

УДК 665.775

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.110.0.124

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗЧЕПЛЮВАНОСТІ БІТУМІВ З КАМ'ЯНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕННЯ

Пиріг Я. І., Оксак С. В., Бугаєвський С. О., Чугуєнко С. А.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто методіку аналізу результатів визначення зчеплюваності бітумних в'язучих з поверхнею кам'яних матеріалів із використанням цифрового оброблення зображення за допомогою програми ImageJ. Визначено переваги та недоліки запропонованої методіки, а також можливі способи її покращення.

Ключові слова: бітум, зчеплюваність, кам'яний матеріал, цифрове оброблення.

Вступ

Якість асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг та їхня довговічність визначається комплексом різноманітних факторів, одним з яких є забезпечення протягом всього часу експлуатації покриття високої зчеплюваності між бітумним в'язучим і поверхнею всіх кам'яних матеріалів, що належать до складу асфальтобетону. Зниження адгезійних характеристик бітумних в'язучих є причиною потрапляння води до асфальтобетонного шару та його подальшого руйнування (лущення, викришування, утворення вибоїн та ям).

Об'єктивний аналіз зчеплюваності між бітумним в'язучим і кам'яними матеріалами та вживання заходів щодо її підвищення на етапі проектування складу асфальтобетонної суміші є необхідною умовою отримання довговічного асфальтобетонного покриття [1].

Аналіз публікацій

Зараз в Україні діють два національні стандарти, які регламентують методи визначення зчеплюваності між бітумними в'язучими та кам'яними матеріалами – ДСТУ 8787 [2] та ДСТУ EN 12697-11 [3].

Згідно з методом, наведеним у ДСТУ 8787 [2], визначають зчеплюваність між в'язучим та окремими зернами щебеню розміром від 10 мм до 40 мм після кип'ятіння (витримання у воді за температури 95 °С) зразків (30 хв у випадку використання в'язких нафтових дорожніх бітумів або 3 хв у випадку використання рідких нафтових бітумів).

Відповідно до методу обертання пляшки, наведеного в ДСТУ EN 12697-11 [3], визначають зчеплюваність між бітумом і зернами кам'яного матеріалу, розмір яких становить 6,3–10 мм або 8,0–11,2 мм, після механічного

перемішування зі швидкістю 60 хв⁻¹ скляних пляшок зі зразками та дистильованою водою за температури навколишнього середовища (від 15 °С до 25 °С). Зазвичай час механічного перемішування становить 6 год, 24 год або 48 год.

Обидва методи передбачають візуальний аналіз ступеня покриття бітумом поверхні кам'яних матеріалів після випробування. Зокрема в ДСТУ 8787 [2] зазначено, що випробувач після огляду поверхні щебеню візуально (з точністю до 1 %) визначає процент збереження півки бітуму, який за допомогою табличних даних переводять у бали. У методі обертання пляшки аналіз отриманих результатів здійснюють візуальним методом, у процесі якого випробувач з точністю до 5 %, використовуючи наведений в Додатку А ДСТУ EN 12697-11 графічний довідник, візуально визначає ступінь покриття поверхні кам'яних матеріалів бітумом. На відміну від вимог, наведених у ДСТУ 8787, у методі обертання пляшки передбачено, що візуальний аналіз ступеня покриття заповнювача бітумом мають здійснювати незалежно один від одного два випробувача.

Загальним недоліком обох методів є візуальність, а отже, й суб'єктивність аналізу зчеплюваності, завдяки чому значно погіршується точність отриманих результатів та їх відтворюваність. Найбільш сучасним і перспективним засобом підвищення точності результатів є застосування методів цифрового оброблення зображень, що ґрунтуються на використанні комп'ютерних алгоритмів.

На сьогодні відома певна кількість наукових досліджень [4] з розроблення методик цифрового оброблення результатів визначення зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами, в яких використовують різноманітні

підходи, обладнання та програмне забезпечення. Незважаючи на різноманітність таких методик, загальний підхід щодо аналізу результатів випробування зчеплюваності бітумів із кам'яними матеріалами передбачає, по-перше, створення умов для отримання чіткого цифрового зображення зразка після випробування, а по-друге, використання програм для оброблення цифрового зображення.

Значного поширення серед фахівців дорожніх галузей різних країн світу для оброблення й аналізу цифрового зображення дорожніх бітумів, асфальтобетонних сумішей й асфальтобетонів набула комп'ютерна програма ImageJ. На сьогодні її застосовують для вирішення таких завдань:

- аналіз мікроструктури бітуму та бітуму, модифікованого полімером [5–9];
- кількісного аналізу внутрішньої структури та внутрішніх структурних пошкоджень різноманітних видів асфальтобетонів [10–12];
- розподілу регенованого асфальтобетону та повітряних пор в асфальтобетонному зразку [13];
- визначення впливу форми зерен кам'яного матеріалу на фізико-механічні властивості асфальтобетону [14–15];
- аналіз результатів зчеплюваності бітуму з поверхнею кам'яних матеріалів, визначених різноманітними методами [16–22];
- отримання вихідних зображень, які використовуються для глибокого машинного аналізу з метою прогнозування мікроструктури бітумів, модифікованих полімерами [23].

Відповідно до вищезазначеного, актуальним є завдання створення методики аналізу результатів зчеплюваності бітумів із кам'яними матеріалами із застосуванням програми ImageJ для використання фахівцями дорожньої галузі України.

Мета та постановка задачі

Мета роботи полягала в розробленні методики аналізу результатів визначення зчеплюваності дорожніх бітумних в'язучих з поверхнею кам'яних матеріалів за допомогою комп'ютерної програми ImageJ. Для досягнення поставленої мети було здійснено:

- аналіз літературних джерел, де розглянуто використання програми ImageJ для оцінювання зчеплюваності бітумних в'язучих з поверхнею кам'яних матеріалів;
- вибір методики, що може бути використана для аналізу зчеплюваності;
- лабораторну перевірку результатів аналізу зчеплюваності, здійсненої візуальним методом і за допомогою програми ImageJ.

Методика аналізу зчеплюваності бітумів із кам'яними матеріалами

Безпосередньому аналізу зчеплюваності бітумів із кам'яними матеріалами передують отримання цифрового зображення зразка.

Після випробування на зчеплюваність методом обертання пляшки, наведеним у ДСТУ EN 12697-11 [3], або методом, поданим у ДСТУ 8787 [2], зразок у вигляді зерен кам'яного матеріалу з бітумом розташували на білому листі офісного паперу формату А4, шаром в одне зерно.

Отримання цифрового зображення зразка здійснювали після повного випаровування води з поверхні зерен кам'яних матеріалів, що відбувалось після витримання зразка за кімнатної температури (зазвичай зображення отримували на другий день після випробування).

Для одержання зображення використовували лабораторний прилад, що складався з таких елементів:

- металевого лабораторного штатива, на підставці якого розташовували зразок на білому папері;
- на стрижні штатива на відстані в 20 см від підставки закріплювали кільцеву LED лампу діаметром 26 см з нейтральним білим світлом (3500–5000 К) так, щоб зразок було розташовано у внутрішньому діаметрі лампи;
- безпосередньо над кільцевою лампою розташовували смартфон, направлений камерою до зразка.

Використання кільцевої світлодіодної лампи сприяло рівномірному освітленню зерен кам'яного матеріалу, мінімізації затінення й утворення відблисків.

Фотографування зразків здійснювали смартфоном, обладнаним камерою з роздільною здатністю в 64 мегапікселі та світлосилою $f/1,8$.

Для оброблення та аналізу цифрових зображень використовували програму ImageJ. Завдяки тому, що програма має відкритий код та поширюється без ліцензійних обмежень як суспільне надбання, є можливість змінювати її функціональність, підлаштовуючи для вирішення різноманітних вузьких завдань. Значною перевагою програми є те, що вона може працювати на комп'ютерах з усіма операційними системами, зокрема з Windows XP (необхідно лише встановити віртуальну машину Java Virtual Machine версією вище ніж 1.4), а також може бути використана без інсталяції на комп'ютер як веб-додаток (<https://ij.imjoy.io/>) у веббраузері, за

вдяки чому є можливість її використання без прив'язки до певного робочого місця.

Для аналізу зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами важливим є те, що ImageJ дозволяє розраховувати площі та статистичні показники піксельних значень областей зображення, які можуть бути вибрані вручну або за допомогою порогової функції.

Під час оброблення цифрового зображення суміші бітуму з кам'яним матеріалом необхідно здійснити сегментацію, під час якої відбувається відділення зображення кам'яних матеріалів без бітуму від зображення кам'яних матеріалів, вкритих бітумом. Згідно з [19, 20], для сегментації доцільно використовувати метод порогового значення сірого, що дозволяє відокремити об'єкти з потрібним рівнем сірого від решти зображення. Порогове значення створює бінарне зображення, де потрібний рівень сірого дорівнює «1», а всі інші пікселі дорівнюють «0».

Основою для аналізу результатів визначення зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами з використанням програми ImageJ є методика, наведена в [22].

На першому етапі оброблення зображення завантажують до програми ImageJ (рис. 1):

«File» → «Open»...

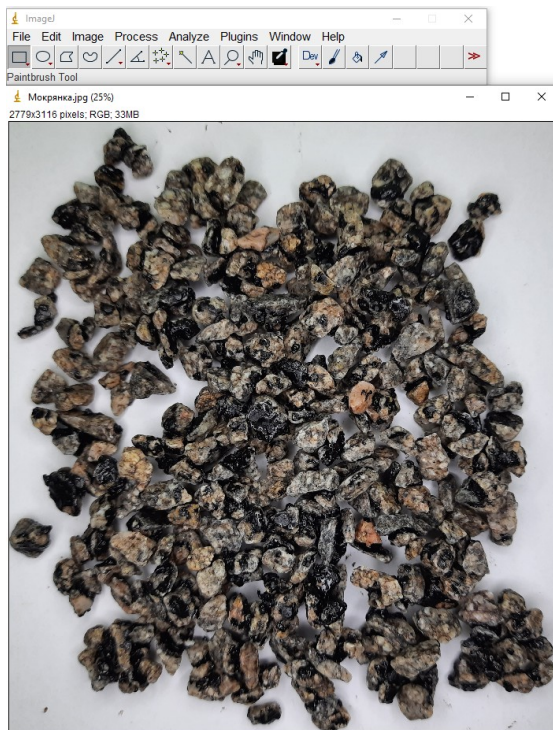


Рис. 1. Вихідне зображення

Після завантаження зображення змінюють його бітність на 8-біт:

«Image» → «Type» → «8-bit».

У процесі такого перетворення отримують зображення в режимі градацій сірого (рис. 2).

Наступним етапом є видалення фону на зображенні (рис. 3):

«Process» → «Subtract Background...», для цього необхідно встановити для функції «Rolling ball radius» значення 20 %.

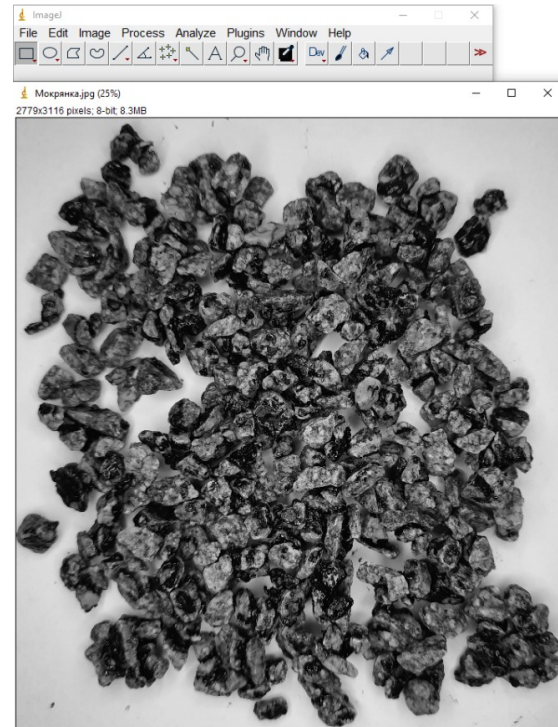


Рис. 2. Зменшення бітності зображення

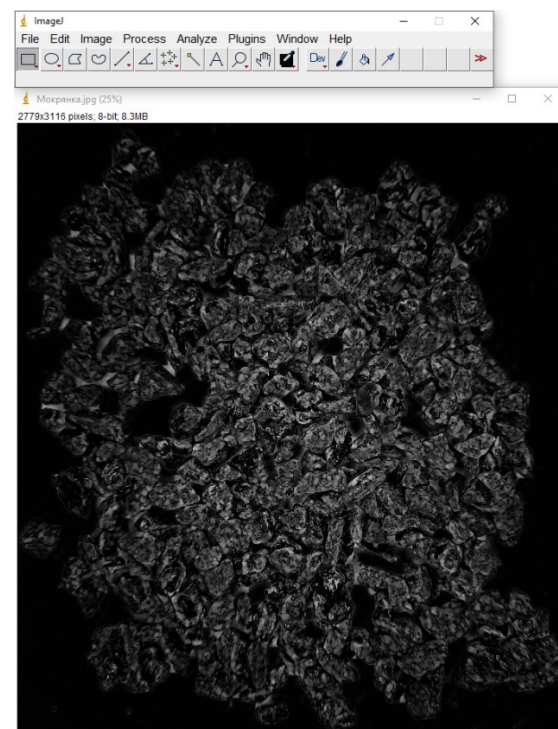


Рис. 3. Видалення фону зображення

Здійснюють налаштування порогового значення:

«Image» → «Adjust» → «Threshold...».

Для більшої точності розділення зображення кам'яних матеріалів, вкритих бітумом, від кам'яних матеріалів, на поверхні яких відсутній бітум, налаштування порогового значення здійснюють вручну, у цьому випадку нижня межа досягається усталеним налаштуванням (залежно від яскравості зображення), а верхня межа становить орієнтовно 20 %, що забезпечує виділення зони відшарування бітуму (рис. 4).

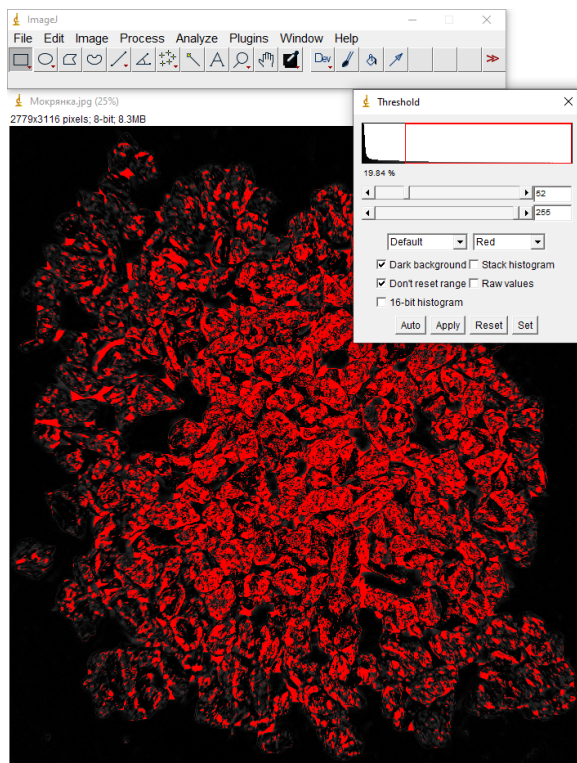


Рис. 4. Налаштування порогового значення

Після позначення червоним кольором зон, на яких відсутній бітум, створюють бінарне зображення (рис. 5), натискаючи «Apply» у віконці «Threshold».

Наступним етапом є аналіз зображення:

- позначення контуру зон з бітумом:

«Analyze» → «Analyze Particles...»,

для цього необхідно виділити опції «Display Results» та «Clear results»;

- вимірювання площі (рис. 6):

«Analyze» → «Measure».

Для підвищення точності визначення площі зчеплюваності бітуму з поверхнею кам'яних матеріалів можна здійснити декілька оброблень зображення одного зразка, перемішуючи зерна кам'яного матеріалу після кожного аналізу. У цьому випадку зчеп-

люваність розраховується як середнє значення зчеплюваності, визначене для кожного аналізу зображення.

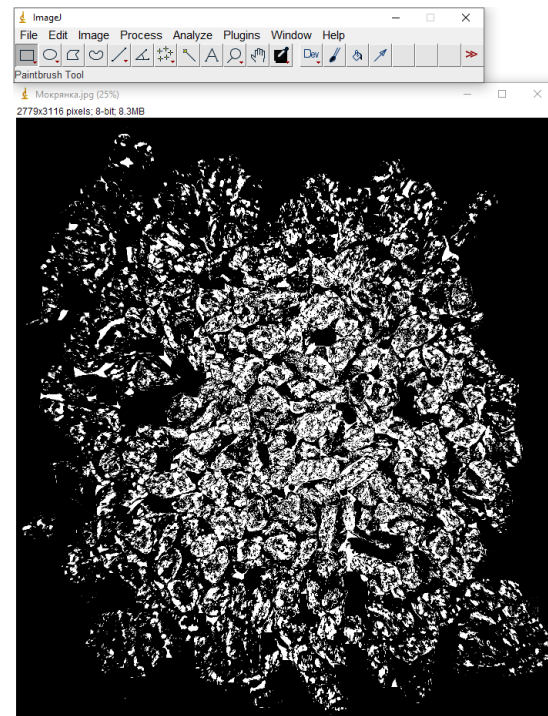


Рис. 5. Бінарне зображення

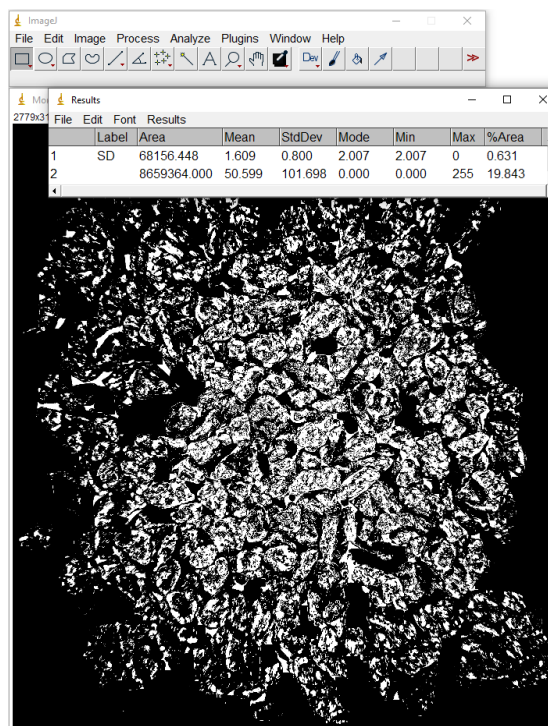


Рис. 6. Визначення площі кам'яних матеріалів, вкритих бітумом

Вищенаведена методика була використана під час аналізу зчеплюваності дорожніх бітумів, виготовлених на нафтопереробних за-

водах країн Європи (Греція, Іспанія, Італія, Азербайджан, Польща, Туреччина, Україна). Дорожні бітуми не були модифіковані адгезійними добавками.

Зчеплюваність визначалась методом обертання пляшки, згідно з ДСТУ EN 12697-11 [3]. Час випробування складав 6 год. Як кам'яні матеріали використовували щебінь фракції 5–10 мм Мокрянського кар'єру, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 7. Вибір цих кам'яних матеріалів обумовлено положеннями СОУ 45.2-00018112-067 [24].



Рис. 7. Зовнішній вигляд кам'яних матеріалів з Мокрянського кар'єру

Після випробування на зчеплюваність отримані результати аналізувалися візуально (середнє значення за результатами аналізу визначалося 4 дослідниками) та за допомогою наведеної методики з використанням програми ImageJ. Подані на рис. 8 результати свідчать про близькість отриманих даних.

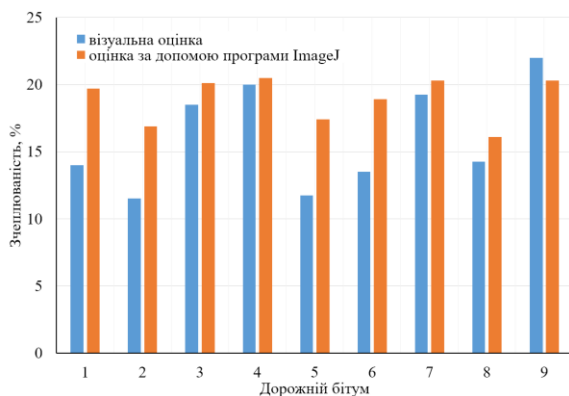


Рис. 8. Порівняння результатів зчеплюваності, визначених візуальним методом та за допомогою програми ImageJ

На жаль, у випадку використання кам'яних матеріалів, зокрема темних мінера-

лів, були отримані значні розбіжності між результатами зчеплюваності, визначеними візуальним методом та за допомогою програми ImageJ (дані, отримані під час програмного аналізу, були значно меншими за дані, отримані під час візуального аналізу).

На основі практичної перевірки вищенаведеної методики визначено її переваги, зокрема такі:

- можливість визначення більш об'єктивного чисельного значення зчеплюваності бітуму з поверхнею кам'яних матеріалів;
- відносно проста завдяки відсутності складного аналізу зображення;
- фінансова доступність завдяки використанню програми для оброблення та аналізу зображення з відкритим вихідним кодом;
- можливість застосування комп'ютерів із різноманітними операційними системами.

Методиці притаманні й недоліки, до яких належать такі:

- певна нерівномірність освітленості зерен кам'яних матеріалів, що призводить до утворення тіней, завдяки чому знижується точність отримуваних результатів;
- наявність відблисків на зернах кам'яних матеріалів, вкритих бітумом;
- встановлення порогового значення вручну, що є суб'єктивним фактором, який може впливати на точність та відтворюваність отримуваних результатів;
- обмеженість сфери використання методики світлими кам'яними матеріалами.

Імовірним способом підвищення рівня точності аналізу зчеплюваності за допомогою програми ImageJ є створення лабораторної установки, яка забезпечить рівномірність освітлюваності всіх зерен кам'яних матеріалів та мінімізує кількість відблисків на зображенні.

Висновки

Наведена методика, основою якої є використання програми ImageJ, є однією з можливих для застосування у вітчизняній дорожній галузі з метою здійснення чисельного аналізу зчеплюваності бітумних в'язучих з кам'яними матеріалами, визначеними стандартизованими методами, наведеними в ДСТУ 8787 [2] та ДСТУ EN 12697-11 [3].

Для підвищення рівня точності та відтворюваності отримуваних результатів необхідне створення лабораторної установки, яка забезпечить рівномірність освітлюваності зразка.

Література

1. Пиріг Я. І., Галкін А. В. *Методи оцінки адгезії та когезії бітумних в'язучих*. Харків: ХНАДУ, 2019. 224 с.
2. ДСТУ 8787:2018. Бітуми та бітумні в'язучі. Метод визначення зчеплюваності зі щебнем. [Чинний з 2019-06-01]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2021. 7 с.
3. ДСТУ EN 12697-11:2018 (EN 12697-11:2012, IDT). Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 11. Визначення зчеплюваності між заповнювачем і бітумом. [Чинний з 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2018. 41 с.
4. Пиріг Я. І., Пиріг Н. Я. Аналіз підходів до кількісного оцінювання зчеплюваності бітумних в'язучих з кам'яними матеріалами за допомогою методів цифрового оброблення зображень. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2025. №. 109. С. 89–104.
5. Time- and composition-dependent evolution of distinctive microstructures in bitumen / X. Yu et al. *Energy & fuels*. 2018. Т. 32. №. 1. Р. 67–80.
6. Sakib N., Bhasin A. Identification of compositional heterogeneity and influence of chemical fractions on surface microstructures through bitumen optical microscopy. *Road Materials and Pavement Design*. 2025. Т. 26. №. 4. Р. 815–840.
7. Optical characterization of temperature- and composition-dependent microstructure in asphalt binders / A. Ramm et al. *Journal of microscopy*. 2016. Т. 262. №. 3. Р. 216–225.
8. Microevolution of polymer-bitumen phase interaction in high-viscosity modified bitumen during the aging of reactive oxygen species / M. Hu et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2023. Т. 11. №. 24. Р. 8916–8930.
9. Jahangir R., Little D., Bhasin A. Evolution of asphalt binder microstructure due to tensile loading determined using AFM and image analysis techniques. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. Т. 16. №. 4. Р. 337–349.
10. Image processing procedure to quantify the internal structure of porous asphalt concrete / K.A. Ahmad et al. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2019. Т. 15. №. 1. Р. 206–226.
11. Hassan N. A., Airey G. D., Hainin M. R. Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis. *Construction and Building Materials*. 2014. Т. 54. Р. 27–38.
12. Estimating asphalt film thickness in asphalt mixtures using microscopy to further enhance the performance of UAE roadways / A. Sukkari et al. *International Road Federation World Meeting & Exhibition*. Springer International Publishing. 2021. Р. 87–96.
13. Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques / N. A. Hassan et al. *Construction and Building Materials*. 2015. Т. 99. Р. 54–61.
14. Correlation between shape of aggregate and mechanical properties of asphalt concrete: Digital image processing approach / S. Arasan et al. *Road Materials and Pavement Design*. 2011. Т. 12. №. 2. Р. 239–262.
15. Aboufoul M., Garcia A. Influence of air voids characteristics on the hydraulic conductivity of asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*. 2017. Т. 18. №. 2. Р. 39–49.
16. Amelian S., Abtahi S. M., Hejazi S. M. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis. *Construction and Building Materials*. 2014. Т. 63. Р. 294–302.
17. Stripping at the bitumen-aggregate interface: a laboratory method To assess the loss of chemical adhesion / J. Vinet-Cantot et al. *Energy & Fuels*. 2019. Т. 33. №. 4. Р. 2641–2650.
18. Use of image analysis for the evaluation of rolling bottle tests results / C. Lantieri C. et al. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. Т. 10. №. 1. Р. 45–53.
19. Riekstins A., Haritonovs V., Balodis A. Evaluation of adhesion between bitumen and aggregate with the digital image processing method. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. 2019. Т. 660. №. 1. Р. 1–8.
20. Blom J., Soenen H., Porot L. Determination of bitumen coverage, after the rolling bottle test, by a digital image processing method. *Proceedings of the 7th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. v 1. 1, 15th–17th June, 2021. Р. 1–11.
21. Semi-automatic evaluation of the degree of bitumen coverage on bitumen-coated aggregates / R. Lamperti et al. *8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials*. Springer Netherlands, 2016. Р. 15–24.
22. Evaluation of the Adhesion between Aggregate and Asphalt Binder Based on Image Processing Techniques Considering Aggregate Characteristics / M. Li et al. *Materials*. 2023. Т. 16. №. 14. Р. 1–16.
23. Application of deep learning for characterizing microstructures in SBS modified asphalt / E. Zhang et al. *Materials and Structures*. 2024. Т. 57. №. 6. Р. 134–141.
24. СОУ 45.2-00018112-067:2011. Бітуми дорожні в'язкі, модифіковані добавками адгезійними. Технічні умови. [Чинний з 2011-09-01]. Київ: ДП ДерждорНДІ. 2011. 17 с.

References

1. Pyrig, Y. I., & Galkin, A. V. (2019). *Metody ocinky adgeziyi ta kogeziyi bitumnyx vyazhuchyx* [Methods for evaluating the adhesion and cohesion of bitumen binders]. Kharkiv: KhNADU. 224.
2. Bitumy ta bitumni viazhuchi. Metod vyznachennia zchepliuvanosti zi shebнем [Determination of adhesion with crushed stone]. (2019). *DSTU 8787:2018 from 1st January 2019*. Kyiv: UkrNDNTs, 2021. 7 p.

3. Bitumomineralni sumishi. Metody vyprobuвання hariachykh asfaltobetonnykh sumishei. Chastyna 11. Vyznachennia zchepliuvanosti mizh zapovniuvachem i bitumom. [Bituminous mixtures. Test methods. Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen]. (2020). *DSTU EN 12697-11:2018 from 1st January 2020*. Kyiv: UkrNDNTs. 41 p.
4. Pyrig, Y. I., & Pyrig, N. Y. (2025). Analysis of approaches to quantitative assessment of bitumen binders adhesion to stone materials using digital image processing methods. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*. №. 109. P. 89–104. [in Ukrainian].
5. Yu, X., Granados-Focil, S., Tao, M., & Burnham, N. A. (2018). Time-and composition-dependent evolution of distinctive microstructures in bitumen. *Energy & fuels*, 32(1). 67–80.
6. Sakib, N., & Bhasin, A. (2025). Identification of compositional heterogeneity and influence of chemical fractions on surface microstructures through bitumen optical microscopy. *Road Materials and Pavement Design*. 26(4). 815–840.
7. Ramm, A., Sakib, N., Bhasin, A., & Downer, M. C. (2016). Optical characterization of temperature-and composition-dependent microstructure in asphalt binders. *Journal of microscopy*. 262(3). 216–225.
8. Hu, M., Hofko, B., Sun, D., Mirwald, J., Hofer, K., Eberhardsteiner, L., & Lu, T. (2023). Microevolution of polymer–bitumen phase interaction in high-viscosity modified bitumen during the aging of reactive oxygen species. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 11(24). 8916–8930.
9. Jahangir, R., Little, D., & Bhasin, A. (2015). Evolution of asphalt binder microstructure due to tensile loading determined using AFM and image analysis techniques. *International Journal of Pavement Engineering*. 16(4). 337–349.
10. Ahmad, K. A., Abdul Hassan, N., Abdullah, M. E., Bilema, M. A., Usman, N., Al Allam, A. M., & Hainin, M. R. B. (2019). Image processing procedure to quantify the internal structure of porous asphalt concrete. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 15(1). 206–226.
11. Hassan, N. A., Airey, G. D., & Hainin, M. R. (2014). Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis. *Construction and Building Materials*. 54. 27–38.
12. Sukkari, A., Al Khateeb, G., Ziada, W., & Ezzat, H. (2021 November). Estimating asphalt film thickness in asphalt mixtures using microscopy to further enhance the performance of UAE roadways. In *International Road Federation World Meeting & Exhibition*. Springer International Publishing. 87–96.
13. Hassan, N. A., Khan, R., Raaberg, J., & Presti, D.L. (2015). Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques. *Construction and Building Materials*. 99. 54–61.
14. Arasan, S., Yenera, E., Hattatoglu, F., Hinislioglu, S., & Akbuluta, S. (2011). Correlation between shape of aggregate and mechanical properties of asphalt concrete: Digital image processing approach. *Road Materials and Pavement Design*, 12(2). 239–262.
15. Aboufoul, M., & Garcia, A. (2017). Influence of air voids characteristics on the hydraulic conductivity of asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*. 18(sup2). 39–49.
16. Amelian, S., Abtahi, S. M., & Hejazi, S. M. (2014). Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis. *Construction and Building Materials*. 63. 294–302.
17. Vinet-Cantot, J., Gaudefroy, V., Delfosse, F., Chailleux, E., & Crews, E. (2019). Stripping at the bitumen–aggregate interface: A laboratory method To assess the loss of chemical adhesion. *Energy & Fuels*. 33(4). 2641–2650.
18. Lantieri, C. et al. (2017). Use of image analysis for the evaluation of rolling bottle tests results. *International Journal of Pavement Research and Technology*. T. 10. №. 1. 45–53.
19. Riekstins, A., Haritonovs, V., & Balodis, A. (2019). Evaluation of adhesion between bitumen and aggregate with the digital image processing method. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*. T. 660. №. 1. P. 1–8.
20. Blom, J., Soenen, H., & Porot, L. (2021). Determination of bitumen coverage, after the rolling bottle test, by a digital image processing method. Proceedings of the 7th Eurasphalt & Eurobitume Congress v. 1, 15th–17th June, P. 1–11.
21. Lamperti, R. et al. (2016). Semi-automatic evaluation of the degree of bitumen coverage on bitumen-coated aggregates. 8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials. *pringer Netherlands*. P. 15–24.
22. Li, M. et al. (2023). Evaluation of the Adhesion between Aggregate and Asphalt Binder Based on Image Processing Techniques Considering Aggregate Characteristics. *Materials*. T. 16. №. 14. P. 1–16.
23. Zhang, E., Shan, L., Guo, Y., & Liu, S. (2024). Application of deep learning for characterizing microstructures in SBS modified asphalt. *Materials and Structures*, 57(6). 134–141.
24. Bitumy dorozhni viazki, modyfikovani dobavkamy adheziinymy. Tekhnichni umovy [Road bitumen, modified with adhesive additives. Specifications]. *SOU 45.2-00018112-067:2011 from 1st July 2011*. Kyiv: M.P. Shulgin State Road Research Institute State Enterprise. 2011. 17 p.

Пиріг Ян Іванович, к.т.н., ст. наук. співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів, тел. + 380984466268, pirig2000@gmail.com.
Оксак Сергій Володимирович, к.т.н., професор кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів, тел. +380667152752, sv.oksak@gmail.com.

Бугаєвський Сергій Олександрович, д.т.н., професор кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В. О. Російського, тел. +380509379016, bugaevskiy-sa@gmail.com,

Чугуєнко Сергій Анатолійович, к.т.н., доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг, тел. +380974651475, chuguenko@gmail.com.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна.

Evaluation of the results of determining the adhesion of bitumen to stone materials using the digital image processing method

Abstract. Problem. Objective assessment of the adhesion between bituminous binder and stone materials and taking measures to improve it at the design stage of the asphalt concrete mixture composition is a prerequisite for obtaining a durable asphalt concrete pavement. Currently, in the domestic road industry, only visual methods are used to assess the adhesion of bitumen to stone materials, which significantly reduces the accuracy and reproducibility of the results obtained. At the same time, there are known methods of digital image processing based on the use of computer algorithms that allow for a significant increase in the accuracy of adhesion assessment.

Goal. The aim of the work was to develop a method for evaluating the results of determining the adhesion of road bituminous binders to the surface of stone materials using the ImageJ computer program. **Methodology.** To achieve this goal, an analysis of literature sources devoted to the use of the ImageJ programme to assess the adhesion of bituminous binders to the surface of stone materials, a methodology was selected that can be used to assess adhesion, and laboratory verification of the adhesion assessment results was carried out using a visual method and the ImageJ programme. **Results.** The accepted method

for evaluating the adhesion of bitumen to stone materials was used to evaluate the adhesion of road bitumen produced at oil refineries in various European countries (Greece, Spain, Italy, Azerbaijan, Poland, Turkey, Ukraine) using the bottle rotation method. It was established that the method used allows for a fairly accurate assessment of the adhesion of bituminous binders to stone materials represented by light minerals. **Originality.** The advantages and disadvantages of the proposed methodology have been identified, as well as possible ways to improve it. **Practical value.** The presented methodology, based on the use of the ImageJ programme, is one of the possible methods for use in the domestic road industry to establish a numerical assessment of the adhesion of bituminous binders to stone materials, determined by domestic standardised methods. To improve the accuracy and reproducibility of the results obtained, it is necessary to create a laboratory setup that will ensure uniform illumination of the sample.

Keywords: bitumen, adhesion, stone materials, digital processing.

Pyrig Yan, Ph.D. (Eng.), S. Researcher, Department of technology of road-construction materials, tel. + 380984466268, pirig2000@gmail.com,

Oksak Serhii, Ph.D. (Eng.), Professor, Department of technology of road-construction materials, tel. +380667152752, sv.oksak@gmail.com,

Buhaievskiy Serhii, professor, Doct. of Science, Professor, Department of bridges, construction and building mechanics, tel. +380509379016, bugaevskiy-sa@gmail.com,

Chuguenko Serhii, PhD (Eng.), Associate Professor Department of Construction and Operation of Highways, tel. +380974651475, chuguenko@gmail.com. Kharkiv National Automobile and Highway University, 61002, Ukraine, Kharkiv, Yaroslava Mudroho str., 25.