

Тесленко М.Г., аспірант

*Харківський національний університет будівництва та архітектури***АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ІМЕРСІЙНОГО ЗМОЧУВАННЯ
МЕТОДОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПРОТІКАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
АЛГОРИТМУ АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕННЯ**

Ключові слова: імерсійне змочування, змочування порошків, автоматизована система вимірювань, аналіз зображення, бінарізація.

Вступ. Дослідження змочування матеріалу є необхідним для визначення його властивостей у різноманітних галузях. Існують два основних види змочування: контактне та імерсійне. При контактному змочуванні основною величиною, що вимірюється, є рівноважний крайовий кут [11], але при імерсійному змочуванні його безпосереднє визначення неможливе. Визначення рівноважного крайового кута змочування є основоположним для визначення поверхневої енергії матеріалів [7].

При цьому необхідно проводити дослідження не лише твердих, а і дисперсних матеріалів, що робить актуальною розробку відповідного методу. Так, у [8] пропонується метод гранулометричного аналізу для дослідження властивостей вугільного пилу. У [10] розглядаються декілька методів дослідження змочування. Серед цих методів достатньо ефективним та придатним до автоматизації є метод визначення часу протікання рідини через порошок у трубці [9]. Розрахунок крайового кута змочування для даного методу проводиться виходячи із формули:

$$\cos(\theta) = V \frac{2h\eta}{r\sigma_{pe}}, \quad (1)$$

де θ – крайовий кут змочування, V – час протікання рідини, h – довжина трубки із порошком, r – радіус пор або часток порошку, що досліджується, η – в'язкість рідини, σ_{pe} – поверхневий натяг рідини. Усі параметри, крім часу протікання V , є попередньо відомими для рідини, що використовується у експерименті.

Оцінка стану матеріалу за критерієм змочений/сухий виконується експертно на основі різниці у візуальних властивостях. Таким чином, на результат впливає людський фактор. При цьому неможливо оцінити похибку вимірювань, а отже і їх достовірність. Також питання викликає доцільність використання методу при швидких перехідних процесах, коли оператор може не встигнути зреагувати на зміну стану матеріалу.

Для підвищення точності подібних досліджень, а також для зменшення впливу людського фактору на результат, актуальною є задача автоматизації методу. Під автоматизацією розуміється опосередковане визначення сухого та змоченого матеріалу та встановлення часу змочування за допомогою апаратних та програмних засобів.

Зображення у якості джерела інформації. Для автоматизованого контролю необхідно використати датчики, що дозволять чисельно визначити параметри змочування. Такі датчики мають характеризуватися високою швидкодією і не контактувати із

матеріалом для забезпечення достовірності результатів. При цьому необхідно також забезпечити високу точність роботи первинних вимірювальних пристроїв, адже довжина трубки із матеріалом може бути менше п'яти сантиметрів. У такому випадку похибка у визначенні межі між змоченим та сухим матеріалом у декілька міліметрів може призвести до значних розбіжностей у кінцевих розрахунках.

Використання цифрового зображення у якості джерела інформації дозволить відстежувати візуальні параметри матеріалу із високою швидкістю, при чому аналіз сигналу буде покладено на програмні засоби ЕОМ. На відміну від інших методів, система комп'ютерного зору дозволяє проводити вимірювання без будь-якого втручання у сам процес, що гарантує відсутність впливу самої автоматизованої системи досліджень на параметри, що вимірюються. Також усувається необхідність апаратного налаштування при дослідженні матеріалів, властивості яких відрізняються, а сама система є універсальною і дозволить проводити вимірювання широкого спектру матеріалів. У випадку систем комп'ютерного зору усі налаштування можуть бути виконані програмно. Розробка алгоритму для відокремлення зображення сухого та змоченого матеріалу дозволить не тільки визначити повний час протікання процесу, а й відстежити динаміку його протікання, що може бути доцільним для наукових досліджень.

Для реалізації такого підходу необхідно використовувати лабораторну установку, яка відповідатиме вимогам отримання якісного зображення. При розробці установки має бути забезпечено якісне освітлення, використання виключно прозорих матеріалів для трубки із порошком, а також використання однорідного фону для чіткого відділення трубки. Крім того, під час проведення експерименту було встановлено, що тиск рідини, що залежить від висоти резервуару (рис. 1), впливає на час протікання рідини. Схему лабораторної установки для визначення змочування методом протікання зображено на рис. 1.

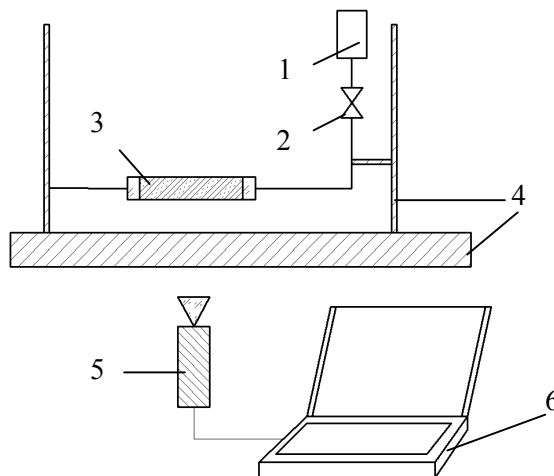


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки

1 – резервуар із рідиною; 2 – вентиль; 3 – трубка із матеріалом, що досліджується;
4 – штатив з підставкою; 5 – цифрова камера; 6 – персональний комп'ютер

Модель процесу змочування. Для отримання чисельних результатів (часу протікання процесу змочування) необхідно розробити алгоритм обробки зображення, що дозволить оцінити візуальні параметри та на основі цього визначити час протікання. Цей параметр можна сформулювати як різницю між часом початку процесу змочування

(рідина надходить до порошку у трубі) та завершенням процесу змочування (весь матеріал у трубі є змоченим):

$$t_{\text{змоч}} = t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}}. \quad (2)$$

Основною задачею при розробці автоматизованого методу є визначення часу завершення змочування (2), адже час початку може бути виміряно однозначно, наприклад при відкритті вентилу. Для цього необхідно розділяти на зображенні змочений та сухий матеріал. Враховуючи те, що метод передбачає можливість дослідження широкого спектру матеріалів, а також різні параметри обладнання та освітлення, необхідно використовувати не абсолютні, а відносні візуальні властивості. Іншими словами, на основі отриманого потоку зображень алгоритм має виконувати класифікацію без використання апіорної інформації про параметри матеріалу.

Вихідним сигналом є потік зображень у режимі реального часу із деякою частотою. У даному випадку цифрове зображення розглядається як дискретна функція яскравості $I(x,y)$. Візуально яскравість змоченого матеріалу менша, ніж яскравість сухого для більшості досліджуваних матеріалів. Отже, значення пікселя, що відповідає змоченому матеріалу, буде меншим, ніж значення пікселя зображення сухого матеріалу. Враховуючи те, що напрям руху рідини є відомим, значення функції для фіксованої координати абсцис під час перехідного процесу можна розглядати наступним чином (рис. 2).

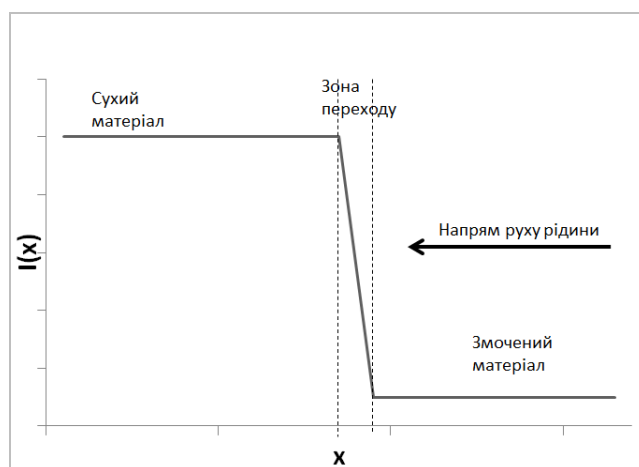


Рисунок 2 – Модель функції яскравості $I(x,y)$ для $y=\text{const}$

На рис. 2 показано перехідний процес у ідеальному випадку, коли умова $I_{\text{зм}} \gg I_{\text{с}}$ справедлива для кожного пікселя зображення. Але реальне зображення є неоднорідним і частина пікселів не відповідає умові, тому для побудови робастного алгоритму [12] використовувати лише одну умову неможливо. Так, на рис. 3 показано графік функції яскравості $I(x,y)$ при сталому значенні y . Також слід зазначити, що на початку процесу та після його завершення наявні лише пікселі змоченого або сухого матеріалу, а отже неможливо оцінити їх значення методом порівняння. При цьому можна стверджувати, що:

$$\sum_x \sum_y I_{x,y}(t_{\text{кін}}) > \sum_x \sum_y I_{x,y}(t_{\text{поч}}). \quad (3)$$

Основною задачею при побудові алгоритму є аналіз перехідного процесу у режимі реального часу та визначення межі розподілу між сухим та змоченим матеріалом.

Методи комп'ютерного зору. Для визначення межі розподілу необхідно відокремити змочений матеріал від сухого. Як було зазначено вище, використати сталі чисельні значення неможливо. Оцінити питомі параметри можна за допомогою статистичних методів.

Для прийняття рішення про належність матеріалу до сухого чи змоченого використовуються властивості яскравості, а саме різниці у яскравості між змоченим та сухим матеріалом. Задача розподілу пікселів зображення на два класи за критерієм значення функції яскравості відповідає задачі бінарізації [1], [2].

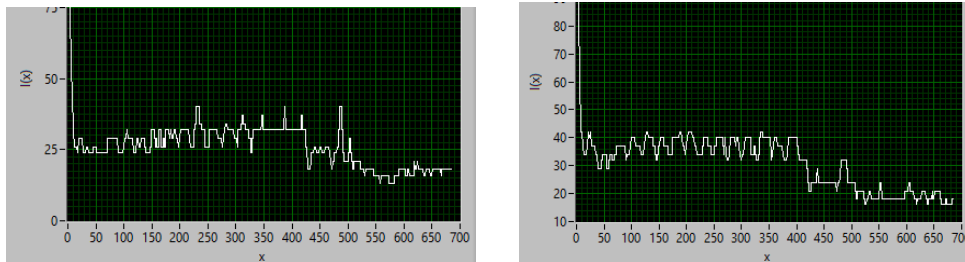


Рисунок 3 – Графік одновірної функції яскравості реального зображення трубки.
Пояснення у тексті

Суть бінарізації полягає у встановленні закону, за яким приймається рішення про належність пікселя до тої чи іншої групи. У більшості випадків кількість груп дорівнює двом. Для функції яскравості $I(x, y) \in \{0..2^k\}$ бінарізація відповідає відображенню:

$$I(x, y) \rightarrow R(x, y) \in \{0, 1\}. \quad (4)$$

Найбільш простим методом є встановлення порогу розподілу вручну, після чого пікселі із значенням яскравості більшим (або меншим) за поріг набувають значення «1», а інші – значення «0». Для вирішення нашої задачі такий метод не може бути використано, адже параметри яскравості змінюються залежно від матеріалів, що досліджуються, освітлення та властивостей камери.

Автоматичні алгоритми визначення порогу розподілу можна розділити на два класи – глобальні та локальні. Глобальні методи встановлюють загальний поріг для усіх пікселів, а локальні методи дозволяють адаптуватися до особливостей зображення, враховуючи локальні особливості для кожного пікселя [3]. Такий підхід виявився ефективним при гранулометричному аналізі зображення матеріалу [6], але через особливості задачі, використовувати локальні параметри не ефективно, адже об'єктом дослідження є уся множина пікселів зображення трубки. Необхідно визначити закон перетворення, який даватиме однозначне визначення зображення змоченого та сухого матеріалу.

Ефективним методом глобальної бінарізації, що використовує статистичну інформацію, є метод Оцу [4]. Даний метод передбачає мінімізацію дисперсії всередині кожного з класів [5] (у нашому випадку – двох), що забезпечує максимізацію дисперсії між класами:

$$\sigma^2(t_i) = \max(\sigma^2(t)) \Rightarrow t_i = t_{otsu}; \quad (5)$$

$$\sigma^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)(\mu_1(t) - \mu_2(t))^2. \quad (6)$$

Виходячи із умови (3), такий підхід має забезпечити ефективний розділ зображення змоченого та сухого матеріалу. При цьому використовується гістограма зображення:

$$p_i = \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M 1_{\{f(x,y)=i\}}. \quad (7)$$

Визначаються вірогідності двох класів як функцій порогу бінарізації t :

$$\omega_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} p(i)}{\sum p(i)}, \omega_2(t) = 1 - \omega_1(t). \quad (8)$$

На базі вірогідностей розраховується середнє арифметичне:

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} ip(i)}{\omega_1(t) \sum p(i)}, \mu_2(t) = \frac{\sum_{i=0}^{t-1} ip(i) - \mu_2(t) \omega_1(t) \sum p(i)}{\omega_2(t) \sum p(i)}. \quad (9)$$

Алгоритм полягає у ітеративному збільшенні порогу бінарізації та визначення описаних вище статистичних параметрів. Значення порогу t , при якому досягається найбільше значення дисперсії між класами (7), обирається як оптимальне і знаходиться бінарне зображення:

$$R_{x,y} = \begin{cases} 1, & I_{x,y} < t \\ 0, & I_{x,y} > t \end{cases}. \quad (10)$$

Аналіз бінарного зображення. Отримане у результаті бінарізації зображення дозволяє візуально виділити межу між сухим та змоченим матеріалом, проте необхідно розробити алгоритм, що дозволить формалізувати рішення. У частині бінарного зображення трубки із змоченим матеріалом більшість пікселів отримає значення «1» (рис. 4). Однак за через неоднорідність зображення розподіл не є ідеальним, і для чисельної оцінки межі розподілу необхідно провести додаткові перетворення. Сума пікселів у стовпці масиву зображення $R(x,y)$ характеризує належність цієї вибірки до одного з класів.

При ідеальному розподілі усі пікселі у стовпці, що відповідає змоченому матеріалу, будуть дорівнювати «1», а для сухого матеріалу «0». Для компенсації особливостей реального зображення використовується аналіз функції сум бінарного зображення $R(x,y)$ із розподільчою здатністю $N \times M$, що має вигляд:

$$L(x) = \sum_{y=0}^M R(x, y). \quad (11)$$

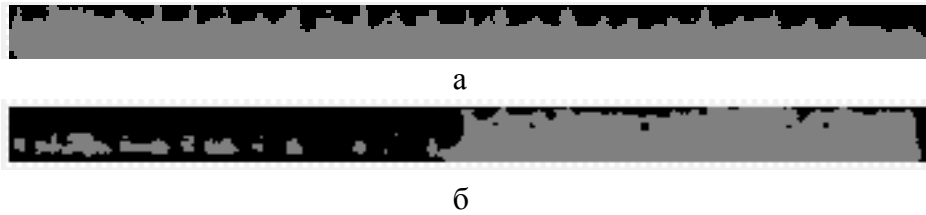


Рисунок 4 – Бінарізоване зображення трубки із матеріалом: перед початком експерименту, матеріал сухий (а); у процесі змочування, матеріал частково змочений (б)

Функція дозволяє чисельно оцінити вірогідність належності матеріалу до класу сухого або змоченого у будь-якій точці. Таким чином, із двомірного напівтонового зображення $I(x, y)$ (3) було отримано одномірну функцію $L(x)$ (11), що зменшує кількість можливих станів і полегшує остаточну класифікацію.

Для однозначного визначення межі розподілу необхідно встановити умову, виходячи із припущення, що функція не буде гарантовано мати граничних значень для зображення змоченого та сухого матеріалу. Межу можна визначити як константу, але це може призвести до необхідності налаштування алгоритму для кожного конкретного експерименту, а також підвищить імовірність похибки при навіть незначних збуреннях. Це недопустимо за умови проведення вимірювань у режимі реального часу.

Задача визначення межі розподілу схожа із задачею бінарізації. У цьому випадку також необхідно визначити оптимальне значення функції, що розмежує всю множину її значень на два класи. Для знаходження такого оптимального значення можна скористатися методами статистичного аналізу, що використовуються при бінарізації методом Оцу, модифікувавши їх до одномірної задачі. При цьому для розрахунку дисперсії використовується (5), формули для обчислення вірогідностей (7) та середнього арифметичного (8) також залишаються незмінними. Гістограма (6) замінюється на функцію:

$$p_i^{одн} = \sum_{x=0}^N 1_{\{L(x)=i\}}. \quad (12)$$

Точки перепаду функції (12) відповідають можливому положенню межі між змоченим та сухим матеріалом. Такий підхід дозволяє визначити межу розподілу між сухим та змоченим матеріалом при достатньо значних збуреннях функції. При використанні алгоритму до зображення трубки іноді можуть виникати помилкові перепади, в основному у крайніх положеннях трубки (рис. 5).

Такі збурення можуть бути усунені при використанні додаткових умов, що базуються на попередній інформації про стан протікання процесу, а також на моделі процесу, що використовується у даному дослідженні.

Для оцінки часу протікання процесу необхідно встановити таймер на початку процесу протікання. Визначення початку процесу може бути дано на основі аналізу функції сум (12). У випадку, коли функція має достатньо рівномірний розподіл, матеріал у трубці є однорідним, тобто, або змоченим, або сухим. Таким чином можна визначити і момент завершення процесу, при чому також можна відстежувати у режимі реального часу.

льного часу положення межі розподілу. Положення межі розподілу у кожній одиниці часу може бути записано у масив та опрацьовано після завершення вимірювання.

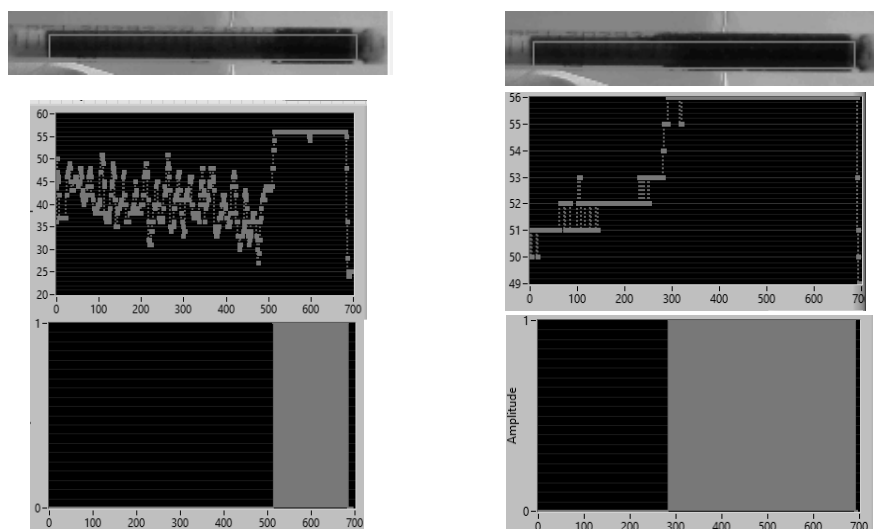


Рисунок 5 – Результат роботи алгоритму. Зверху – зображення трубки із матеріалом; всередині – функція сум; знизу – бінарізована функція сум

Висновки. У дослідженні було розроблено алгоритм обробки зображення у режимі реального часу, який дозволяє аналізувати процес змочування при проведенні досліджень методом визначення часу протікання. При цьому визначається положення межі між сухим та змоченим матеріалом, що дозволяє оцінити час протікання та динаміку процесу. На відміну від інших методів, автоматизована система вимірювань дозволяє оцінити параметри перехідного процесу, що може бути використано у подальших дослідженнях властивостей матеріалів. Також це може дозволити оцінити параметр r з рівняння (1), що забезпечить підвищення точності методу.

Алгоритм дозволив провести достатньо ефективний розподіл між сухим та змоченим матеріалом на усьому періоді протікання процесу. При цьому якість тестового зображення була досить низькою. Це свідчить про високу надійність алгоритму обробки зображення та стійкість до збурень.

Література

1. Forsyth A. A., Ponce J. Computer vision. A modern approach. Second edition–. Pearson Education, 2011. – 792 p.
2. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing (3rd Edition). – Pearson. 2007. – 976 p.
3. Niblack W. An Introduction to Digital Image Processing. – Prentice Hall, 1986. – 215 p.
4. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms.// IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979. – Vol. 9 pp. 62–66.
5. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multi-level Thresholding.//Journal of Information Science and Engineering., 2001. –№17, pp. 713–727.

6. Teslenko M.H. Computer vision system for granulometric analysis of the sample of material. *Науковий вісник будівництва*, т. 90, №4, 2017. – с. 127–131.
7. Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Melleshchenko, A. Kosse Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system// *Східно-Європейський журнал передових технологій*, Vol.1 No12, 2018.– С. 9–17.
8. Голоскоков С.И., Недосекина Н.М., Сазонов М.С., Голоскоков Е.И., Терентьева Н.А. Метод определения смачивающей способности угольной, углепородной пыли растворами поверхностно-активных веществ. *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*, 2014 – с. 99–102.
9. Конюхов В.Ю. Полимеры и коллоидные системы: учебное пособие, М: МГУП, 1999, 101 с.
10. Кудряшов В.В., Соловьева Е.А. Методы оценки пылесмачивающего действия растворов ПАВ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2009. – с. 157–169.
11. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания. М.: Химия, 1976.
12. Ходарев А., Моржин А., Желтов С., Визильтер Ю., Князь В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQVision.– ДМК Пресс, 2016. – 464 с.

Bibliography (transliterated)

1. Forsyth A. A., Ponce J. Computer vision. A modern approach. Second edition–. Pearson Education, 2011. – 792 p.
2. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing (3rd Edition). – Pearson. 2007. – 976 p.
3. Niblack W. An Introduction to Digital Image Processing. – Prentice Hall, 1986. – 215 p.
4. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms.// *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979. – Vol. 9 pp. 62–66.
5. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A Fast Algorithm for Multi-level Thresholding.//*Journal of Information Science and Engineering.*, 2001. –#17, pp. 713–727.
6. Teslenko M.H. Computer vision system for granulometric analysis of the sample of material. *Naukoviy visnik budivnitstva*, t. 90, #4, 2017. – p. 127–131.
7. Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Melleshchenko, A. Kosse Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system// *ShIdno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnology*, Vol.1 No12, 2018.– P. 9–17.
8. Goloskokov S.I., Nedosekina N.M., Sazonov M.S., Goloskokov E.I., Terenteva N.A. Metod opredeleniya smachivayuschey sposobnosti ugolnoy, ugleporodnoy pyili rastvorami poverhnostno-aktivnyih veschestv. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti*, 2014 – p. 99–102.
9. Konyuhov V.Yu. Polimeryi i kolloidnyie sistemyi: uchebnoe posobie, M: MGUP, 1999, 101 p.
10. Kudryashov V.V., Soloveva E.A. Metodyi otsenki pyilesmachivayuscheho deystviya rastvorov PAV. *Gornyy informatсионno-analiticheskiy byulleten*, 2009. – p. 157–169.
11. Summ B.D. Fiziko-himicheskie osnovyi smachivaniya. М.: Himiya, 1976.

12. Hodarev A., Morzhin A., Zheltov S., Vizilter Yu., Knyaz V. Obrabotka i analiz tsifrovyyh izobrazheniy s primerami na LabVIEW i IMAQVision.– DMK Press, 2016.– 464 p.

УДК 004.932.2

Тесленко М. Г., аспірант

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИММЕРСИОННОГО СМАЧИВАНИЯ
МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОТЕКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АЛГОРИТМА АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Статья посвящена разработке автоматизированного метода измерения времени протекания жидкости в трубке с порошком. Данный метод позволяет проводить исследования иммерсионного смачивания с последующим расчетом равновесного краевого угла смачивания. В качестве источника информации для расчетов используется цифровой поток изображений. Для проведения вычислений разрабатывается алгоритм обработки и анализа изображений.

Teslenko Mykhailo, postgraduate student

**AUTOMATION OF THE IMMERSIONAL WETTING MEASUREMENTS BY THE
METHOD OF FLOW TIME MEASUREMENT WITH THE USE OF AN IMAGE
ANALYSIS ALGORITHM**

The article is devoted to the development of an automated method for measuring of the flow time of a liquid in a tube with particulate material. This method is used for immersional wetting analysis with subsequent calculation of the contact angle. The source of information is a stream of digital images. To carry out the calculations an algorithm for image processing and analysis has been developed.