Keywords:** 3d measurements, innovation, mechanism, microscopy, nanotechnology, materials, structures, microelectronics, ultra structural level, electron microscope.

**Вступ та постановка проблеми дослідження.** Історія розвитку науки і техніки нерозривно пов'язана з розвитком системи, методів і засобів вимірювань. В кінці ХХ і початку ХХІ століття на передній план розвитку висунулися високі технології, головними з яких є мікроелектроніка і нанотехнологія. Мікроелектроніка оперує з елементами, що мають мінімальні розміри (критичні розміри) в сотні нанометрів, і в найближчі роки очікується перехід до десятків нанометрів [1, 2], а нанотехнологія оперує з характерними розмірами в одиниці нанометрів. При цьому необхідно врахувати, що розвиток мікроелектроніки йде випереджаючими темпами. Все це вимагає вирішення проблеми забезпечення єдності лінійних вимірювань в нанометровому діапазоні.

Розвиток мікроскопії вже зробив революцію в світі і залишається найважливішою передумовою її майбутніх відкриттів. Застосування електронної мікроскопії в різних сферах істотно змінило і поглибило колишні уявлення про тонку структуру клітини і її позаклітинних компонентів, що сприяло додатковому розумінню її функціональних особливостей.

Можливість проведення структурно-функціонального аналізу клітин нерозривно пов'язана з винаходом і подальшим удосконаленням світлових, електронних і зондових мікроскопів [1, 3-5]. Така необхідність викликана прагненням вчених в більш повному розумінні механізмів складних просторових процесів, що відбуваються в клітині на ультраструктурному рівні (менш 100 нм). Більш того, з'явилася можливість вивчення об'єктів в тривимірному – 3D зображенні з високим просторовим дозволом (0,2-0,5 нм).

Отримання об'ємної інформації на ультраструктурному рівні істотно розширює можливість традиційних підходів при вивченні мікросвіту, а саме:

- дозволяє отримувати нову інформацію про об'єкти дослідження – аналізувати і зберігати інформацію про форму, рельєф поверхню і просторові параметри клітини в її тривимірній субмікроскопічній морфології [2, 3];
- здійснювати моделювання мікрооб'єктів зі збереженням їх справжніх розмірів і форм [2];
- проводити комп'ютерну видову діагностику в тривимірному режимі [4];
- накопичувати інформацію про їх нативну архітектуру і різноманіття [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні, наукові дослідження у сфері електронної мікроскопії включають в себе як зарубіжні так і вітчизняні досягнення.

О.М. Маркіна., В.П. Маслов [7] розглядаються фізичні основи формування зображення об'єкту дослідження, у роботі представлено аналіз умов формування сигналу та шляхи підвищення точності цифрової вимірювальної системи, узагальнено і систематизовано матеріали щодо експериментальних досліджень джерел похибок цифрових вимірювальних систем та запропоновано методи їх зменшення.

В роботі [8] розглянуто та проаналізовано широку номенклатуру методів та обладнання для реєстрації топографії поверхні, кожний з яких використовує різні фізичні принципи взаємодії з поверхнею, має різну роздільну здатність та обмеження робочої площі сканування, має свої переваги та недоліки. Це контактна (щупова) профілометрія, фокусна мікроскопія, інтерференційна профілометрія, скануюча зондова мікроскопія

А.В. Фесенко, В.Н. Боровицький [9] наводять огляд методів отримання тривимірних зображень за допомогою оптичних мікроскопів через їхню велику кількість. Розглядаються методи тіншового перетину профілю, методи з просторовою модуляцією освітлення, конфокальні і інтерференційні. Розглядаються принципи роботи і схеми побудови приладів. З огляду на переваги конфокальних і інтерференційних методів їх основним недоліком є вартість устаткування, що в свою чергу наштовхує на модернізацію вже існуючих мікроскопів в мікроскопи для отримання тривимірних зображень шляхом незначних доопрацювань або додатковим портативним модулем.

Також варто відмітити роботи Lei Tian, Laura Waller [10], С.К. Мешанінов, В.М. Співак, А.Т. Орлов [11], S. A. Nepijko, A. Chernenkaya, K. Medjanik, S. V. Chernov, A. A. Sapozhnik, L. V. Odnodvoretz, I. Yu. Protsenko, W. Schulze, G. Ertl, G. Schonhense [12].

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень, питання дослідження сучасних засобів 3d вимірювань залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** У статті необхідно дослідити сучасні електронні мікроскопи для забезпечення якісних 3d вимірювань.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Електронна мікроскопія – це сукупність методів морфологічного дослідження об'єктів за допомогою потоку електронів, структурованих електричними полями в електронних мікроскопах (ЕМ), які дозволяють вивчити мікроструктуру цих об'єктів на макромолекулярному і субклітинному рівнях (аж до атомно-молекулярного рівня), їх локального складу і локалізованих на поверхнях або в мікрооб'ємах тіл електричних і магнітних полів [2].

Також включає удосконалення і розробку нових ЕМ та інших корпускулярних мікроскопів (наприклад, протонного мікроскопа) і приставок до них; пошук методик підготовки зразків, досліджуваних в ЕМ; вивчення механізмів формування електронно-оптичних зображень; розробку методів аналізу одержуваної інформації [13].

Електронний мікроскоп використовує замість променя світла (фотонів) потік електронів, у яких довжина хвилі значно менше, і цим він відрізняється від світлового мікроскопа. Як відомо з фізики, чим швидше швидкість електронів, тим менше довжина хвилі, а швидкість потоку електронів залежить від різниці потенціалів, яка в деяких моделях становить кілька мільйонів вольт і при цьому збільшення може досягати до двох мільйонів крат, а дозвіл можна отримати до 10-20 Å. Ця якість і робить електронний мікроскоп незамінним приладом при дослідженні біологічних об'єктів, будови речовини, діагностики, аналізу частинок і контролю якості складних речовин як в медицині, мікробіології, імунології, фармакології так і в техніці, дозволяючи розглянути самі найдрібніші деталі, аж до атомномолекулярного рівня, недоступні для оптичного мікроскопа.

Сьогодні методи електронної мікроскопії дозволили перейти на якісно новий рівень вивчення матерії, здійснення якісних 3d вимірювань.

Новітнім напрямком в сучасній мікроскопії є цифрова мікроскопія, принцип роботи якої заснований на аналізі зображення за допомогою цифрових технологій. Інструментом описуваного методу аналізу є цифровий комплекс, що складається з мікроскопа і персонального комп'ютера з встановленим спеціальним програмним забезпеченням. Сам цифровий мікроскоп складається безпосередньо з мікроскопа і фото- або відеокамери, яка відповідає за виведення зображення, забезпечити належну якість якого можна тільки використовуючи професійне обладнання для цифрової мікроскопії. Структурно-функціональна схема цифрової мікроскопії наведена на рисунку 1.

Сканована деталь 1 встановлена на поворотному столі 2. Скануюча оптикоелектронна система включає випромінювач – лазер 3, цифрову відеокамеру 4 на основі ПЗЗ (прилад із зарядним зв'язком) матриці, яка встановлена на рухомий каретці 5, може переміщатися у вертикальному напрямку Z і здійснювати кутові переміщення  $\varphi_2$ . Координата скануємої точки  $\alpha\{X, Y, Z\}$  визначається за результатами обробки переміщень столу  $\varphi_1$  і скануючої системи  $\varphi_2$  і Z:

$$\alpha\{X, Y, Z\} = f((\varphi_1, \varphi_2, Z), Y_m, Z_m) \quad (1)$$

де  $Y_m$  і  $Z_m$  – координати зображення точки  $\alpha$  на ПЗЗ-матриці.

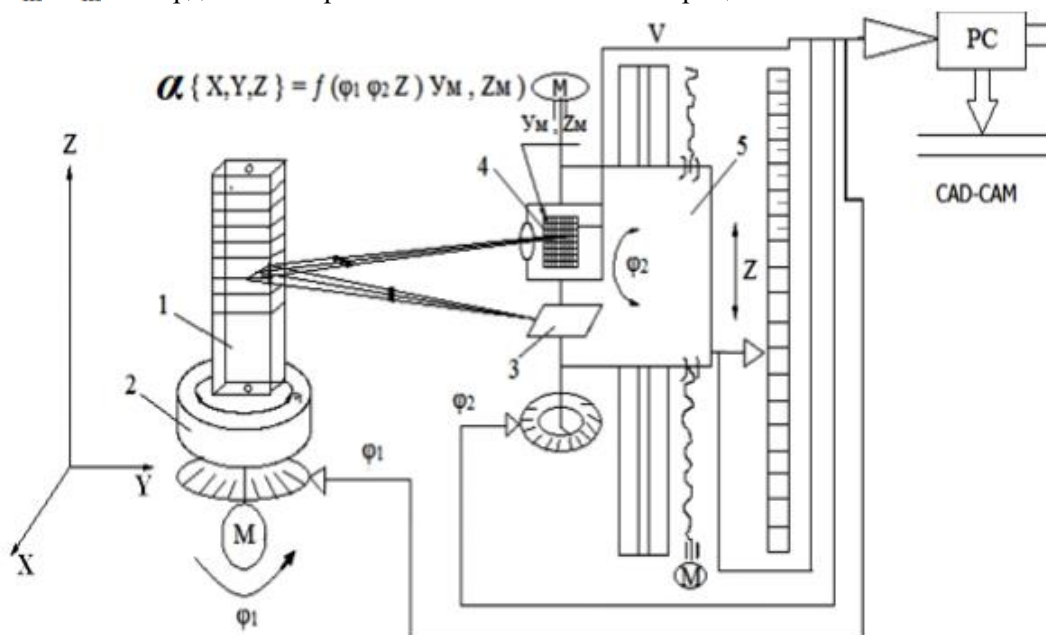


Рис. 1. Структурно-функціональна схема цифрової мікроскопії [14]

1 – сканована деталь, 2 – поворотний стіл, 3 – лазер, 4 – цифрова відеокамера, 5 – рухома каретка

При виборі таких сучасних мікроскопів, насамперед необхідно оцінити рівень оптики, від якої багато в чому залежить якість картинки. Також, важливим моментом є роздільна здатність обладнання, що характеризує систему введення зображення. Тому в сучасних цифрових мікроскопах використовуються тільки цифрові камери високої роздільної здатності і високочастотні оптичні системи.

Деякі моделі цифрових мікроскопів дозволяють проводити 3D-вимірювання, які досягаються за допомогою накладання зображення один на одного. Використовуючи кроковий двигун, система приймає зображення з низькою фокальною площиною і переводить в поле зору високої фокальної площини. Потім вона реконструює частини зображень в 3D-модель, засновану на контрасті, щоб створити кольорове 3D зображення об'єкта. З цих частин може бути виконана 3D модель вимірювань, але їх точність заснована на кроковому двигуні і глибині різкості об'єктива.

За допомогою сучасної системи цифрового мікроскопа може бути використана технологія «2D і 3D черепиця», також відома як «шиття» або створення панорамних зображень. В 2D черепиці зображення автоматично укладається як єдине ціле в реальному часі шляхом переміщення на етапі XY. 3D черепиця поєднує XY рух етапу 2D черепиці з Z-осі руху 3D вимірювання для створення 3D-панорами [12].

У ряді випадків, для з'єднання фото- або відеокамери і мікроскопа використовуються адаптери, що забезпечують, крім надійного кріплення камери, передачу зображення з максимальним полем видимості і без спотворення картинки. Кожна складова сучасного цифрового мікроскопа підбирається виходячи з особливостей всієї системи, в якій сумісність вузлів відіграє вирішальну роль при аналізі. Ряд виробляють цифрові мікроскопи компаній, що поставляють на ринок обладнання, оснащене тринокулярною насадкою, яка дозволяє проводити фото- або відеозйомку об'єкта без внесення додаткових змін до системи. Говорячи про можливість цифрових мікроскопів останнього покоління, фахівці відзначають, що з'єднання в єдину систему всіх складових дозволяє отримати нові можливості для аналізу, які недоступні для кожного окремого вузла цифрового мікроскопа. Наприклад, ні персональний комп'ютер, ні мікроскоп і ні фото- або відеокамера самі по собі не здатні виміряти оптичні характеристики об'єкта дослідження. І тільки зібрані в єдину систему, зазначені складові утворюють те, що називається цифровий мікроскоп, який дозволяє проводити складні фото- або відеометричні вимірювання у 3d форматі.

Сфера використання цифрових мікроскопів досить широка. Подібне сучасне обладнання для точного аналізу застосовується в лабораторіях різних виробництв, матеріалознавстві, медицині, біології, електроніці, точному машинобудуванні і т. д. Основними перевагами цифрових мікроскопів є:

- передача (трансляція) результатів досліджень об'єктів на відстані в режимі реального часу;
- проведення аналізу об'єктів спостереження без додаткових пристосувань візуально, а також на екрані монітора персонального комп'ютера;
- можливість збереження практично будь-якої кількості проміжних результатів дослідження, а також кінцевого на цифрові носії інформації;
- можливість редагування збережених цифрових результатів за допомогою спеціального програмного забезпечення.

**Висновки.** Електронний мікроскоп є перспективним засобом 3d вимірювань, дозволяє використовувати практичні методи вимірювання на якісно новому рівні. Найбільш поширені є інтерференційні методи отримання тривимірних зображень, зважаючи на їх високу роздільну здатність. Найбільш якісні зображення можна отримати на лазерному скануючому конфокальному мікроскопі. З огляду на економічний інтерес і сучасний рівень технологій (для здійснення сканування) можна вважати за доцільне модернізацію недорогих оптичних мікроскопів в мікроскопи для отримання тривимірних зображень методом тіньового перетину.

#### Список бібліографічного опису

1. Курбацький, В.П. Погосов, В.В., Коротун, А.В., Пехотін, Д.А. (2019). До питання про граничну роздільність електронного мікроскопу. *Тиждень науки-2019: тези доповідей науково-практичної конференції*, (м. Запоріжжя, 15–19 квітня 2019 р.) / редкол.: В. В. Наумик (відпов. ред.). Запоріжжя: ЗНТУ, 70-71.
2. Іванчук, О. Гумська О. (2019). Автоматизована побудова цифрової моделі мікроповерхні об'єкта за стереопарою цифрових РЕМ-зображень. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2, 72-96.
3. Захаров І.П., Павленко Ю.Ф., Гусельников В.К., Кондрашев С.І. (2014). Забезпечення єдності електрорадіовимірювань / під ред. д.т.н., проф. Ю.Ф. Павленка. Харків: Підручник НТУ «ХПІ». 236 с.

4. Reich, E.S. (2013). Imaging hits noise barrier: Physical limits mean that electron microscopy may be nearing highest possible resolution. *Nature*, 499, 135–136.
5. Ivanchuk, O., Tumska, O. (2017). A study of fractal and metric properties of images based on measurements data of multiscale digital SEM images of a test object obtained. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 85, 53–64.
6. Мельник, Ю. А. (2013). Визначення структури та мікротопографії характеристичних поверхонь матеріалів методом 3D реконструкції : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Луцьк. нац. техн. ун-т. Луцьк, 20 с.
7. Маркіна О.М., Маслов В.П. Шляхи вдосконалення цифрових вимірювальних систем на базі оптичного мікроскопу Біолам: монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 125 с.
8. Закієв, В.І. (2019). Прилад безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів методом інтерферометрії: дис. ... канд. техн. наук : 05.11.01 / Національний авіаційний університет МОН України, Київ. 191 с.
9. Фесенко А.В., Боровицкий В.Н. (2015). Современное состояние оптической микроскопии для получения трехмерных изображений. *Оптические та фізико-хімічні вимірювання*, 1, 62-72.
10. Tian L., Waller L. (2015). 3D intensity and phase imaging from light field measurements in an LED array microscope. *Optica*, 2, 2, 104-111.
11. Мещанинов, С.К., Співак, В.М., Орлов, А.Т. (2015). Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань: навчальний посібник. Київ: Кафедра. 211 с.
12. Neričko, S. A., Chernenkaya, A., Medjanik, K., Chernov, S. V., Sapozhnik, A. A., Odnodvoretz, L. V., ... & Schönhense, G. (2016). Spectral Measurement of Photon Emission from Individual Gold Nanoparticles Using Scanning Tunneling Microscopy. *Журн. нано- та електрон. фізики*, 2, 02039-1-02039-3.
13. Huang, X., Zhang, Y., & Yue, Z. (2016). Imageguided non-local dense matching with threesteps optimization. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 3(3), 67–74.

#### References

1. Kurbatsky, V.P., Pogosov, V.V., Korotun, A.V., Pekhotin, D.A. (2019). On the question of the ultimate resolution of the electron microscope. Week of Science 2019: abstracts of reports of the scientific-practical conference, (Zaporizhzhya, April 15–19, 2019) / editor: VV Naumyk (responsible editor). Zaporozhye: ZNTU, 70-71.
2. Ivanchuk, O. Tumska O. (2019). Automated construction of a digital model of the micro-surface of an object based on a stereo pair of digital SEM images. Modern achievements of geodetic science and production, 2, 72-96.
3. Zakharov I.P., Pavlenko Y.F., Guselnikov V.K., Kondrashev S.I. (2014). Ensuring the unity of electrical and radio measurements / ed. Ph.D., prof. Yu.F. Pavlenka. Kharkiv: Textbook of NTU "KhPI". 236 p.
4. Reich, E.S. (2013). Imaging hits noise barrier: Physical limits mean that electron microscopy may be nearing highest possible resolution. *Nature*, 499, 135–136.
5. Ivanchuk, O., Tumska, O. (2017). A study of fractal and metric properties of images based on measurements data of multiscale digital SEM images of a test object obtained. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 85, 53–64.
6. Melnik, Yu. A. (2013). Determination of structure and microtopography of characteristic surfaces of materials by the method of 3D reconstruction: author's ref. dis. ... cand. tech. Sciences: 05.02.01 / Lutsk. nat. tech. un-t. Lutsk, 20 с.
7. Markina O.M., Maslov V.P. Ways to improve digital measuring systems based on the Biolam optical microscope: a monograph. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2017. 125 p.
8. Zakiev, V.I. (2019). Device of contactless measurement of geometrical parameters of a surface of products by a method of interferometry: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.11.01 / National Aviation University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv. 191 s.
9. Fesenko AV, Borovitsky VN (2015). Current state of optical microscopy for obtaining three-dimensional images. *Optical and physicochemical measurements*, 1, 62-72.
10. Tian L., Waller L. (2015). 3D intensity and phase imaging from light field measurements in an LED array microscope. *Optica*, 2, 2, 104-111.
11. Мещанинов, С.К., Співак, В.М., Орлов, А.Т. (2015). Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань: навчальний посібник. Київ: Кафедра. 211 с.
12. Neričko, S. A., Chernenkaya, A., Medjanik, K., Chernov, S. V., Sapozhnik, A. A., Odnodvoretz, L. V., ... & Schönhense, G. (2016). Spectral Measurement of Photon Emission from Individual Gold Nanoparticles Using Scanning Tunneling Microscopy. *Журн. нано- та електрон. фізики*, 2, 02039-1-02039-3.
13. Huang, X., Zhang, Y., & Yue, Z. (2016). Imageguided non-local dense matching with threesteps optimization. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 3(3), 67–74.