

УДК 681.2.08

**ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЬ ЗМОЧУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИСТЕМИ «ТВЕРДЕ ТІЛО – РІДИНА - ГАЗ» ЄМНІСНИМ МЕТОДОМ****М. М. Чуйко<sup>1)</sup>, Л. А. Витвицька<sup>1)</sup>, З.Я. Витвицький<sup>2)</sup>***1 - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: zarichna@iung.edu.ua**2 – Івано-Франківський національний медичний університет, вул. Галицька, 2, м. Івано-Франківськ, 76018*

*Встановлена залежність поверхневого натягу твердого тіла від поверхневого натягу та діелектричних властивостей рідини при її розтіканні поверхнею твердого тіла. Це дає можливість визначати ступінь змочуваності рідиною поверхні твердого тіла за діелектричними властивостями рідини, вимірюючи імпеданс ємнісної комірки, у якій знаходиться досліджувана система «рідина - тверде тіло - газ». Описано будову розробленого пристрою ВСП-1 для реалізації запропонованого ємнісного методу. Подані результати експериментальних досліджень при контролі змочувальних властивостей чистих рідин та розчинів ПАВ на твердих зразках у вигляді графічних залежностей зміни імпедансу в часі.*

*Ключові слова: змочування, розтікання, імпеданс, конденсатор, рідина, тверде тіло, прилад.*

*Установлена зависимость поверхностного натяжения твердого тела от поверхностного натяжения и диэлектрических свойств жидкости при ее растекании поверхностью твердого тела. Это дает возможность определять степень смачиваемости жидкостью поверхности твердого тела по диэлектрическим свойствам жидкости, измеряя сопротивление емкостной ячейки, в которой размещена исследуемая система «жидкость - твердое тело - газ». Описано строение разработанного устройства ИСП-1 для реализации предложенного емкостного метода. Представлены результаты экспериментальных исследований при контроле смачивающих свойств чистых жидкостей и растворов ПАВ на твердых образцах в виде графических зависимостей изменения импеданса во времени.*

*Ключевые слова: смачивание, растекание, импеданс, конденсатор, жидкость, твердое тело, прибор.*

*The dependence of the solid bodies surface tension vs. the dielectric properties and surface tension of liquids during its spreading on these bodies. It allows to measurement the degree of solid body wettability by the liquid with dielectric properties, measuring capacitive cell impedance with studied system "liquid-solid-gas". Described the structure of the developed device SDM-1. The results of experimental researches for pure liquids and surfactants on solid bodies are shown as graphic dependences of impedance vs. time.*

*Keywords: wetting, spreading, impedance, capacitor, liquid, solid, device.*

**Вступ.** Характер поведінки рідини на поверхні твєдого тіла визначають змочувальні властивості усіх середовищ, які беруть участь у взаємодії. Характер взаємодії контактуючих фаз відіграє важливу роль у багатьох сферах людської діяльності, зокрема, у нафтогазовидобутку (для інтенсифікації видобування), у неруйнівному контролі (при капілярній дефектоскопії), у текстильній промисловості (при створенні непромокальних матеріалів та фабуванні тканин), у друкарстві

(для якісного друку), у хімічній промисловості (при виготовленні пестицидів), у медицині (застосування імплантів), при нанесенні захисних покриттів та інше.

Слід зауважити, що характер взаємодії контактуючих фаз, в першу чергу, визначає та фаза, яка володіє більшою поверхневою енергією. Оскільки в більшості випадків тверді тіла володіють вищою поверхневою енергією (за виключенням високоенергетичних рідин), то поведінка рідини на поверхні твердого тіла

зумовлюється, в значній мірі, властивостями саме твердої фази. Також на процес змочування має вплив полярність рідини: чим вище її значення, тим слабші її змочувальні властивості [1].

**Мета роботи.** Розроблення методу та приладу для проведення експрес-контролю змочувальних властивостей різноманітних рідин при їх нанесенні на досліджувані тверді поверхні.

**Основна частина.** У точці трифазного контакту тверде тіло – рідина – газ змочуваність визначається поверхневими властивостями кожного середовища зокрема, а математична залежність між крайовим кутом змочування та поверхневими натягами контактуючих фаз описується рівнянням Юнга [2]:

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

де  $\theta$  - крайовий кут змочування,  $\sigma_{mz}$ ,  $\sigma_{mp}$ ,  $\sigma_{pe}$  – поверхневі натяги, відповідно, на межах розділу фаз тверде тіло – газ, тверде тіло – рідина та рідина-газ (Н/м).

Проте запропонована Юнгом формула не знайшла прямого практичного застосування у зв'язку із складністю визначення параметра  $\sigma_{mp}$  як прямими, так і опосередкованими методами.

Динаміка розтікання краплі при нанесенні її на поверхню твердого тіла залежить від властивостей рідини (густини  $\rho$ , поверхневого натягу  $\sigma$ , в'язкості  $\mu$ ), початкового діаметру сферичної краплі  $D$ , швидкості падіння  $u_0$  та прискорення вільного падіння  $g$ .

Характеристики розтікання краплі визначаються чотирма безрозмірними критеріями подібності: капілярним числом ( $Ca$ ), що характеризує швидкість руху лінії трифазного контакту і традиційно використовується при дослідженні динамічного крайового кута; критерієм Вебера ( $We$ ), який залежить від густини рідини та швидкості зіткнення краплі з поверхню твердого тіла; критерієм Бонда ( $Bo$ ), що виражає співвідношення сил тяжіння і поверхневого натягу; критерієм Лапласа ( $Lp$ ), який відображає вплив в'язкості на динаміку розтікання краплі:

$$Ca = \frac{\mu u}{\sigma}, \quad We = \frac{\rho u_0^2 D}{\sigma}, \quad Bo = \frac{g D^2 \rho}{\sigma}. \quad (2)$$

Для розрахунку значень даних критеріїв

використовувалися відомі залежності:

- діаметр краплі:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \rho N}}, \quad (3)$$

де  $m$  - сумарна маса  $N$  крапель;

- швидкість зіткнення краплі з підкладкою:

$$u_0 = \frac{L}{\Delta t}, \quad (4)$$

де  $L$  - відстань від нижнього краю краплі, що відірвалася від капіляра, до підкладки,  $\Delta t$  - інтервал часу між відривом краплі від капіляра і зіткненням з підкладкою;

- швидкість руху лінії трифазного контакту:

$$u = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (5)$$

де  $\Delta s$  - відстань між крайніми точками контакту трьох фаз на попередньому і поточному зображеннях краплі,  $\Delta t$  - інтервал часу між сусідніми зображеннями (кадрами) краплі.

В ході теоретичних досліджень встановлена залежність для поверхневого натягу твердих тіл та рідин-діелектриків, яка теоретично базується на взаємозв'язку діелектричних та поверхневих властивостей цих середовищ. Даний взаємозв'язок впливає із вагомим вкладом дисперсійних сил міжмолекулярної взаємодії у величину роботи адгезії  $W_a$  на поверхні розділу тверде тіло-рідина [2]:

$$W_a = 2\sqrt{\sigma_{pe} \cdot \sigma_{mz}}. \quad (6)$$

З іншої сторони, поверхнева енергія рідин-діелектриків визначається поляризаційними властивостями та мікроструктурою діелектрика за такою залежністю [3]:

$$W = \frac{2N^2 h e (sZ)^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{3}{2}}}{64(m)^{\frac{1}{2}} r^2}, \quad (7)$$

де  $N$  - концентрація молекул;  $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка),  $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона,  $m = 9,1095 \cdot 10^{-31}$  кг – маса електрона,  $s$  – валентність,  $Z$  – кількість вільних електронів,  $\alpha$  - поляризованість,  $r$  – міжмолекулярна відстань.

В свою чергу, взаємозв'язок поляризованості молекули та її діелектричної проникності описує формула Клаузіуса-Мосотті, яка має

наступний вигляд [4]:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{\alpha N_A}{3\varepsilon_0}, \quad (8)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність,  $M$  – молярна маса речовини,  $\rho$  – густина речовини, ( $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  1/моль – число Авогадро,  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність).

Оскільки дисперсійні сили в значній мірі визначають поляризаційні властивості діелектриків, можна виразити залежність поверхневого натягу твердого тіла  $\sigma_{mz}$  від поверхневого натягу рідини, її молекулярних параметрів та діелектричної проникності шляхом сумісного розв'язку рівнянь (6),(7) і (8):

$$\sigma_{mz} = \frac{27N^4 h^2 e^2 s Z M^3 \varepsilon_0^3 (\varepsilon - 1)^3}{64^2 \sigma_{pz} m r^4 \rho^3 N_A^3 (\varepsilon + 2)^3}. \quad (9)$$

В отриманій залежності деякі величини є константами, а деякі – сталими для конкретної речовини, тому для встановлення залежності між поверхневим натягом та діелектричними властивостями вони можуть бути замінені таким коефіцієнтом:

$$k = \frac{27N^4 h^2 e^2 s Z M^3}{64^2 m r^4 \rho^3 N_A^3}. \quad (10)$$

Тоді залежність (9) набуде наступного вигляду:

$$\sigma_{mz} = k \cdot \frac{\varepsilon_0^3 (\varepsilon - 1)^3}{\sigma_{pz} (\varepsilon + 2)^3}. \quad (11)$$

Отримана залежність теоретично обґрунтовує можливість контролю ступеня змочуваності рідиною поверхні твердого тіла за діелектричними властивостями рідини.

Тому пропонується здійснювати контроль процесу розтікання рідини поверхнею твердого тіла на основі контролю зміни загальної діелектричної проникності системи тверде тіло – рідина – газ, яка знаходиться між обкладками конденсатора. Досліджувану ємнісну комірку можна представити еквівалентним набором послідовно та паралельно з'єднаних конденсаторів, які описують характер зміни ємності досліджуваної комірки. При цьому доцільно вимірювати ємнісний опір (імпеданс) даного конденсатора, який змінюється в часі при зміні загальної діелектричної проникності системи внаслідок розтікання рідини при її нанесенні на досліджувану поверхню твердого

тіла.

Використання імпедансу як вихідного параметра, а не ємності вимірювальної комірки, зумовлене можливістю підбору частоти вимірювань, що дозволяє розширити діапазон вимірювань.

Зміна імпедансу ємнісної комірки в часі при розтіканні рідини характеризує якість взаємодії системи тверде тіло – рідина. Пропонується встановлювати ступінь розтікання рідини досліджуваною твердою поверхнею шляхом порівняння залежностей зміни імпедансу при розтіканні досліджуваної рідини і еталонної, при їх почерговому нанесенні на досліджувану поверхню за нормальних умов навколишнього середовища.

На основі запропонованого ємнісного методу контролю розроблено пристрій ВСП-1 [5], блок-схема якого подана на рис. 1.

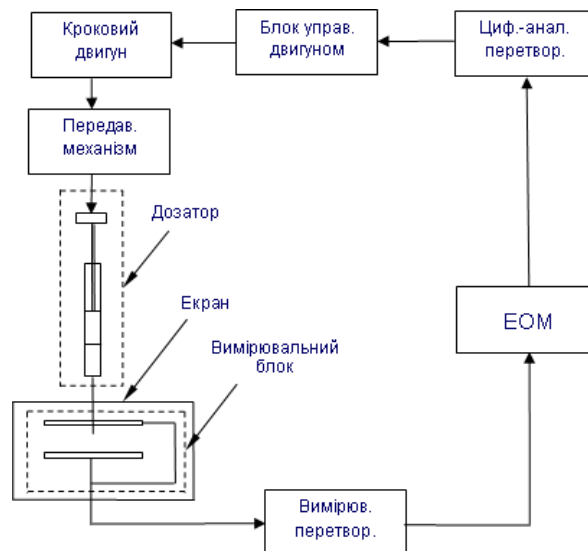


Рисунок 1 – Блок-схема пристрою ВСП-1

В ході вимірювань на зразок контрольованого твердого тіла, що знаходиться між обкладками конденсатора (ємнісної комірки), зі сталюю витратою наносяться еталонна та інші контрольовані рідини. Нанесення рідини на поверхню твердого тіла здійснюється за допомогою дозатора та передавального механізму, що перетворює обертові рухи двигуна у поступальне переміщення поршня дозатора. Керування роботою двигуна здійснюється ЕОМ за допомогою цифро-аналогового перетворювача та блока управління двигуном. Одночасно із нанесенням рідини на тверде тіло вимірювальним перетворювачем здійснюється вимірювання імпедансу. Перетворений і підсилений сигнал з

перетворювача передається на ЕОМ, в якому програмно здійснюється оброблення сигналу та побудова характеристики зміни імпедансу в часі. Слід зауважити, що в кожному окремому випадку необхідно дотримуватись чистоти досліджуваної поверхні та дозатора.

Конструкція пристрою передбачає швидку заміну зразків досліджуваних поверхонь, а також захист від впливу зовнішніх електричних полів.

Вимірювальний перетворювач розроблений на основі мікропроцесорного блоку типу AD 3934.

Механічний блок пристрою, що включає вимірювальний блок, дозатор та передавальний механізм, зображений на рис. 2.

В ході експериментальних досліджень здійснено контроль змочувальних властивостей чистих рідин (вода, спирт) та водного 10% розчину ПАР (ВУК LPD 6296) при їх розтіканні поверхнями скла та склотекстоліту (СТ). Для всіх рідин послідовність дослідження була такою: спочатку визначався імпеданс для зразка досліджуваного твердого тіла, а тоді з сталою витратою наносилась досліджувана рідина.

Для визначення робочої частоти вимірювального сигналу було встановлено характер залежності зміни імпедансу при зміні діелектричної проникності середовища між обкладками конденсатора шляхом внесення зразка досліджуваної твердої поверхні. На рис. 3 представлено графіки залежності нормованих значень імпедансу в часі при таких значеннях

частоти: 1, 2, 3, 5, 7,5 та 10 кГц. Нормовані значення отримані при віднесенні абсолютних значень імпедансу до їх середньо-арифметичного значення. Як видно з рисунка, саме на частоті вимірювального сигналу 3 кГц його характер зміни є чітким і з найменшим розкидом його значень.



Рисунок 2 - Механічний блок пристрою ВСП-1

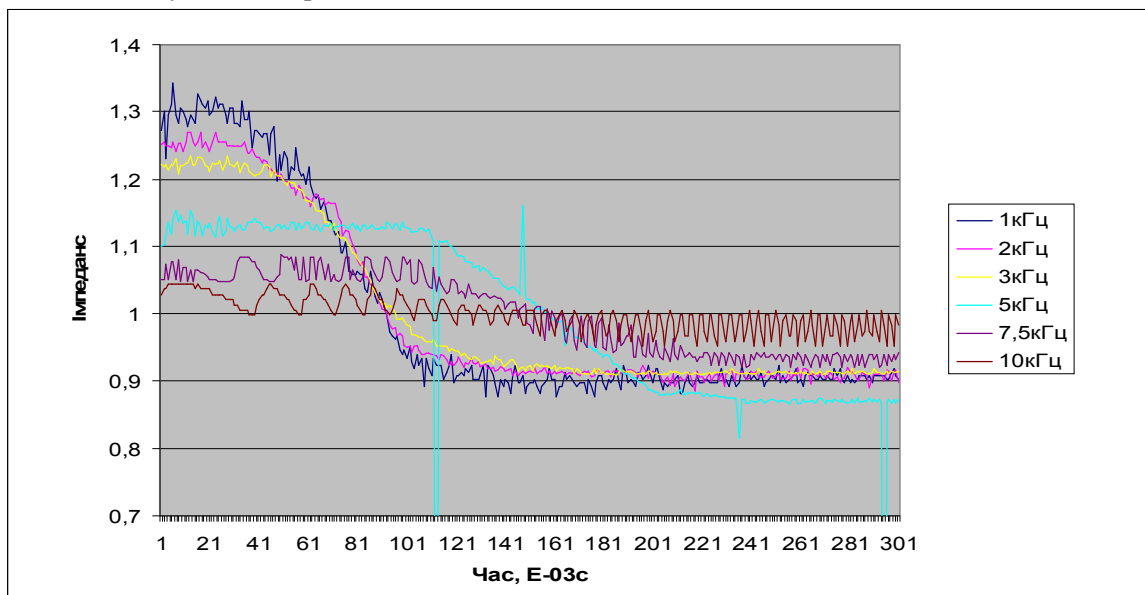


Рисунок 3 – Характер зміни імпедансу ємнісної комірки при внесенні у нього досліджуваного зразка на різних частотах вимірюваного сигналу

Тому наступні дослідження змочуваності вищевказаних рідин поверхнями скла та склотекстоліту здійснювалися на частоті 3 кГц. На рис. 4 і рис. 5 представлені згладжені графіки часових залежностей зміни імпедансу

при нанесенні досліджуваних рідин на вказані поверхні. Згладжування експериментальних залежностей здійснювалося з використанням лінійного фільтра за 5-ма точками.

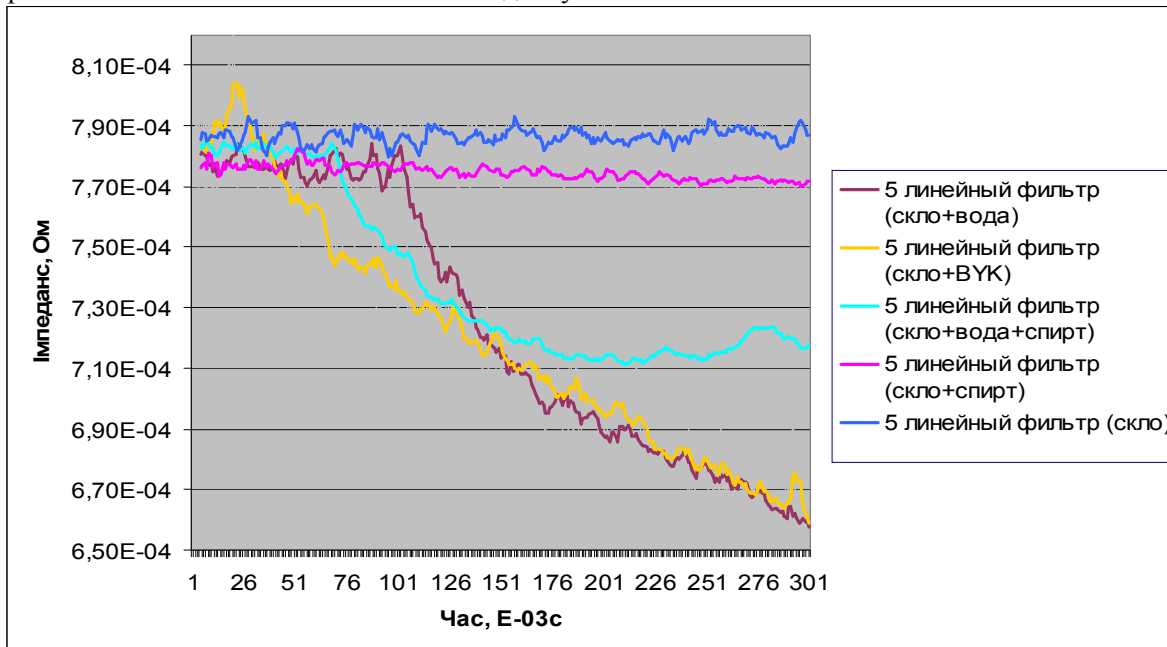


Рисунок 4 – Зміна імпедансу в часі при нанесенні рідин на зразок скляної поверхні

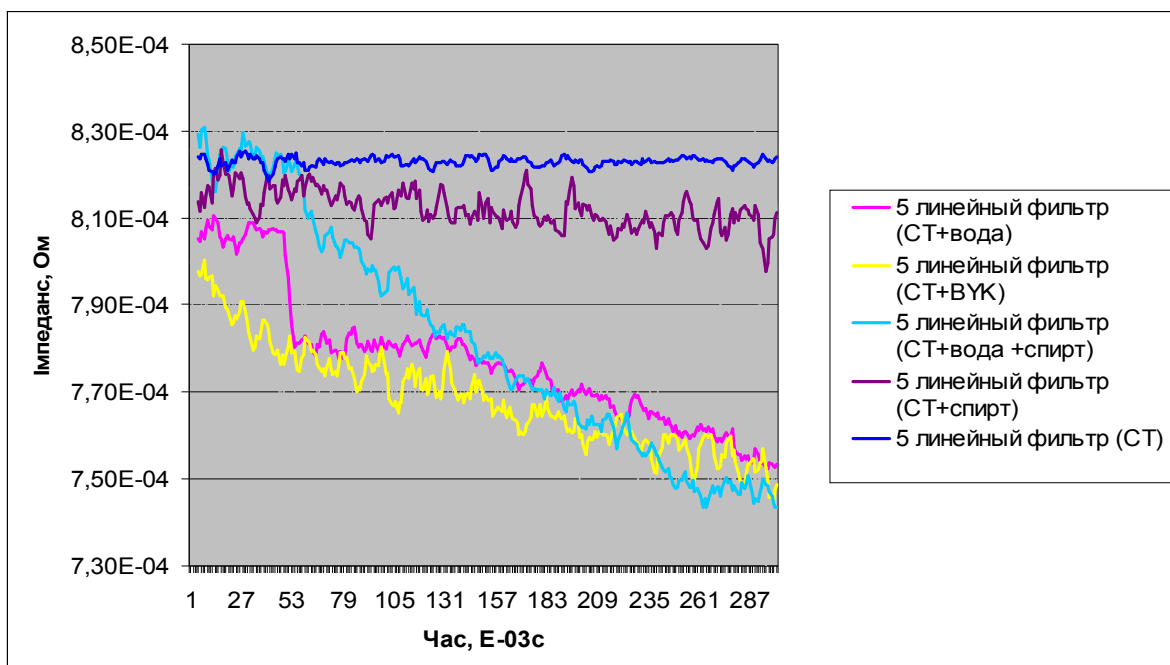


Рисунок 5 - Зміна імпедансу в часі при нанесенні рідин на зразок склотекстолітової поверхні

Як видно з графіків, криві зміни імпедансу для набору контрольованих рідин при розтіканні поверхнею конкретно взятого зразка твердого тіла змінюють свій кут нахилу та розкид вимірних значень в залежності від поверхневих властивостей контактуючих середовищ. З графіків видно, що із зменшенням поверхневого натягу контрольованої рідини у наступній послідовності: вода, водяний 10% розчин ПАР (ВУК LPD 6296), водяний 50% розчин спирту, спирт – кут нахилу кривої та розкид значень зменшуються, що відповідає зменшенню крайового кута змочування, а значить і більш кращому змочуванню та розтіканню. Тому отримані графічні залежності дають можливість стверджувати, що найкращими змочувальними властивостями володіє спирт, а найгірше змочування у води для запропонованих зразків твердого тіла.

## ВИСНОВКИ

Запропонований метод контролю дозволяє здійснювати підбір такої рідини, яка проявлятиме найкращі змочувальні властивості відносно досліджуваного зразка конкретно взятого твердого тіла, враховуючи при цьому особливості їх взаємодії. При цьому одночасно досліджуються обидва середовища в їх безпосередньому контакті, а не кожне зокрема, оскільки поведінка рідини, нанесеної на тверде тіло, залежить як від власне її фізико-хімічних

параметрів, так і від стану твердої поверхні (шорсткості, неоднорідності, забрудненості). У зв'язку із коротким часом проведення контролю знижується похибка визначення ступеня змочування, спричинена випаровуванням рідини, а також втрачає свою актуальність контрастність рідини та поверхні твердого тіла, що є необхідним при оптичних методах.

1. Сумм Б.Д. *Физико-химические основы смачивания и растекания* / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. — М. : Химия, 1976. — 232 с. 2. Зимон А. Д. *Адгезия жидкости и смачивание* / А. Д. Зимон. — М. : Химия, 1974. — 416 с. 3. Holmes C. F. *On the relation between Surface tension and Dielectric Constant* / C. F. Holmes. // *J. Amer. Soc.* — 1973. — P. 1014. 4. Берлинер М. А. *Измерение влажности* / М. А. Берлинер. — [2-е изд., перераб.]. — М. : «Энергия», 1973. — 241 с. 5. Пат. 64013 U Україна МПК(2011.01) G01N 13/00. *Пристрій для контролю змочуваності рідиною поверхні твердого тіла* / Чуйко М. М., Витвицька Л. А. — № u2011 04224; заявл. 07.04.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. №20.

**Поступила в редакцію 10.12.2015р.**

**Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Райтер П. М, докт. техн. наук, проф. Костишин В. С.**