

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО КІЛЬКІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЗЧЕПЛЮВАНOSTІ БІТУМНИХ В'ЯЖУЧИХ З КАМ'ЯНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Пиріг Я. І.¹, Пиріг Н. Я.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Харківський національний університет радіоелектроніки

Анотація. У статті розглянуто підходи до кількісного оцінювання зчеплюваності бітумних в'язучих з кам'яними матеріалами, що здійснюються за допомогою методів цифрового оброблення зображень. Установлено основні умови отримання якісного зображення бітумомінерального матеріалу, випробуваного одним зі стандартних методів визначення адгезії. Розглянуто підходи до вибору умов освітлення зразків кам'яних матеріалів, а також наявні методи оброблення зображень.

Ключові слова: бітум, зчеплюваність, кам'яні матеріали, зображення, цифрове оброблення.

Вступ

Асфальтобетон є багатокомпонентним матеріалом, що містить заповнювачі (щебінь різних фракцій, відсів та/або пісок), наповнювач, бітумне в'язуче (нафтовий бітум або модифіковане бітумне в'язуче) та, за необхідності, різноманітні добавки.

Основним складником асфальтобетону є бітумне в'язуче, відносно незначна кількість якого забезпечує поєднання всіх мінеральних компонентів у єдиний матеріал із заданими міцнісними показниками, водостійкістю та довговічністю. Однією з основоположних властивостей нафтових бітумів, що використовують як в'язуче в складі асфальтобетону, є зчеплюваність, тобто якісна чи кількісна оцінка прилипання бітумного в'язучого до поверхні кам'яного матеріалу. Залежно від цього показника приймається рішення щодо доцільності застосування тих чи інших вихідних матеріалів (бітуму та заповнювачів), необхідності використання адгезійних добавок та визначення їх концентрації, а також прогнозування довговічності дорожнього покриття.

Аналіз публікацій

Нині відомо понад 150 різноманітних методів визначення зчеплюваності бітумів із поверхнею кам'яними матеріалами, що застосовуються в дорожніх галузях різних країн світу [1].

У цьому разі найбільш поширеними є методи, ґрунтовані на встановленні опору відшаровувальної дії води. Популярність зазначених методів зумовлена: конструктивною простотою приладів і методів випробування; врахування основного фактора, що призво-

дить до інтенсивного зниження зчеплюваності в умовах експлуатації – води; можливість моделювання різноманітних умов випробування (вибір різних фракцій заповнювачів або випробування на асфальтобетонній суміші, варіювання часу й температури випробування тощо).

Загальним принципом визначення зчеплюваності методами, ґрунтованими на встановленні опору відшаровувальної дії води, є витримування зразка у вигляді бітумомінеральної (зерна заповнювача однієї фракції, оброблені бітумним в'язучим) або, рідше, асфальтобетонної суміші впродовж певного часу (від 3 хв до декількох діб) у воді із заданою температурою (від 25 °С до 95 °С). Найбільш прийнятними умовами випробування є температура 60–95 °С і час випробування від 30 хв до 1 год.

Поширеними представниками методів визначення зчеплюваності, ґрунтованих на оцінюванні опору відшаровувальної дії води, є:

- *Boiling Water Test* (стандартизований в США як ASTM D 3625), згідно з яким 250 г асфальтобетонної суміші витримують в 1 л дистильованої води з температурою не нижчою ніж 85 °С впродовж 10 хв [2]. Аналогом цього методу можна вважати вітчизняний метод, описаний в ДСТУ Б В.2.7-319 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань», або загальноєвропейський метод «Спосіб відшарування кип'ятінням у воді», наведений в ДСТУ EN 12697-11 [3];

- *Texas boiling test*, згідно з яким 300 г асфальтобетонної суміші або 100 г окремої фракції заповнювача, обробленого бітумом,

витримують упродовж 10 хв у киплячій дистильованій воді;

- методи, в яких окремі зерна заповнювача, оброблені в'язким, підвішені на нитці або тонкому дроті, витримують упродовж певного часу в киплячій дистильованій воді. Аналогами є вітчизняний метод, описаний в ДСТУ 8787 [4], *Chinese Water Boiling Test* [5] та інші подібні;

- метод обертання пляшки, поданий в ДСТУ EN 12697-11 [3], згідно з яким вузькофракційний заповнювач (розміром 6,3–10 мм або 8,0–11,2 мм), оброблений бітумним в'язким, піддається витримуванню в дистильованій воді за кімнатної температури з постійним перемішуванням способом обертання скляної пляшки з випробуванням матеріалом навколо своєї осі.

Основним недоліком майже всіх методів визначення зчеплюваності, оснований на встановленні опору відшаровувальної дії води, є візуальність оцінювання площі поверхні кам'яних матеріалів, укритих бітумним в'язким після випробування. Зазвичай результати візуальної оцінки виражають у відсотках площі, що залишилась вкритою бітумним в'язким після випробування. У цьому разі «будь-які тонкі, коричневі, напівпрозорі ділянки частинок заповнювача вважаються повністю вкритими бітумом» [3].

Суб'єктивність оцінювання отриманих результатів (залежить від умов навколишнього середовища, освітленості, кваліфікації та психоемоційного стану фахівця, який здійснює оцінювання, тощо) суттєво позначається на їх точності та відтворюваності. В наявному вигляді система оцінки може бути використана лише для якісного оцінювання зчеплюваності бітумних в'язких (задовільна чи незадовільна).

З метою підвищення точності оцінювання на практиці застосовують графічні шаблони або текстові описи еталонного зовнішнього вигляду зерен наповнювача, але суттєво це не впливає на точність оцінки. Виходом із ситуації, що склалась, є розроблення методів кількісного оцінювання результатів випробування зчеплюваності бітумів із кам'яними матеріалами з використанням методів цифрового оброблення зображення. Це забезпечить об'єктивність оцінювання отримуваних результатів та сприятиме підвищенню їх точності.

Процедура оцінювання зчеплюваності за допомогою методів цифрового оброблення зображення передбачає дві частини:

1) забезпечення отримання чіткого зображення результатів визначення зчеплюваності бітумних в'язких з поверхнею кам'яних матеріалів;

2) безпосереднє оцінювання результатів випробування.

Виконання цих двох частин однієї проблеми є актуальним завданням для дорожньої галузі.

Мета й постановка завдання

Мета виконаної роботи полягала в аналізі наявних методів кількісного оцінювання зчеплюваності в'язких з кам'яними матеріалами за допомогою методів цифрового оброблення зображення. Для досягнення поставленої мети проаналізовано зарубіжні літературні джерела, присвячені питанню оцінювання зчеплюваності бітумних в'язких.

Загальні положення отримання якісного зображення зразка

Кількісне оцінювання результатів зчеплюваності бітумних в'язких з кам'яними матеріалами за допомогою комп'ютеризованих систем здійснюють способом оброблення попередньо отриманого зображення випробуваної бітумомінеральної або асфальтобетонної суміші (далі зразка).

Процедура передбачає три етапи: якісне освітлення зразка, отримання зображення та його оброблення.

Основними факторами, що впливають на отримання якісного зображення, є освітлюваність зразка та відбивна здатність його поверхні.

Критеріями вибору освітлюваності зразка є можливість отримання чіткого зображення, яке може бути під час подальшого комп'ютерного оброблення сегментоване, та запобігання утворенню відблисків на поверхні плівки бітуму.

Для покращення сегментації зображення зазвичай використовують однорідний фон (наприклад, зеленого або синього кольору за аналогією, прийнятою в технології *Chroma key*), на якому розташовують випробуваний зразок. Завдяки цьому під час подальшого оброблення зображення можна збільшити точність відокремлення зразка від фону основи, на якій він розташований.

Відбивна здатність поверхні зразка визначається його шорсткістю та шириною потоку випромінюваного світла (рис. 1):

- зі зниженням шорсткості поверхні збільшується ступінь дзеркального відбиття;

- у разі використання природного розсіяного світла його частина не потрапляє на матрицю фотокамери, через що прийнята інтенсивність світла є меншою, ніж фактична (тобто коефіцієнти віддзеркалювання світла у бітуму та кам'яного матеріалу є близькими), що призводить до некоректної сегментації зображення.

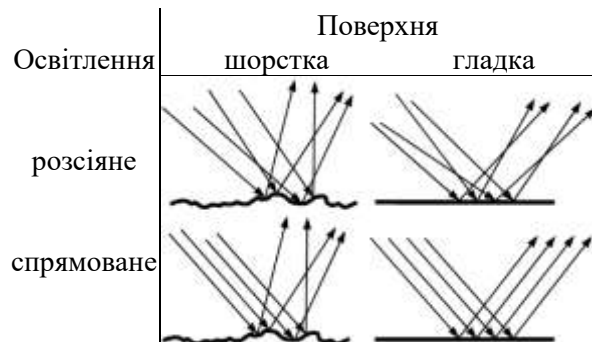


Рис. 1. Різниця в освітленні зразка [6]

Важливим фактором підвищення точності результатів оцінювання зчеплюваності є усунення відблисків на поверхні зерен кам'яних матеріалів, вкритих бітумом, оскільки під час подальшого оброблення ділянки з відблисками зазвичай належать до площі, не вкритої бітумом. Можливі два способи розв'язання проблеми відблисків світла на поверхні плівки бітуму:

- створення спеціальних умов освітлення випробуваного зразка під час фото- або відеозйомки;

- усунення світлової рефракції за допомогою програмного забезпечення для оброблення зображень.

З огляду на вищенаведене найбільш придатними умовами для отримання якісного зображення зразка є використання джерела інтенсивного спрямованого світла із забезпеченням уникнення впливу природного розсіяного світла та відблисків на поверхні бітуму.

Підходи до освітлення зразків

Найпростіші способи освітлення не передбачають використання складного обладнання, а орієнтовані на застосування побутових освітлювальних пристроїв. У працях [7, 8] для фотографування зразка використовували: дві настільні лампи, розташовані так, щоб світло падало на поверхню зразка під кутом 45° (це запобігало утворенню прямих віддзеркалень та відблисків); підкладку зеленого кольору та пласку скляну ємність, запо-

внену деіонізованою водою, в якій розмістили зразок (рис. 2). Зображення зразка отримували за допомогою цифрової фотокамери (10 Мп, ISO 100), яку розташовували на відстані 30 см від поверхні зразка. Зелений фон та вода забезпечували контраст між кам'яними матеріалами, водою та фоном, що спрощувало сегментацію зображення.

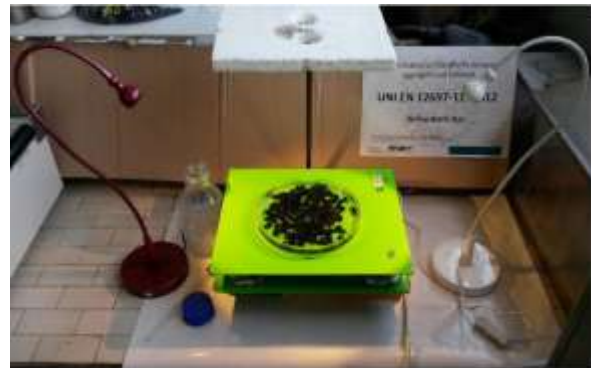


Рис. 2. Схема установки для фотографування зразка [7, 8]

Незважаючи на простоту конструкції, автори змогли отримати високоякісне зображення зразків, виготовлених як на світлих, так і темних кам'яних матеріалах.

Доволі поширеною практикою в отриманні якісного зображення зразків є використання спеціальних умов освітлення. Так, наприклад, у роботі [9] для отримання зображення зразка застосовували відбите світло та фотокамеру з поляризаційним фільтром (рис. 3).



Рис. 3. Схема отримання зображення зразка з використанням поляризаційного фільтра [9]

За допомогою застосування таких засобів автори праці [9] змогли позбутися відблисків світла й застосувати більш сильний фотоспалах, що зі свого боку позначилось на чіткості зображення текстури поверхні зразка. Крім

цього, щоб отримати більш чітке зображення, автори роботи [9] рекомендували використовувати певні налаштування цифрової фотокамери: фокусна відстань має бути більшою ніж 50 мм; ISO (параметр чутливості до світла світлочутливого елемента матриці камери) має бути якомога нижчим, що дасть змогу зменшити шум на зображенні; діафрагма має бути достатньо великою, щоб забезпечити достатню глибину зображення.

Для забезпечення рівномірного освітлення зразків дослідники зі Швеції [10–12] запропонували використовувати поворотний стіл, на якому розташовували кам'яні матеріали після випробування зчеплюваності. Освітлення зразків здійснювали за допомогою нерухомого джерела світла, розташованого над поворотним столом (під час модифікації установки прямолінійна форма джерела світла була змінена на криволінійну, внаслідок чого зразки отримали освітлення одночасно зверху та збоку) (рис. 4).

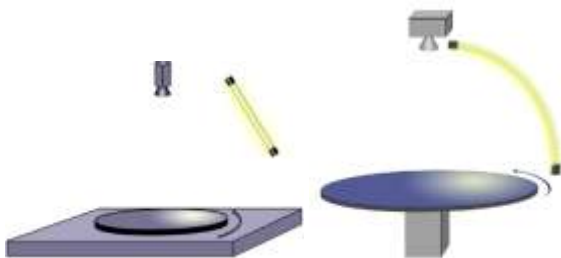


Рис. 4. Освітлення поворотного столика зі зразками в [10, 11]

Для спрощення сегментації об'єктів під час оброблення зображення застосовували синій або зелений фон поверхні поворотного столика [10, 11]. Для кожного зразка знімали серію з 20–30 зображень, отриманих за допомогою повороту столика на 10° . Перше зображення використовували як основне, а інші перетворювали з використанням принципів гомографії, застосовуючи чотири ключові маркери у вигляді невеликих шахових візерунків (рис. 5).

Крім цього, на столику розташовували калібрувальну лінійку, що містить три частини білого, світло-сірого та темно-сірого кольору для налаштування інтенсивності сірого кольору.

Принципово інший підхід до освітлення зразків запропонував С. Mulsow [6], згідно з яким джерелом світла використовували лазерний світлодіод з хвилею завдовжки 660 нм. Завдяки різниці в шорсткості поверхні кам'яних матеріалів (мікрошорстка) та бітуму

(практично гладка) відбиття світла від цих матеріалів суттєво розрізняється (розсіяне в разі кам'яного матеріалу та дзеркальне для бітуму).

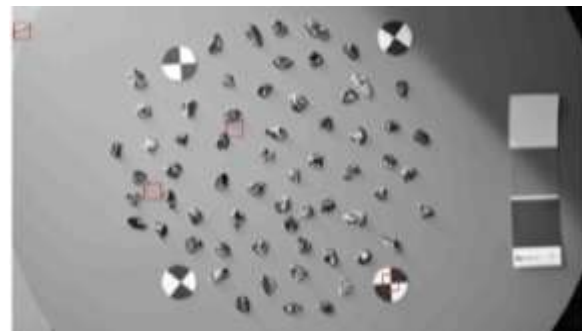


Рис. 5. Застосування маркерів для визначення положення кам'яних матеріалів (Н. Kallen) [2]

З огляду на це за умови застосовування джерелом світла лазера різниця в поведінці світла, що відбивається, значно збільшується, що сприяє підвищенню точності оцінювання зчеплюваності в'язучих з темними кам'яними матеріалами (рис. 6).



Рис. 6. Розташування освітлювальних елементів і зображення зразка, отримане в умовах денного світла (ліворуч) та освітлене лазерним світлодіодом (праворуч) [6]

Для отримання зображення зразка використовували монохромну камеру відеоспостереження з роздільною здатністю 1280×960 пікселів та кадровою частотою 15 кадрів за секунду. Оскільки із застосуванням лазерного світлодіода можна отримати лише вузько-освітлену смугу завширшки ~ 1 см, під час отримання зображення лазерний модуль, що мав два джерела, які утворювали ортогональне освітлення, обертався навколо осі та переміщувався над зразком. Отримані вузькосмугові фотографії об'єднували в єдине зображення за допомогою *maxstore*-алгоритму.

Світлодіодне освітлення для отримання зображення зразка застосовано й у роботі [13]. Автори для освітлення кам'яних матеріалів використовували червоні світлодіоди з

хвилею завдовжки 660 нм, унаслідок чого бітум, який має чорний колір, поглинав більшу кількість світла, ніж кам'яні матеріали. Для рівномірного освітлення було сконструйовано прямокутну камеру розмірами $30 \times 30 \times 36$ см, що давало змогу вміщувати близько 100 г кам'яних матеріалів фракції 5–10 мм. На рис. 7 подано схему камери з світлодіодами, що розташовували на платах розміром 150×100 мм (три ряди по 19 діодів із відстанню між рядами 4 см) та закріплювали на всіх бокових стінках камери.

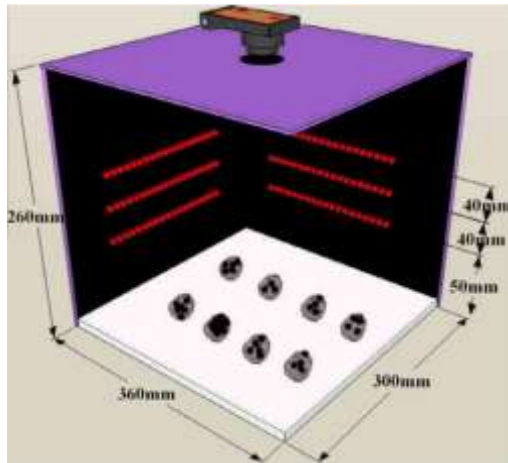


Рис. 7. Камера для зйомки зразка з використанням світлодіодів [13]

Внутрішні стінки камери мали чорний колір, завдяки чому зменшувалось розсіювання відбитого світла та збільшувалась контрастність між бітумом і поверхнею кам'яних матеріалів. Основа, на якій розташовували зразки, мала білий колір, завдяки чому зразку був властивий високий кольоровий контраст. Завдяки прийнятому кольоровому оформленню на зображенні бітум виглядав чорним, поверхня кам'яного матеріалу була червоною, а біла основа – помаранчевою, що суттєво полегшувало сегментацію зображення.

У роботі [14] для отримання зображення зразка також використовували спеціально сконструйовану камеру у вигляді усіченого конуса з напівпрозорого матеріалу, де на меншій основі розташовували фотокамеру, а на більшій – зразок.

Освітлення здійснювали непрямым світлом, розподіленим навколо зовнішньої поверхні камери, за допомогою чого забезпечувалось рівномірне освітлення зразка без тіней, відблисків і віддзеркалень на поверхні бітуму. Внутрішня поверхня камери та основа, на якій розташовували зразки, мали голубий колір, завдяки чому спрощувалось про-

грамне вилучення фону та оброблення зображення.

Камери на сучасних смартфонах за своїми властивостями сягають рівня професійних цифрових фотокамер. Завдяки цьому все частіше для фотозйомки зразків надають перевагу смартфонам.

У праці [15] запропоновано порівняльні результати оцінювання зображень, отриманих за допомогою професійної фотокамери *Canon EOS 600D* (18 Мп *APS-C CMOS*-матриця) та бюджетного смартфона *Huawei P9* з камерою 13 Мп. Незважаючи на менш якісне зображення, отримане за допомогою камери смартфона, різниця між значеннями площ кам'яних матеріалів, вкритих бітумом, розрахованих після оброблення зображень, виконаних фотокамерою та смартфоном, у середньому становила 4–8 %.

Для отримання зображення зразка використовували сконструйовану установку, зовнішній вигляд якої подано на рис. 8.

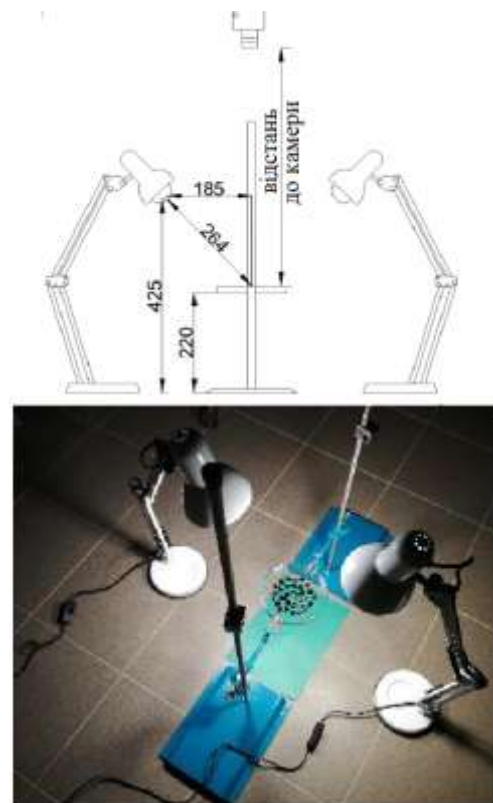


Рис. 8. Зовнішній вигляд та розміри установки для отримання зображення зразка [15]

Установка містила: два штативи для утримання камери та зразка; два джерела світла з LED-лампами; чашку Петрі з водою, де розміщували зразок; зелений папір, що використовували як фон.

Фотографували в кімнаті з повною відсутністю зовнішнього освітлення. Після розташування зразка в чашці Петрі її наповнювали водою (вода сприяла розсіюванню світла) та фотографували, після чого зерна кам'яного матеріалу перевертали вручну та фотографували повторно. Унаслідок цього для кожного зразка отримували по шість світлин. Такий підхід можна вважати суттєвою перевагою описаної методики, оскільки, на відміну від інших методів, де отримують і надалі обробляють лише один бік кам'яних матеріалів, автори праці [15] обробляли фотографії всіх боків зерен кам'яного матеріалу, що підвищує точність досягнутих результатів.

Науковці з Бразилії в роботі [16] для фотографування кам'яних матеріалів застосовували смартфон *Samsung Galaxy S20*, камера якого завдяки високій роздільній здатності забезпечувала отримання чіткого зображення. Зразки перед фотографуванням розташовували на зеленому фоні, що забезпечувало кращу контрастність зображення та полегшувало сегментацію об'єктів під час його оброблення. Для мінімізації відблисків і тіней використовували рівномірне освітлення.

У роботі [17] для отримання зображення зразка автори використовували сконструйовану установку, в якій фотографували безпосередньо за допомогою смартфона (рис. 9).

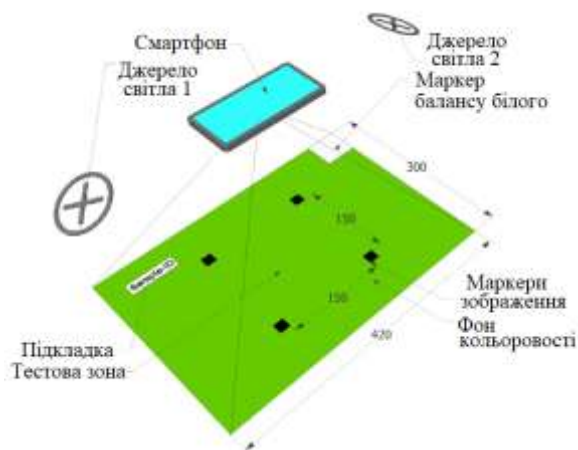


Рис. 9. Схема установки для отримання зображення зразка, прийнята в роботі [17]

Для освітлення використовували два джерела світла, що забезпечувало рівномірність освітлення всієї площі зразка. Особливістю запропонованої установки є застосування калібрувальних маркерів (білого та чорного кольору) з відомою відстанню між ними, завдяки чому в процесі оброблення зображення спрощувався процес його сегментації.

Автори роботи [18] для фотографування кам'яних матеріалів сконструювали установку, яка містила алюмінієву раму, покриття для відсікання зовнішнього освітлення, світлодіодні джерела світла та цифрову камеру з монохромним *CMOS*-сенсором (рис. 10). Прийняте біле освітлення й білий фон забезпечували отримання зображення з високим контрастом між фоном і зразком, а також мінімізували кількість відблисків і тіней.

Перед початком фотографування зразків здійснювали калібрування програмного забезпечення. Для цього застосовували шаблони жовто-чорного кольору, зображені на рис. 11 (жовтий імітував колір кам'яних матеріалів, а чорний – колір бітуму), для яких були відомі відсотки покриття чорним кольором (25 %, 50 % та 100 %).

Установка дає змогу отримувати зображення як окремих зерен, так і груп зерен кам'яних матеріалів.

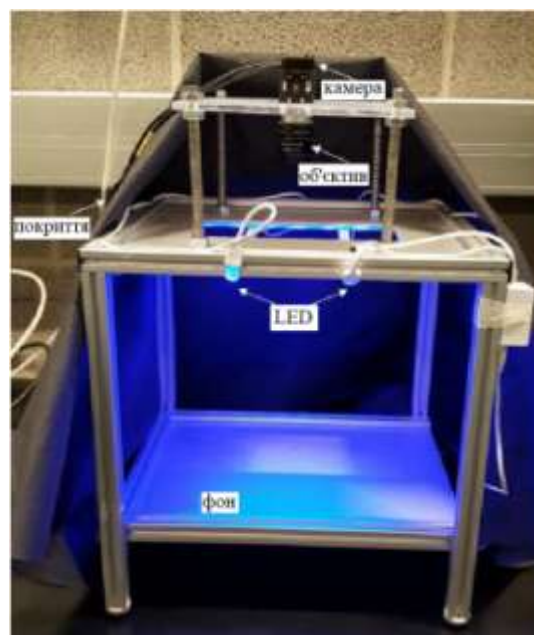


Рис. 10. Установка для фотографування зразка [18]

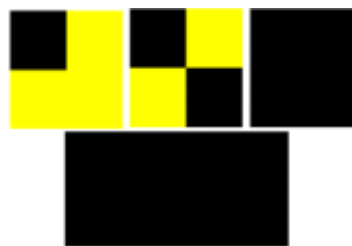


Рис. 11. Шаблони для калібрування [18]

Більш складна камера для отримання зображення зразка запропонована в роботі [19].

Автори створили мультисенсорну платформу (рис. 12), що містить: цифрову камеру високої роздільної здатності, яка розташовувалась на відстані 50 см над поверхнею зразка; дві гіперспектральні камери – *VIS-NIR* (400–1000 нм) та *SWIR* (900–1700 нм) для визначення кількості світла, що пройшло крізь зразок, і кількості відбитого світла; конвеєрну стрічку з чорно-білими мітками, розташовану в алюмінієвій конструкції, завдяки якій зразки переміщувалися з постійною швидкістю під різними сенсорами; дві галогенові лампи потужністю 250 Вт кожна; ноутбук для оброблення зображення та збереження інформації. Для калібрування освітлення використовували білий еталон у вигляді панелі з високощільного фторопласту. Панель – це ламбертівська, тобто шорстка, поверхня, що відбивала світло однаково в усіх напрямках, незалежно від напрямку падаючого світла.



Рис. 12. Трисенсорна платформа для отримання зображення зразка [19]

Завдяки використанню гіперспектральних камер автори дослідження [19] отримували зі швидкістю 25 кадрів за секунду гіперспектральне зображення – гіперкуби (тривимірний набір, в якому два показники визначали просторові координати точки зображення, а третій показник був спектральним виміром).

Ще більш складна установка (рис. 13) у вигляді апаратно-програмного комплексу використана в роботі [20]. Комплекс містив: алюмінієвий корпус (1) розміром $519 \times 394 \times 445$ мм, у якому розташована ізолювана від зовнішнього світла внутрішня

камера (2); висувний лоток (3) на передній панелі для розміщення підкладки (4) зі зразками; підкладку з маркуванням зони розміщення зразків і зони калібрування кольору; USB-камеру (8), керовану мікрокомп'ютером *Nvidia Jetson Nano* (10); вісім світлодіодів (9), розташованих під різними кутами щодо зразків (під час фотозйомки джерела світла вмикалися послідовно, забезпечуючи рівномірне освітлення зразків з різних боків); кнопку живлення (5) та кольоровий РК-дисплей (6); порт *Ethernet* (7) для під'єднання персонального комп'ютера; живлення приладу (11).

Вмикаючи послідовно вісім джерел світла, оператор отримував вісім знімків, з яких надалі програмно формувалося зведене (усереднене) зображення з мінімальним впливом відблисків.

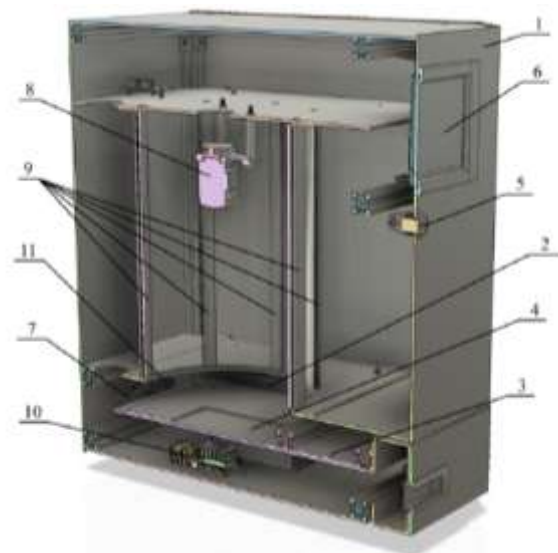


Рис. 13. Зовнішній вигляд апаратно-програмного комплексу для отримання та оброблення зображення зразка [20]

Цифрове оброблення зображення зразка

Останнім часом для цифрового оброблення зображення використовують різні методи, з яких найбільш поширеними є:

- метод порогового значення сірого;
- метод сегментації на основі ентропії;
- аналіз кольорового простору.

Згідно з методом порогового значення сірого кольорове зображення перетворюють на зображення в градаціях сірого. На основі встановленого (програмно або вручну) порогового значення розділяють зображення кам'яних матеріалів, укритих та не вкритих бітумом, після чого піксельно кількісно визначають площу відповідних сегментів. Ці методи доволі прості в реалізації, але їх ви-

користання обмежене в разі наявності на зображенні переэкспонованих зон (надмірно засвічених ділянок, які властиві для глянце-вих бітумних поверхонь), через що ці ділянки зливаються із зображенням світлих кам'яних матеріалів, унаслідок чого точність розрахунку площі кам'яних матеріалів, укритих бітумом, знижується [21].

Для подолання проблем, пов'язаних з оцінюванням зчеплюваності бітумів із темними кам'яними матеріалами, або з наявністю на зображенні переэкспонованих зон, можуть бути використані методи сегментації на основі ентропії [21–23]. У цих методах програмно здійснюється пошук оптимальної сегментації зображення кам'яних матеріалів, вкритих і не вкритих бітумом, основаної на мінімізації ентропії кожного сегменту зображення. Ділянки з високою ентропією належать до кам'яних матеріалів, не вкритих бітумом, а з низькою ентропією – вкритих.

Відповідно до інформації, поданої в студіях [21, 23], під час порівняння результатів оцінювання зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами різного мінералогічного складу за допомогою кількох методів (візуального, методу порогового значення сірого та методу сегментації на основі ентропії) найменша точність спостерігалась у разі використання методу порогового значення сірого.

Під час аналізу кольорового простору зображення перетворюється в кольорову модель HSV (*Hue* – кольоровий тон, *Saturation* – насиченість, *Value* – значення кольору або яскравість), що дає змогу чітко встановлювати різницю між бітумом, кам'яним матеріалом і фоном.

Часто для більш точного оброблення зображення використовують комбіноване застосування різних методів.

Прикладом упровадження методу порогового значення сірого є робота [14], в якій застосовували метод цифрового аналізу зображення, оснований на аналізі основних компонентів (PCA - *principal component analysis*) та сегментації зображення. За допомогою методу PCA RGB-компоненти зображення (ділянки, вкриті бітумом, мають низькі значення інтенсивності, а ділянки без бітуму – високі значення інтенсивності та червоний відтінок) перетворювали в нове зображення із сірим кольором різної насиченості (низька насиченість сірого відповідали ділянкам, вкритим бітумом, а висока насиченість сірого – ділянкам кам'яних матеріалів без бітуму). За допомогою комп'ютерного оброблення

зображення сегментуються з використанням порогового значення: пікселі з низькою насиченістю класифікували як «клас 0» (бітум), а пікселі з високою насиченістю як «клас 1» (відсутність бітуму). Площа кам'яних матеріалів, вкритих бітумом, визначалась як відсоток пікселів «класу 0» від загальної площі зразка.

Подібний підхід упроваджували автори роботи [24], які внаслідок оброблення вихідного зображення, застосовуючи фіксовані порогові значення, отримували бінарне зображення, де чорний колір відповідав ділянкам з бітумом, а білий – місцям його відшарування від поверхні кам'яних матеріалів.

Ще один приклад використання методу порогового значення сірого для визначення площі кам'яних матеріалів, вкритих бітумом після випробування на зчеплюваність, наведено в роботі [25]. Автори застосовували дворівневе оброблення зображення. На першому етапі за допомогою програми *Image-Pro Plus* здійснювали сегментацію об'єкта, виявлення та поділ фону й блискіток на зображенні бітумомінеральної суміші. На другому етапі використовували програмне забезпечення *Image Toll*, за допомогою якого кольорове зображення перетворювали на 8-бітне напівтонове. У цьому разі для створення бінарних зображень застосовували попиксельне порогове оброблення, орієнтуючись на таку властивість пікселя, як яскравість (незалежно від кольору кожному пікселю притаманна яскравість, яка може змінюватися від 0, тобто ідеально чорний колір, до 256 – ідеально білий колір). Пороговим значенням (яке умовно використовували для розділення білих і чорних пікселів щодо зображення без бітуму та з бітумом) автори [25] приймали значення 65. Наприкінці оброблення підраховували кількість білих і чорних пікселів та визначали площу всього зразка, а також обчислювали площу кам'яного матеріалу, що залишився після випробування без бітуму.

Поширеним засобом для оброблення зображень є програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом *ImageJ* на основі *Java*, яка поширюється без ліцензійних обмежень. Вибір цієї програми пояснюється її простою, високою швидкістю оброблення зображення та можливістю застосування різноманітних фільтрів.

У праці [15] зображення зразка обробляли способом налаштування вручну параметрів кольорового порогу за трьома компонентами:

відтінок, насиченість і яскравість. Це давало змогу виділити на зображенні зерна кам'яного матеріалу, вкриті та не вкриті бітумом. Додатково коригували зображення, беручи до уваги відображення, кількість яких зазвичай варіюється від 3 % до 4 %.

На думку авторів роботи [15], метод, який вони запропонували, сприяє суттєвому підвищенню точності оцінювання результатів визначення зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами щодо візуальної оцінки. Водночас метод дає відносно великі похибки в разі оцінювання зчеплюваності бітумів з темними кам'яними матеріалами, а також за умови різнокольорових мінеральних зерен. Крім цього, до недоліків методу належить необхідність отримання декількох зображень одного зразка, що значно ускладнює процедуру досягнення кінцевого результату.

Автори праці [18] на початку оброблення зображення за допомогою програми *ImageJ* вилучали фон та виконували оптимізацію контрастності зображення, застосовуючи вбудовані інструменти програми для налаштування яскравості та контрастності. На цьому самому етапі калібрували обладнання за допомогою двокольорових шаблонів з відомою площею (рис. 11).

На другому етапі оброблення будували гістограму рівнів сірого, що зазвичай мала дві ділянки – низькі значення сірого (більш темна ділянка) відповідали бітуму, а високі значення сірого (більш світла ділянка) – кам'яному матеріалу. Мінімальне значення, розташоване між цими піками, приймається як порогове (рис. 14).

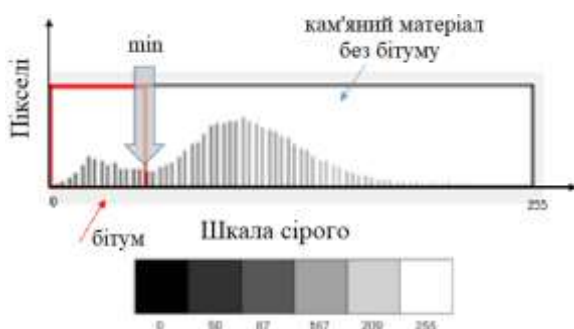


Рис. 14. Знаходження порогового значення відповідно до [18]

На наступному етапі визначали загальну кількість пікселів, а також кількість пікселів, що належать до бітумної ділянки та ділянки кам'яного матеріалу без бітуму. У цьому разі кількість пікселів ділянок із відблисками на бітуму програмно долучали до пікселів бітуму.

Використовуючи отримані значення, розраховували площу кам'яних матеріалів, вкритих бітумом.

Перевагою зазначеного методу оброблення зображення є: простота; застосування поширеного програмного продукту; використання калібрувальних шаблонів, що підвищувало точність результатів. Значними недоліками методу є: ручне встановлення порогового значення, що додає суб'єктивність в оцінку; відсутність автоматизації процесу оброблення зображення; складність встановлення порогового значення в разі оцінювання зчеплюваності бітуму з темними кам'яними матеріалами.

Методику впровадження програмного забезпечення *ImageJ* для оброблення зображення зразка з використанням методу порогового значення сірого запропоновано і в роботі [26]. Вихідне 24-бітне зображення програмно перетворювали у 8-бітне, після чого вилучали фон, застосовуючи порогове значення 20 %. У подальшому програмно визначали площу поверхні кам'яних матеріалів, вкритих бітумом. На думку авторів дослідження [26], запропонований метод оброблення зображення є доволі простим, оскільки не застосовується складне налаштування кольорового простору зображення, та є доступним, тому що використовується програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом. Недоліками методу є те, що для отримання якісного вихідного зображення зразка необхідне штучне освітлення та мінімізація тіней, оскільки останні додають певну похибку в отримувані результати. Крім того, недоліком методу є те, що не використовується кольорова модель, а зображення розділяється лише за яскравістю.

У студіях [7, 8] для визначення площі кам'яних матеріалів, укритих бітумом, після випробування на зчеплюваність також використано програмне забезпечення *ImageJ*, за допомогою якого зображення зразка перетворюють у кольорову модель YUV, що містить три компоненти: яскравість (Y) та два кольороворізнісні (синій та червоний) компоненти (U та V). Зображення з RGB в YUV перетворюють за загальноприйнятими формулами.

Використовуючи певний поріг діапазонів Y, U та V, здійснюють фільтрацію зображення, завдяки чому вилучають фон. За умови подальшого звуження діапазонів Y, U та V залишаються лише пікселі, що відповідають бітуму на зображенні. Відсоток покриття кам'яного матеріалу бітумом визначають як

відношення площі пікселів, які відповідають бітуму, до загальної площі пікселів бітуму та кам'яних матеріалів.

Автори роботи [7] довели, що такий підхід до оброблення зображення дав змогу визначити площу покриття кам'яних матеріалів бітумом із точністю, що перевищувала 96 % для світлих кам'яних матеріалів (вапняк, порфір), та коливалася в межах 90–95 % для темних кам'яних матеріалів (базальт, шлак), що, безумовно, можна вважати значною перевагою цієї методики. Похибка від тіней і відблисків, які мали місце на зображенні зразка, не перевищувала 1 %.

Польські дослідники у праці [17] для оброблення зображення зразка застосували спеціально розроблений скрипт DISCO (*Decent Inexpensive Script Computing Opacity*), написаний в середовищі *Wolfram Mathematica* для автоматичного аналізу зображень. Під час порогової сегментації для встановлення порогового значення використовували зображення вихідних кам'яних матеріалів до їх об'єднання з бітумом, а також зображення кам'яних матеріалів, повністю покритих бітумом. За допомогою порогового значення було програмно проаналізовано кожен піксель зображення – залежно від того, вище чи нижче за порогове значення колір та яскравість кожного пікселя. З огляду на це він класифікувався як бітум чи як оголений кам'яний матеріал.

У разі використання темних кам'яних матеріалів, характеристики зображення яких є близькими до зображення бітуму, застосовували коректування за допомогою додаткових фільтрів чи калібрування за іншими параметрами зображення.

Завдяки скрипту визначали загальну кількість пікселів на зображенні, а також кількість пікселів зображення бітуму, на основі чого розраховували відсоток площі зразка, вкритий бітумом. Отримані показники разом з ідентифікатором зразка автоматично експортують у файл для подальшого статистичного оброблення.

На думку авторів праці [17], значними перевагами методики, яку вони запропонували, є: можливість точного та об'єктивного комп'ютерного оцінювання зображень декількох зразків одночасно; точна сегментація об'єктів на зображенні, внаслідок чого підвищується точність визначення площі зразка, вкритого бітумом, навіть у разі оцінювання зчеплюваності бітумів з темними кам'яними матеріалами. Недоліками методики є необ-

хідність калібрування зображення для кожного типу кам'яних матеріалів і бітумних в'язучих, а також суттєва залежність точності результатів від умов фотозйомки (освітлення, роздільної здатності камери тощо). Крім цього, автори наголошують на тому, що розроблений скрипт DISCO було адаптовано під конкретні умови дослідження, що обмежує його використання без додаткової адаптації до інших умов.

Деякі науковці для оброблення зображення застосовують програмні забезпечення, створені мовою програмування *Python*. Так, наприклад, у праці [16] використано застосунк, розроблений мовою *Python*, з використанням бібліотек *NumPy*, *OpenCV* і *Tkinter*, який здійснював дворівневу порогову сегментацію: першу для розділення темно-сірих тонів (бітум) від світло-сірих тонів (кам'яний матеріал з відблисками), другу для відокремлення середніх і темних тонів сірого (кам'яний матеріал, вкритий бітумом) від білих (відблиски на бітумі). Аналіз зображення здійснювався в кольоровому просторі LAB з використанням методу *Otsu* для автоматичного визначення порогу та відокремлення фону від зображення зерен кам'яного матеріалу. У цьому разі зерна кам'яного матеріалу, вкриті та не вкриті бітумом, розпізнавалися окремо за допомогою методу контурного аналізу. Додатково реалізовано можливість ручного визначення порогу з використанням гістограми зображення. Унаслідок оброблення зображення визначали загальну кількість пікселів, кількість пікселів бітуму та кількість пікселів відблисків, на основі чого розраховували відсоток покриття кам'яних матеріалів бітумом, у цьому разі кількість пікселів відблисків належала до загальної кількості пікселів бітуму.

Перевагами зазначеної методики є: підвищення точності отримуваних результатів унаслідок врахування відблисків на поверхні бітуму (зазвичай площа відблисків ігнорується через відносну малу їх площу); можливість оцінювання зчеплюваності бітуму з кам'яними матеріалами різної мінералогії (світлі та темні мінерали); простота використання завдяки графічному інтерфейсу; можливість ручного налаштування порогу. Водночас саме ручне налаштування порогу додає певної суб'єктивності процесу оброблення зображення, що може позначатися на точності досягнутих результатів.

У праці [9] для цифрового оброблення зображення застосовували програмне забезпе-

чення з відкритим кодом PyPAIS (*Python Phase Analyzer* оснований на сегментації зображення), розробленим на *Python 3*. Додатково були використані бібліотеки: *scikit-image* для розрахунку ентропії та гауссового згладжування; *OpenCV* для класифікації бінарних об'єктів; *Matplotlib* для візуалізації та оброблення зображення. Кольорове зображення у форматі RGB перетворювали в 8-бітне напівтонове зображення в градаціях сірого, тобто двовимірне зображення з різним ступенем яскравості (інтенсивності), що перебувало в межах від 0 до 255 та визначалося за формулою

$$I_{ij} = 0,30 \cdot R + 0,59 \cdot G + 0,11 \cdot B, \quad (1)$$

де R , G , B – значення червоного, зеленого та синього каналів.

Для вибору пікселів з однаковою інтенсивністю (що відповідали бітуму на зображенні) використовували порогове оброблення за формулою

$$t_{I,\min} \leq I_{ij} \leq t_{I,\max}, \quad (2)$$

де $t_{I,\min}$ та $t_{I,\max}$ – відповідно, нижня та верхня границі інтенсивності.

Додатково автори праці [9] застосовували порогову фільтрацію за ентропією, за допомогою чого можна було сегментувати зображення з різною шорсткістю, навіть якщо їх яскравості (інтенсивності) були однакові. Це є значною перевагою описаного методу, завдяки чому можна з високою точністю розпізнавати границі поверхні кам'яних матеріалів, вкритих бітумом.

Водночас застосування порогової фільтрації за ентропією є недоліком методу, оскільки це значно її ускладнює та підвищує трудомісткість. Ще одним недоліком є необхідність навичок роботи з *Python*, що утруднює застосування запропонованого методу для повсякденного використання в дорожніх лабораторіях.

C. Mulsow у дослідженні [6] завдяки освітленню кам'яних матеріалів лазерними світлодіодами та застосуванню *maxstore*-алгоритму отримав тримодальну гістограму з піками для бітуму, кам'яного матеріалу та фону (рис. 15).

Під час аналізу гістограми встановлюють порогові межі між бітумом і заповнювачем та за співвідношенням між класифікаційними зображеннями розраховують ступінь покриття зерен кам'яного матеріалу бітумом.

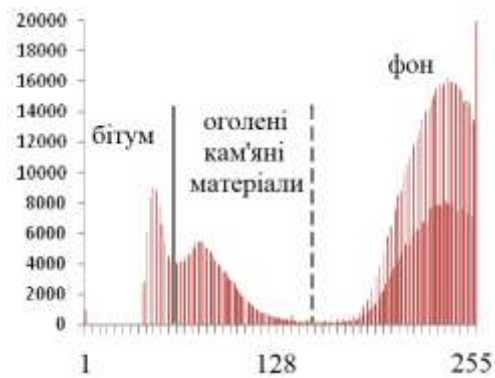


Рис. 15. Приклад гістограми зображення [6]

Подібний підхід упроваджено і в праці [13], але для оброблення зображення застосовували програмне забезпечення *Image Pro-plus*. Установлюючи порогові значення між чорним, червоним і помаранчевим кольорами, програмно визначали кількість пікселів кожного кольору та розраховували площу кам'яного матеріалу, вкриту бітумом.

У студіях [10–12] запропоновано автоматичний метод оцінювання ступеня покриття поверхні кам'яних матеріалів бітумом, оснований на використанні відблисків на поверхні бітуму для сегментації зображення (зазвичай, навпаки, намагаються під час отримання зображення уникати відблисків на поверхні бітуму).

Для кожного зразка, розташованого під яскравим джерелом світла на столику, який обертається навколо вертикальної осі, отримують серію зображень таким чином, щоб поверхня кам'яних матеріалів, укритих бітумом, мала спекулярні відбиття (яскраві відблиски, що виникають через те, що бітум має більш інтенсивне відбиття світла, ніж оголена поверхня кам'яних матеріалів) (рис. 16).

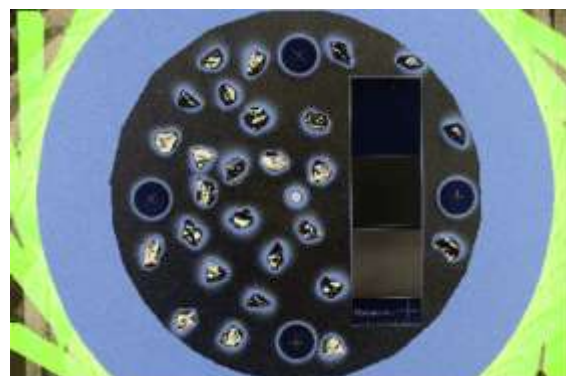


Рис. 16. Зображення кам'яних матеріалів зі спекулярними відбиттями на поверхні бітуму [11]

Оброблення розпочинають з калібрування, під час якого виправляють викривлення пер-

спективи. Після цього програмно вирівнюють зображення за допомогою алгоритму *RANSAC* та принципів гомографії. На підготовленому зображенні виконують сегментацію способом порогової фільтрації за яскравістю (порогове значення встановлюють вручну), у цьому разі пікселі з яскравістю вищою, ніж порогове значення, належать до зображення бітуму. Використовуючи отриману бінарну маску, формують карту відблисків, за допомогою якої визначають долю площі зображення, вкритого відблисками щодо загальної площі зразка [10, 11].

Перевагами зазначеного підходу є практично повна автоматизація процесу, а також висока збіжність та відтворюваність отриманих результатів за умови чіткого дотримання правил зйомки та процедури оброблення зображення. Завдяки виявленню відблисків на поверхні бітуму, що займають навіть найменшу площу на поверхні кам'яних матеріалів, та подальшому врахуванні цієї площі значно збільшується точність результатів. Метод ефективний для оцінювання зчеплюваності бітумів із поверхнею темних кам'яних матеріалів, що за кольором наближаються до бітуму. Крім того, метод не потребує використання складного та високошвидкісного лабораторного обладнання.

Водночас методу притаманні й недоліки, до яких належать: суттєва залежність досягнутих результатів від інтенсивності та направленості світла під час отримання зображення; можливість збільшення кількості похибок у разі оцінювання зчеплюваності бітумів з поверхнею кам'яних матеріалів із вологою або блискучою поверхнею; необхідність індивідуального налаштування під час оцінювання зчеплюваності з різними кам'яними матеріалами; ігнорування товщини плівки бітуму, що призводить до зниження точності отримуваних результатів (поверхня кам'яного матеріалу вважається вкритою бітумом, навіть якщо на її поверхні є тонкі, коричневі або непрозорі ділянки, але в цьому разі відблисків може не спостерігатися).

У подальшому автори праць [11, 12] запропонували ще один метод оцінювання зчеплюваності бітуму з кам'яними матеріалами, оснований на сегментації зображення на три класи: фон, кам'яний матеріал без бітуму та бітум. У цьому методі важливою умовою сегментації зображення є уникнення дзеркальних відблисків. Для точного оцінювання додатково використовують контрольні зображення (зображення кам'яного матеріалу, по-

вністю покритого бітумом, і кам'яних матеріалів без бітуму).

Під час фотографування біля зразка розташовують калібрувальну лінійку, поділену на три частини різного кольору (білого, світло-сірого та темно-сірого) і яку використовують для регулювання інтенсивності сірого кольору на зображенні зразка.

Після сегментації всі пікселі кластеризують способом застосування алгоритму *k*-середніх з оптимізацією за індексом Жаккара. Розділення зображення на бітум і кам'яний матеріал без бітуму здійснюють за допомогою методу *Graph Cut*, згідно з яким вузли подані пікселями зображення, а ребра поєднують сусідні пікселі. Усі вузли також з'єднані з вузлами переднього плану (*S*-вузлом – бітум) та вузлами заднього плану (*T*-вузол – кам'яний матеріал без бітуму). Способом розрізу графа розділяють пікселі на бітум і кам'яний матеріал, після чого визначають ступінь покриття кам'яних матеріалів бітумом як відношення кількості пікселів бітуму до загальної кількості пікселів зображення.

Суттєвою перевагою описаного методу є точна сегментація бітуму та кам'яних матеріалів з візуальною перевіркою встановлених границь, а також висока відтворюваність результатів оцінювання зчеплюваності бітуму з кам'яними матеріалами. Недоліком методу є те, що висока точність досягається лише в умовах оцінювання зчеплюваності бітуму зі світлими кам'яними матеріалами (у разі темних кам'яних матеріалів метод не придатний). До того ж метод потребує коректного калібрування яскравості та ретельної кластеризації.

Найбільш ґрунтовний підхід до отримання якісного зображення зразка та його оброблення наведено в роботі [19]. На початку процедури отримання зображення зразка здійснювали калібрування з використанням білого еталона. Після отримання зображення здійснювали: геометричну корекцію, що давала змогу усунути затемнення країв зображення; фільтрацію шумів, для чого зображення згортали з гауссовою маскою; радіометричне калібрування, під час якого реєстрували значення яскравості в кожній точці зображення, що розраховували як відбиту частину падаючого світла.

Для оброблення зображення використовували два методи: неконтрольований (*ISODATA*) – алгоритм кластеризації, що застосовується для розпізнання образів та аналізу зображення для кластеризації багатовимірних даних; контрольований (паралелепіпедний). Унаслідок такого оброблення отримують

мували чотири класи зображення (бітум, непокриті бітумом кам'яні матеріали, тіні та відблиски) та відповідну кожному класу кількість пікселів. Зображення обробляли за допомогою програмного продукту для візуалізації та оброблення даних *ENVI*.

Наведений метод оброблення зображення зразка й розрахунок площі кам'яних матеріалів, вкритих бітумом, визначається високою точністю досягнутих результатів як завдяки отриманню якісного зображення, так і складною процедури його оброблення.

Перевагою методу є отримання об'єктивних результатів з високою точністю та відтворюваністю як у разі оцінювання зчеплюваності бітуму зі світлими, так і темними кам'яними матеріалами.

Водночас суттєвим недоліком методу, що значно обмежує його застосовування, є надто висока вартість і складність обладнання.

Найбільш сучасний багатоступеневий метод оброблення зображення зразка запропоновано в роботі [20], який оснований на алгоритмах оброблення зображень, що використовують у технології комп'ютерного зору, та застосування нейронної мережі на основі *U-Net* і бібліотеки з відкритим кодом *XGBoost*, яка є поширеною в машинному навчанні.

Автори розробили алгоритм, що складався з низки послідовно виконуваних операцій:

- об'єднання восьми послідовно отриманих зображень одного зразка з отриманням усередненого зображення з мінімальним впливом відблисків;
- виявлення зразків (окремих зерен кам'яного матеріалу) з використанням широко застосовуваних в комп'ютерному зорі алгоритмів Кенні (згладжування зображення за допомогою гауссового фільтра, обчислення величини та орієнтації градієнта, відсікання немаксимальних границь і застосування гістерезисного порогового відсіювання для отримання остаточної схеми границь) та Сузуки (трасування границь, установлених на основі виконання алгоритму Кенні) для встановлення границь зразка;
- семантична сегментація поверхні зразка, внаслідок якого поверхня зерна кам'яного матеріалу розподілялась на чотири зони (відсутність бітуму, недостатній шар бітуму, тонкий та товстий шар бітуму) (рис. 17);
- фінальна класифікація, внаслідок якої розраховували відносні площі кожного типу поверхні зерна кам'яного матеріалу щодо загальної площі зерна, а також визначали інтегральну оцінку (R) за формулою

$$R = (0,2 \cdot \textit{Weak} + 0,5 \cdot \textit{Thin} + \textit{Thick}) \times 100, \quad (3)$$

де *Weak*, *Thin*, *Thick* – відповідно, відносна площа зерна кам'яного матеріалу з недостатнім шаром бітуму, з тонким і товстим шаром бітуму;

- розрахунок дискретної оцінки (від 2 до 5) з використанням класифікатора на основі дерева рішень (максимальна глибина 5, мінімальна кількість елементів на листі 7).



Рис. 17. Тип покриття зерна кам'яного матеріалу [20]

Значною перевагою використаного методу оцінювання результатів зчеплюваності бітумів із поверхнею кам'яних матеріалів є те, що весь процес автоматизований з мінімальним втручанням оператора, завдяки чому досягнуті результати є об'єктивними та визначаються високою точністю та відтворюваністю.

За допомогою використання ізольованої камери для розміщення зразків забезпечувались стабільні умови фотозйомки, а застосування джерел світла, що послідовно вмикаються під час зйомки, суттєво підвищує якість зображення внаслідок відсутності відблисків і тіней.

Застосування нейромережі дало змогу авторам роботи [20] суттєво підвищити точність досягнутих результатів (в 75 % випадках результати комп'ютерного оброблення зчеплюваності бітумів з поверхнею кам'яних матеріалів збігалися з візуальною експертною оцінкою та лише в 2 % випадків кардинально розрізнялись), яка надалі може бути ще більш підвищена внаслідок збільшення набору даних для навчання нейромережі.

Недоліками розглянутого методу можна вважати відносно тривалий час оцінювання, який варіюється від 64 с у разі оцінювання одного зерна до 199 с під час оцінювання п'яти зерен кам'яного матеріалу.

Автори роботи [20] запатентували програмно-апаратний комплекс та методику автоматизованого оцінювання зчеплюваності бітуму з поверхнею кам'яного матеріалу. Надалі заплановано створити цифрову дослідну базу даних випробувань бітумомінеральних сумішей.

Висновки

Останнім часом в Україні в процесі проектування складу асфальтобетонних сумішей різних видів обов'язковим є визначення зчеплюваності прийнятих бітумних в'язучих з поверхнею кам'яних матеріалів способом використання методів, описаних в ДСТУ EN 12697-11 [3] та ДСТУ 8787 [4]. У цих методах застосовується візуальне оцінювання зчеплюваності, через що отримані результати мають низьку точність та відтворюваність. Розв'язанням окресленої проблеми є використання методів цифрового оброблення зображень для оцінювання результатів зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами.

На основі аналізу літературних джерел встановлено основні умови отримання якісного зображення бітумомінерального матеріалу, випробуваного одним зі стандартних методів визначення адгезії. З'ясовано, що найбільш придатними умовами для отримання якісного зображення зразка є використання джерела інтенсивного спрямованого світла й водночас уникнення впливу природного розсіяного світла та відблисків на поверхні бітуму.

Проаналізовано наявні методи цифрового оброблення зображення (метод порогового сірого, метод сегментації на основі ентропії та метод аналізу колірного простору). Установлено, що найбільш поширеним є метод порогового значення сірого. Незважаючи на його певні недоліки, доцільним є застосування цього методу для лабораторного оцінювання результатів визначення зчеплюваності бітумів з кам'яними матеріалами.

Література

- Пиріг Я. І., Галкін А. В. Методи оцінки адгезії та когезії бітумних в'язучих. Харків: ХНАДУ, 2019. 224 с.
- ASTM D 3625-2012. Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. ASTM International. 2012. 2 p.
- ДСТУ EN 12697-11:2018 (EN 12697-11:2012, IDT). Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Ч. 11. Визначення зчеплюваності між заповнювачем і бітумом. [Чинний з 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2018. 41 с.
- 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.
- Li M. et al. Evaluation of the Adhesion between Aggregate and Asphalt Binder Based on Image Processing Techniques Considering Aggregate Characteristics. *Materials*. 2023. Т. 16. № 14. 5097. P. 1–16.
- Mulsow C. Determination of the degree of gravel aggregate-bitumen coverage by multi-directional reflectance measurements. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. Т. 39. P. 39–43.
- Lamperti R. et al. 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*. Springer Netherlands, 2016. P. 15–24.
- Lantieri C. et al. Use of image analysis for the evaluation of rolling bottle tests results. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. Т. 10. № 1. P. 45–53.
- Nežerka V., Trejbal J. Assessment of aggregate-bitumen coverage using entropy-based image segmentation. *Road Materials and Pavement Design*. 2020. Т. 21. № 8. P. 2364–2375.
- Kallen H., Heyden A., Lindh P. Measuring bitumen coverage of stones using a turntable and specular reflections. *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. SciTePress, 2013. Т. 2. P. 333–337.
- Kallen H. et al. Measuring and evaluating bitumen coverage of stones using two different digital image analysis methods. *Measurement*. 2016. Т. 84. P. 56–67.
- Kallen H. et al. Measurement of bitumen coverage of stones for road building, based on digital image analysis. *2012 IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV)*. IEEE, 2012. P. 337–344.
- Yuan J. et al. A LED-based measurement system for affinity between bitumen and aggregate. *Construction and Building Materials*. 2015. Т. 81. P. 298–302.
- Merusi F. et al. Moisture susceptibility and stripping resistance of asphalt mixtures modified with different synthetic waxes. *Transportation research record*. 2010. Т. 2180. № 1. P. 110–120.
- 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. P. 1–8.

16. de Freitas Gomes O. J. et al. Desenvolvimento de um sistema para quantificar o percentual de área de agregados coberto por ligante asfáltico. 37 Congresso de pesquisa e Ensino em transportes. SANTOS-SP. 2023. T. 2. P. 1–10.
17. Brozyna D., Kowalski K. J. Assessment of polyethylene-modified bitumen adhesion using computer image analysis. *Archives of Civil Engineering*. 2016. Vol. LXII. Issue 4, part 2. P. 1–16.
18. 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 Euraspalt & Eurobitume Congress v1. 1, 15–17th June, 2021. P. 1–11.
19. Mei A. et al. Affinity between Bitumen and Aggregate in Hot Mix Asphalt by Hyperspectral Imaging and Digital Picture Analysis. *Coatings*. 2021. T. 11. № 6. P. 1–19.
20. Kamianskii D. et al. Design and Implementation of a Hardware and Software System for Visual Assessment of Bituminous Coating Quality. *Sensors*. 2023. T. 23. № 23. 9325. P. 1–24.
21. Trejbal J., Prosek Z., Valentova T. Assessment of adhesion between mineral aggregate and bituminous binder using digital image analysis. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2018. T. 15. P. 126–130.
22. Trejbal J. et al. Mechanical and image analysis of adhesion between mineral aggregate and bituminous binder. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2020. T. 26. P. 112–116.
23. Trejbal J., Valentova T., Horova T. Assessment of adhesion between bituminous binder and mineral aggregate using digital image analysis. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2019. T. 21. P. 38–41.
24. Kim Y. R., Pinto I., Park S. W. Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results. *Construction and Building Materials*. 2012. T. 29. P. 386–393.
25. Amelian S., Abtahi S. M., Hejazi S. M. Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis. *Construction and Building Materials*. 2014. T. 63. P. 294–302.
26. Li M. et al. Evaluation of the Adhesion between Aggregate and Asphalt Binder Based on Image Processing Techniques Considering Aggregate Characteristics. *Materials*. 2023. T. 16. № 14. P. 1–16.
- niuvachem i bitumom [Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen]. DSTU EN 12697-11:2018 from 1st January 2020. Kyiv: SE “UkrNDNC”. 41 p. [in Ukrainian].
4. Bitumy ta bitumni viazhuchi. Metod vyznachennia zchepliuvanosti zi shchebnem [Determination of adhesion with crushed stone]. (2019). DSTU 8787:2018 from 1st January 2019. Kyiv: UkrNDNTs, 2021. 7 p. [in Ukrainian].
5. 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. 5097. P. 1–16.
6. Mulsow, C. (2012). Determination of the degree of gravel aggregate-bitumen coverage by multi-directional reflectance measurements. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. T. 39. P. 39–43.
7. 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. *Springer Netherlands*. P. 15–24.
8. 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. P. 45–53.
9. Nežerka, V., & Trejbal, J. (2020). Assessment of aggregate-bitumen coverage using entropy-based image segmentation. *Road Materials and Pavement Design*. T. 21. № 8. P. 2364–2375.
10. Kallen, H., Heyden, A., & Lindh, P. (2013). Measuring bitumen coverage of stones using a turntable and specular reflections. *International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. SciTePress. T. 2. P. 333–337.
11. Kallen, H. et al. (2016). Measuring and evaluating bitumen coverage of stones using two different digital image analysis methods. *Measurement*. T. 84. P. 56–67.
12. Kallen, H. et al. (2012). Measurement of bitumen coverage of stones for road building, based on digital image analysis. 2012 IEEE Workshop on the Applications of Computer Vision (WACV). IEEE, P. 337–344.
13. Yuan, J. et al. (2015). A LED-based measurement system for affinity between bitumen and aggregate. *Construction and Building Materials*. T. 81. P. 298–302.
14. Merusi, F. et al. (2010). Moisture susceptibility and stripping resistance of asphalt mixtures modified with different synthetic waxes. *Transportation research record*. T. 2180. № 1. P. 110–120.
15. 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.

References

1. Pirig, Ja. I., & Galkin, A. V. (2019). *Metodi ocinki adhezii ta kogezi bitumnih v'jazhuchih* [Methods for assessing adhesion and cohesion of bituminous binders]. Harkiv: KhNADU. 224. [in Ukrainian].
2. ASTM D 3625-2012. Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water. ASTM International. 2012. 2 p.
3. Bitumomineral'ni sumishi. Metodi viprobuvannia gariachikh asfal'tobetonnikh sumishei. Chastina 11. Vyznachennia zchepliuvanosti mizh zapov-

16. de Freitas Gomes, O. J. et al. (2023). Desenvolvimento de um sistema para quantificar o percentual de área de agregados coberto por ligante asfáltico. *37 Congresso de pesquisa e Ensino em transportes. SANTOS-SP*. T. 2. P. 1–10.
17. Brozyna, D., & Kowalski, K. J. (2016). Assessment of polyethylen-modified bitumen adhesion using computer image analysis. *Archives of Civil Engineering*. Vol. LXII. Issue 4, part 2. P. 1–16.
18. 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.
19. Mei, A. et al. (2021). Affinity between Bitumen and Aggregate in Hot Mix Asphalt by Hyperspectral Imaging and Digital Picture Analysis. *Coatings*. T. 11. № 6. P. 1–19.
20. Kamianskii, D. et al. (2023). Design and Implementation of a Hardware and Software System for Visual Assessment of Bituminous Coating Quality. *Sensors*. T. 23. № 23. 9325. P. 1–24.
21. Trejbal, J., Prosek, Z., & Valentova, T. (2018). Assessment of adhesion between mineral aggregate and bituminous binder using digital image analysis. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. T. 15. P. 126–130.
22. Trejbal, J. et al. (2020). Mechanical and image analysis of adhesion between mineral aggregate and bituminous binder. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. T. 26. P. 112–116.
23. Trejbal, J., Valentova, T., & Horova, T. (2019). Assessment of adhesion between bituminous binder and mineral aggregate using digital image analysis. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. T. 21. P. 38–41.
24. Kim, Y. R., Pinto, I., & Park, S. W. (2012). Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results. *Construction and Building Materials*. T. 29. P. 386–393.
25. Amelian, S., Abtahi, S. M., & Hejazi, S. M. (2014). Moisture susceptibility evaluation of asphalt mixes based on image analysis. *Construction and Building Materials*. T. 63. P. 294–302.
26. 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.

Пиріг Ян Іванович¹, к. т. н., ст. наук. співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів, тел. + 380984466268, e-mail: pirig2000@gmail.com;

Пиріг Наталія Янівна², студентка кафедри штучного інтелекту, тел. + 0960152282, e-mail: pirig.nata@gmail.com.

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, Україна, Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

²Харківський національний університет радіоелектроніки, 61166, Україна, Харків, пр. Науки, 14

Analysis of approaches to quantitative assessment of bitumen binders adhesion to stone materials using digital image processing methods

Abstract. Problem. At present, in Ukraine, when designing the composition of asphalt mixtures of various types, it is mandatory to determine the adhesion of the adopted bituminous binders to the surface of stone materials by using the methods presented in DSTU EN 12697-11 and DSTU 8787. These methods are based on determining the resistance to the peeling action of water and have a common disadvantage in the form of visual assessment of the surface area of stone materials covered with bituminous binder after the test. The subjectivity of evaluating the results obtained significantly affects their accuracy and reproducibility. The solution to this problem is the use of digital image processing methods for evaluating the results of bitumen adhesion to stone materials. **Goal.** The aim of the work was to analyse the existing methods of quantitative evaluation of binders' adhesion to stone materials using digital image processing methods. **Methodology.** To achieve this goal, the analysis of foreign literary sources devoted to the issue of bitumen binders cohesion estimation was carried out. **Results.** On the basis of the literature analysis, the basic conditions for obtaining a high-quality image of a bituminous material tested by one of the standard methods of adhesion determination were established. The currently existing methods of digital image processing (threshold grey method, entropy-based segmentation method and colour space analysis method) are analysed. **Originality.** It has been established that the most suitable conditions for obtaining a high-quality image of a sample are the use of an intense directional light source, ensuring that the influence of natural scattered light and glare on the bitumen surface is avoided. The most common method of image processing is the grey threshold method. Despite the fact that there are certain limitations of this method, it is advisable to use it for laboratory evaluation of the results of determining the adhesion of bitumen to stone materials. **Practical value.** The analysis carried out can be used in the development of a domestic method of digital image processing of stone materials after the adhesion test.

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

Pyrig Yan¹, S. Researcher, Ph.D. (Eng.), the department of technology of road-construction materials, tel. + 38 098-44-66-268, e-mail: pirig2000@gmail.com;

Pyrig Nataliia², Student, Department of Artificial Intelligence, tel. + 0960152282, e-mail: pirig.nata@gmail.com.

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 61002, Ukraine, Kharkiv, Yaroslava Mudrogo str., 25

²Kharkiv National University of Radio Electronics, 61166, Ukraine, Kharkiv, Nauky Ave., 14