

Стешенко Я.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Протасов А.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ АСФАЛЬТНО-БЕТОННИХ ПОКРИТТІВ

У статті проводиться аналіз технологій формування дорожніх асфальтобетонних покриттів. Сучасний стан цієї галузі вказує на необхідність проведення масштабних досліджень для підвищення якості та довговічності асфальтобетонних покриттів, а також для автоматизованого моніторингу будівництва доріг. Увага концентрується на головній складовій технологічного процесу укладання асфальтної суміші – підігріві під час укладання. Встановлено, що найбільш популярні серед будівельників технології можна умовно поділити на три групи. Перша це інфрачервоні обігрівачі, друга – нагрівачі на гарячому маслі, парові і непрямого вогню та третя – електричні обігрівачі. У статті розглядаються недоліки цих способів, які обмежують їх використання. Суттєвим недоліком інфрачервоних обігрівачів є наявність у складі їх обладнання газових балонів, що працюють під високим тиском. Найбільш перспективними є електричні обігрівачі. Сьогодні, такі електричні обігрівачі, як індукційні та мікрохвильові показали свою ефективність при ремонті асфальтного покриття з тріщинами за рахунок підвищення температури нагрівання суміші, що в дорожній техніці називається загоєнням. Електричні обігрівачі належать до інноваційних технологій. До проблем в дорожньому будівництві також відноситься рівномірність ущільнення та контролю температури гарячої асфальтобетонної суміші. Результати дослідження показали, що тепловізійне зображення, особливо з використанням інфрачервоної технології, може зробити значний внесок у контроль якості процесів укладання та ущільнення асфальтобетону. Проблема мінливості якості асфальту через вплив різних параметрів може бути вирішена завдяки впровадженню автоматизованої системи управління процесом у реальному часі, яка би забезпечувала бригади асфальтоукладачів миттєвими даними для посиленого контролю процесу під час будівництва.

Ключові слова: діагностика дорожнього покриття, автоматизація технології покриття, управління процесом укладання покриття.

Постановка проблеми. Логістична система автомобільних доріг є одним з основних об'єктів критичної інфраструктури будь-якої країни у тому числі і в Україні. Будівництво та відновлення автомобільних доріг є дуже витратною статтею економіки нашої країни. Під впливом великого навантаження дорожнє покриття схильне до зносу та старіння і потребує ремонту. Задля зниження витрат на ремонт проводиться автоматизація процесу нанесення дорожнього покриття і його діагностика. Ефективна система керування процесом підготовки і нанесення дорожнього покриття з контролем всіх технологічних вимог здатна зменшити витрати на ремонті більше ніж втричі. Існує проблема мінливості якості асфальту через вплив різних параметрів, таких як температура шару асфальту, кількість проходів катка, наявність вантажівок

з асфальтобетонною сумішшю та час доставки асфальтобетонної суміші. Сучасний стан цієї галузі вказує на необхідність проведення масштабних досліджень для підвищення якості та довговічності асфальтобетонних покриттів, а також для моніторингу будівництва доріг. Автоматизація процесу нанесення дорожнього покриття та його діагностика можуть значно зменшити витрати на ремонті, що робить цю тему актуальною для подальшого дослідження та впровадження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою останніх досліджень стало пошук рішення, яке сприятиме покращенню управління процесом під час будівництва асфальтобетонного покриття шляхом розробки системи з високим рівнем гнучкості, наданням даних у реальному часі та інтеграцією з іншими системами.

Процес укладання асфальту пов'язаний зі складною технологією, яка охоплює кілька етапів, включаючи підготовку земляного полотна, нанесення шарів основи та остаточне укладання асфальтового покриття.

Головним етапом цієї технології є власне укладання асфальтного покриття. За допомогою асфальтоукладальника гарячу асфальтобетонну суміш рівномірно наносять на заздалегідь підготовлену поверхню. Гаряча суміш являє собою суміш асфальтної основи та в'язучих заповнювачів, які нагріваються до високих температур для забезпечення належного ущільнення та зчеплення з нижчими шарами. Після укладання асфальту проводиться його ущільнення важкими катками для досягнення потрібної щільності та гладкості (рис. 1).



Рис. 1. Процес укладання асфальтного покриття [1]

Температура гарячого асфальтобетону є критичним компонентом для ущільнення та довговічності залитого покриття. Ідеальна температура для гарячого асфальтобетонного покриття становить від 135°C до 149°C [2]. Таку температуру необхідно підтримувати протягом всього періоду транспортування суміші від заводу виробника до об'єкту, інакше вантаж буде вважатися непридатним для подальшого застосування.

При температурі нижче $76,7^{\circ}\text{C}$ асфальт стає жорстким та схильним до передчасного руйнування [2], що становить проблему для довговічності і стабільності асфальтобетонних покриттів. Такі характеристики асфальту, як жорсткість і низька щільність, можуть призвести до утворення в покритті тріщин та інших деформацій під час експлуатації, особливо в умовах низьких температур.

Деформації та тріщини в структурі асфальтобетонного покриття можуть мати негативний вплив на безпеку руху, ефективність руху та економічні витрати на утримання та ремонт доріг.

Тому детальне вивчення цієї проблеми є важливим для розробки стратегій підвищення стабільності та довговічності асфальтобетонних покриттів в умовах низьких температур і запобігання їх передчасному зносу.

Загалом, технологія укладання асфальту відіграє важливу роль у розвитку та обслуговуванні інфраструктури, забезпечуючи довговічні та економічно ефективні рішення для різних логістичних потреб.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз автоматизованих технологій формування асфальтобетонних покриттів дорожнього покриття та визначення напрямку подальшого розвитку цих технологій.

Виклад основного матеріалу. Головною складовою технологічного процесу укладання асфальтної суміші є її підігрів під час укладання. Від технології нагрівання асфальту залежить його здатність змішуватися та з'єднуватися з наповнювачем, що в кінцевому результаті впливає на якість покриття.

1. Технології підігріву асфальту при укладанні.

Для підігріву асфальту під час укладання використовується кілька технологій, кожна з яких має свої переваги та застосування. Найбільш популярні серед будівельників технології можна умовно поділити на три групи. Перша це інфрачервоні обігрівачі, друга – нагрівачі на гарячому маслі, парові і непрямого вогню та третя – електричні обігрівачі.

Інфрачервоні обігрівачі використовують для нагрівання поверхні асфальту інфрачервоним випромінюванням, яке проникає в середину суміші і нагріває її зсередини [3]. Обладнання таких обігрівачів складається з інфрачервоних нагрівальних елементів, які живляться природним газом або пропаном [4]. Технологію інфрачервоних обігрівачів застосовують для ремонту пошкоджених ділянок – вибоїн і тріщин, які мають невелику площу. До переваг такого способу нагріву можна віднести здатність прогрівати лише необхідну ділянку, а не всю поверхню покриття [5]. До недоліків цього способу, що обмежує його використання, належить вплив вітру і температури навколишнього середовища, які можуть значно підвищити час нагріву суміші і зменшити час її придатності до ремонту. Також, використання інфрачервоних обігрівачів обмежено у зоні розташування каналізаційних і дренажних систем. Згідно вимогам багатьох державних та місцевих правил опалення поблизу таких систем забороняється [6]. Суттєвим недоліком інфрачервоних

обігрівачів є наявність у складі їх обладнання газових балонів, що працюють під високим тиском. Цей фактор вимагає особливої кваліфікації у обслуговуючого персоналу по роботі з обладнанням підвищеної безпеки [7].

Другу групу нагрівачів об'єднує технологія попереднього нагріву теплоносія, який потім циркулює через теплообмінник, що спрямований на асфальтну поверхню для її розігріву. В нагрівачах на гарячому маслі в якості теплоносія використовується термальна олія, парові нагрівачі застосовують пару як теплоносій, теплоносієм також може слугувати і повітря. Всі ці системи нагріву належать до обігрівачів непрямого вогню. Метод непрямого нагрівання допомагає запобігти прямому контакту полум'я з асфальтом.

Нагрівачі на гарячому маслі часто використовуються у великомасштабних проектах укладання асфальту завдяки їхній здатності забезпечувати контрольований нагрів на великій площі. Температура гарячої олії в таких нагрівачах ретельно контролюється [8]. Використання масляних обігрівачів дає ряд переваг, ці нагрівачі можуть працювати при високих температурах, не викликаючи деградації асфальту. Найбільш поширеним масляним нагрівачем серед подібного обладнання є нагрівач з газовим пальником, який дає необхідну для процесу високу температуру, близько 270°C [9]. Основна перевага термічного нагріву рідини полягає в тому, що він забезпечує як високу температуру, так і низький тиск, що є безпечним варіантом для промислових процесів нагрівання [10, 11].

Недоліком такої системи нагріву асфальту є втрата тепла в димоходах, що робить систему опалення на маслі не ефективною. В роботі [12] авторами запропоновано методику розрахунку ефективності нагріву, яка базується на типовому обігрівачі, який має 20% надлишку повітря та температуру навколишнього середовища 21,1°C. Вплив системи димових газів на ефективність опалення пропонується визначати через

температуру димової труби та використання наданих графіків.

Парові нагрівачі використовують пару як теплоносій для нагрівання асфальтового матеріалу. Пара циркулює через мережу труб, які безпосередньо контактують з асфальтом, ефективно передаючи тепло матеріалу. Парові нагрівачі забезпечують рівномірний нагрів і часто використовуються в випадках, коли потрібен точний контроль температури [13].

Електричні обігрівачі є екологічно чистим варіантом підігріву асфальту під час укладання. Для виробництва тепла ці обігрівачі використовують електроенергію і не потребують викопного палива чи інших горючих матеріалів. Сьогодні, такі електричні обігрівачі, як індукційні та мікрохвильові показали свою ефективність при ремонті асфальтного покриття з тріщинами за рахунок підвищення температури нагрівання суміші, що в дорожній техніці називається загоєнням. Вони належать до інноваційних технологій в дорожньому будівництві [14, 15, 16].

2. Технологія індукційного та мікрохвильового нагріву асфальтобетону.

Проблему індукційного нагріву асфальтобетону розглянуто у роботі [17]. Індукційне загоєння асфальтобетонних сумішей здійснюється за рахунок впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання, яке діє на пошкоджену ділянку покриття. На рис. 2 показано процес індукційного нагріву асфальтобетонної суміші з наступним розсіюванням енергії у навколишнє середовище.

Плинність та здатність асфальтових в'язучих складових до заповнення тріщин відіграють ключову роль у характеристиках індукційного загоєння. Автори роботи пропонують енергетичний підхід до вивчення особливостей індукційного нагріву асфальтобетону, який може бути використаний для інженерних застосувань дорожніх покриттів.

Для проведення своїх досліджень автори використовували зразки асфальтобетону різних роз-

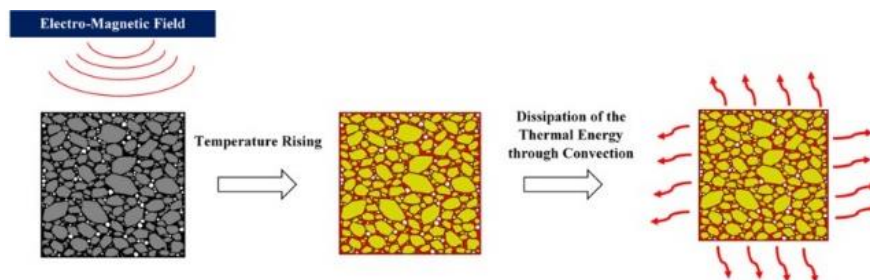


Рис. 2. Нагрів та охолодження асфальтної суміші при індукційному нагріву [17]

мірів, з різними типами заповнювачів та електропровідних модифікаторів. Було оцінено здатність асфальтобетону до індукційного нагріву на основі залежності температури поверхні зразка від часу на етапі індукційного нагріву.

Автори виявили, що використання температури поверхні зразків асфальту під час процесу нагрівання не може належним чином описати процес індукційного нагрівання в зразку асфальту, оскільки температура поверхні під час процесу нагрівання не може враховувати розподіл і величину внутрішньої енергії. Автори змогли запропонувати точний і енергетично обґрунтований підхід до вивчення особливостей індукційного нагріву асфальтобетону під впливом електромагнітного поля, а також показали вплив розмірів зразка на індукційний нагрів. Однак автори не проводили польових експериментів для перевірки запропонованого ними підходу, що може обмежити використання їхньої роботи. Крім того, запропонований підхід може вимагати більш складного і дорожчого обладнання в порівнянні з широко використовуваним методом поверхневої температури. Результати експериментів підтвердили, що розподіл електромагнітного поля та теплової енергії всередині асфальтобетону залежить від розміру зразка, що призводить до неточної характеристики індукційного загоєння.

Дослідження, проведені авторами робіт [18, 19], показали, що матеріали на основі вуглецю, такі як технічний вуглець та активоване вугілля, а також волокна сталеві вати є ефективними провідними добавками, які забезпечують достатню чутливість до електромагнітного поля при індукційному нагріві, що підвищує температуру та здатність до індукційного загоєння.

У дослідженні [20] вивчається кореляція між затвердінням асфальтобетону, викликаним індукційним нагріванням, і реологічними (деформаційними) властивостями асфальтової в'язучої компоненти. Розмір асфальтобетону та реологічні властивості розглядалися як вирішальні параметри здатності індукційного нагріву відновлювати ушкодження. Щоб оцінити взаємозв'язок між реологічними властивостями асфальтової в'язучої компоненти та здатністю до відновлення асфальтобетону, спочатку були досліджені реологічні властивості компоненти, потім були оцінені електропровідність і лікувальні властивості зразків асфальтобетону, викликаних індукційним нагріванням.

Основна мета дослідження [21] полягала у вивченні впливу ступеня старіння на характерис-

тики індукційного нагрівання та загоєння асфальтових сумішей, що зазнають впливу зовнішнього електромагнітного поля. Авторами було проведено моделювання довгострокового старіння, оскільки це надзвичайно складне явище, оскільки процес старіння в польових умовах відбувається за температури навколишнього середовища, відбувається дуже повільно і займає багато часу. Результати показують, що зістарені зразки демонструють електропровідну поведінку, їх питомий електричний опір збільшується зі збільшенням рівня старіння, а найменший електроопір спостерігається у не постарілих сумішей.

У статті [22] представлено оцінку можливого використання техніки мікрохвильового нагріву під час утворення поздовжніх швів та процесу ремонту потрісканого асфальтового покриття. Одним з неодмінних етапів процесу укладання і ущільнення асфальту є формування поздовжніх і поперечних швів [23, 24]. Результати досліджень показали, що з'єднання, створені за допомогою мікрохвильового нагрівання мають кращі характеристики розтягування у порівнянні з іншими методами. Під час дослідницького експерименту авторами було загоєно асфальтне покриття на повну глибину 10 см за допомогою однієї операції загоєння, тому автори вважають, що мікрохвильові методи лікування тріщин мають великий потенціал.

Для дослідження механізму мікрохвильового нагріву асфальтобетонної суміші, тобто зв'язку електромагнітного і теплового полів (рис. 3а), в роботі [25] було проведено чисельне моделювання цього процесу, а результати порівнювались з експериментальними випробуваннями. Авторами було розроблено чисельні імітаційні моделі мікрохвильового нагрівання асфальтобетонної суміші за допомогою кінцево-елементного програмного забезпечення COMSOL Multiphysics. Основні вхідні теплові та електромагнітні параметри для моделі були виміряні в лабораторії шляхом експериментальних досліджень. Зразки асфальтобетонної суміші автори нагрівали за допомогою мікрохвильової печі протягом різного часу (рис. 3б).

Результати чисельного моделювання в цій роботі добре корелюють з результатами лабораторних випробувань. Розроблена модель зв'язку електромагнітних хвиль з теплообміном може бути використана для моделювання процесу мікрохвильового нагріву асфальтобетонної суміші.

Нагрівальні характеристики та ефективність індукційного та мікрохвильового загоєння

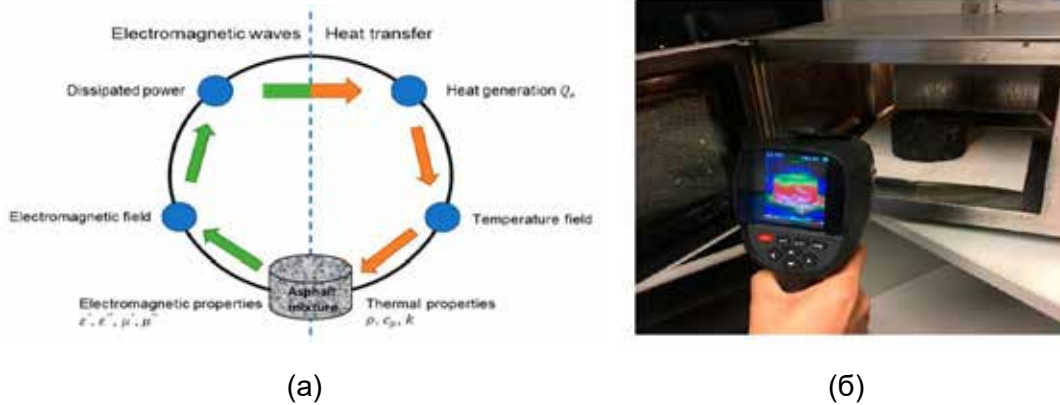


Рис. 3. (3а) – блок-схема зв'язку електромагнітного і теплового полів;
(3б) – нагрів зразків за допомогою мікрохвильової печі [25]

асфальтової суміші були досліджені в роботі [26]. За результатами порівняння двох методів нагріву, автори прийшли до висновку, що при індукційному нагріві суміші з'являється явище градієнта – різниця температури між поверхнею і дном зразка, яка зростає з часом нагрівання. Це явище призвело до того, що верхня частина дослідного зразка зажила набагато краще, ніж нижня. В той же час мікрохвильове нагрівання є відносно рівномірним у поздовжньому розподілі і рівномірність нагрівання не залежить від часу нагрівання, що сприяє більш рівномірному загоєнню тріщин в асфальтовій суміші. У підсумку автори зазначають, що при однаковій потужності та однаковому способі випромінювання індукційне нагрівання відбувається швидко та неоднорідно в поздовжньому напрямку, тоді як мікрохвильове нагрівання відбувається повільно та рівномірно. Ефективна глибина нагрівання при мікрохвильовому нагріванні набагато вища, ніж при індукційному нагріванні.

3. Проблема рівномірного ущільнення та контролю температури.

Проблема досягнення рівномірного ущільнення та контролю температури гарячої асфальтобетонної суміші (ГАС) розглядається у роботі [27]. Свої дослідження автори проводили при моніторингу ключових параметрів процесу укладання ГАС, включаючи дані про температуру ГАС, погодні умови, дані про рух обладнання та показники щільності шару. У випробуваннях використовувалося різне обладнання для вимірювання температури, а саме: ручні інфрачервоні камери, стаціонарні промислові інфрачервоні камери та автоматизовані інфрачервоні лінійні сканери.

Результати дослідження показали, що тепло-візійне зображення, особливо з використанням інфрачервоні технології, може зробити значний

внесок у контроль якості процесів укладання та ущільнення асфальтобетону.

Автори запропонували вирішення проблеми покращення моніторингу температури під час укладання та ущільнення асфальтобетонного покриття. Однак, зосередженість дослідження на безпосередніх експлуатаційних перевагах моніторингу температури залишає місце для подальших досліджень довгострокових експлуатаційних характеристик і довговічності збудованих покриттів.

В роботі [28] розглядається критично важлива проблема різниці температур в асфальтобетонних покриттях з гарячої суміші, яка може призвести до сегрегації і передчасного руйнування дорожнього покриття. Автори провели дослідження з використанням інфрачервоні камери для аналізу температурних коливань у гарячій асфальтобетонній суміші (рис. 4), що вивантажується з вантажівок, а також випробування на ядерну щільність, відбір кернів і візуальний огляд для оцінки однорідності покриття. Було виявлено, що значні температурні перепади можуть призвести до нерівномірної

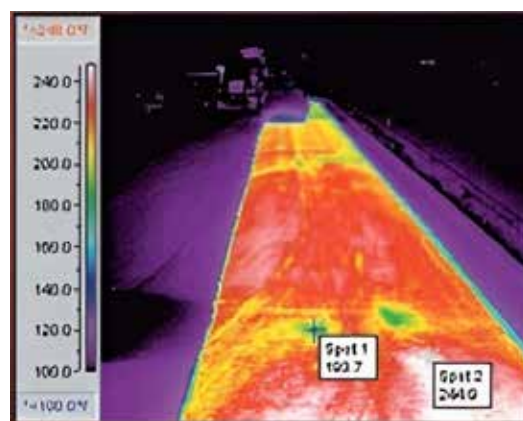


Рис. 4. Температурний профіль після укладки асфальту [28]

щільності і пошкоджених ділянок покриття, що підкреслює важливість реміксування перед укладанням для досягнення більш гладких і довговічних доріг.

Mahoney Joe P. та ін. [29] також вивчали питання температурних перепадів в асфальтобетонному покритті під час будівництва та їх вплив на якість покриття.

Проаналізувавши дані з 13 парних зразків асфальтобетонного покриття, автори виявили кореляцію між холоднішими ділянками покриття, більшою кількістю повітряних пустот і потенційним скороченням терміну служби покриття. Вони використовували градацію та аналіз вмісту асфальту, а також ручні цифрові датчики та інфрачервону камеру, щоб оцінити температурні перепади та їхній вплив на експлуатаційні характеристики покриття. Хоча дослідження успішно пов'язало температурні перепади з більшою кількістю повітряних пустот у прохолодних ділянках покриття, воно не заглиблювалося в конкретні механізми, що спричиняють ці перепади.

Крім того, не було детально вивчено довгостроковий вплив різниці температур на експлуатаційні характеристики дорожніх покриттів зі змінним струмом. Дослідження підкреслює важливість врахування температурних перепадів під час будівництва для досягнення оптимальної щільності та покращення якості дорожнього одягу.

У висновках автори підкреслюють важливість врахування температурних перепадів у будівельній практиці для пом'якшення потенційних проблем, таких як скорочення терміну служби дорожнього одягу. Подальші дослідження можна спрямувати на вивчення основних факторів, що сприяють виникненню температурних перепадів, та оцінити їхній довготривалий вплив на експлуатаційні характеристики дорожнього одягу.

4. Проблема мінливості якості асфальту через вплив різних параметрів.

Тези дисертації PDEng Makarov D. [30] присвячені проблемі мінливості якості асфальтобетонних робіт, спричиненої нехтуванням важливими параметрами. Автор має на меті розробити систему управління процесом у реальному часі, щоб забезпечити бригади асфальтоукладальників миттєвими даними для посиленого контролю процесу під час будівництва.

Дослідження включає аналіз проблем, пошук рішень та розробку гнучкої системи з такими складовими, як модуль асфальтоукладальника, модуль котка, модуль станції охолодження кривої

та модуль зв'язку. Ця система має на меті покращити якість будівництва асфальтобетонного покриття, пропонуючи дані в реальному часі для точних стратегій укладання та ущільнення. На рис. 5 продемонстровано прототип для екрану роликів планшета. Незважаючи на отриманий результат, автор підкреслює недоліки сучасних промислових рішень, вказуючи на потребу в інтегрованих рішеннях, пристосованих до конкретних потреб асфальто-будівельних компаній.

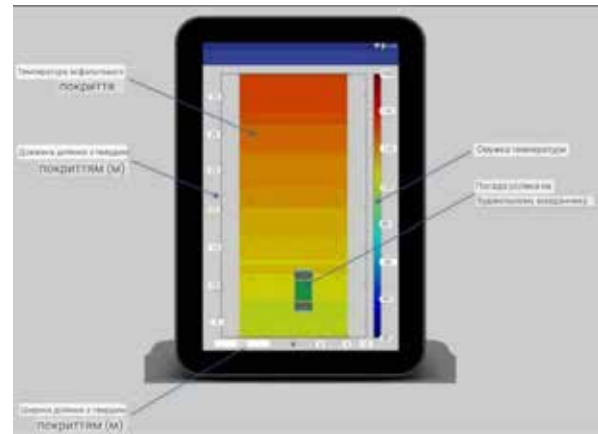


Рис. 5. Відображення даних про температуру асфальтового покриття в реальному часі [30]

На закінчення, автор пропонує вирішувати проблему мінливості якості асфальту за допомогою системи управління процесом в реальному часі. Це дослідження робить цінний внесок у розвиток галузі, а також вказує на можливості для подальшого розвитку в цій сфері.

Дослідження авторів роботи [31] проводилось в два ієрархічні етапи. По-перше, зразки регенованого асфальтобетону (РАБ) були відібрані з чотирьох польових складів. Варіабельність матеріалу рапсу була встановлена на основі лабораторних випробувань. По-друге, було проведено факторний аналіз для розробки сумішей з різним вмістом рапсу – від низького (10%) і середнього (25%) до високого (40%). Зокрема, були розглянуті різні умови змішування між РАБ та первинними в'язучими, включаючи нульове, часткове та повне змішування. Для прогнозування експлуатаційних характеристик дорожнього одягу, включаючи руйнування та якість руху для кожного сценарію проектування, було використано Механіко-емпіричний посібник з проектування дорожніх покриттів. Було виявлено взаємозв'язок (1) між вмістом РАБ та варіабельністю експлуатаційних характеристик і (2) між варіабельністю різних експлуатаційних характеристик через варіабельність матеріалів ПДР.

Авторами статті [32] було досліджено вплив мінливості товщини та жорсткості шарів дорожнього покриття. Варіабельність цих параметрів описувалась їх середніми значеннями, стандартними відхиленнями та функціями розподілу ймовірностей. Метод моделювання Монте-Карло використовувався для врахування мінливості проектних параметрів і побудови функції розподілу ймовірностей вихідних даних. Програмне забезпечення KENLAYER використовувалося для розрахунку відгуку тротуару в заздалегідь визначених критичних місцях. Отримані відгуки використовувалися для прогнозування характеристик тротуару щодо постійної деформації, розтріскування від втоми знизу вгору та зверху вниз за допомогою моделей механістичного емпіричного керівництва з проектування тротуарів (MEPDG). Було розроблено код Matlab для виконання цього аналізу та отримання функції розподілу ймовірностей показників ефективності дорожнього покриття з часом. Було виявлено, що мінливість товщини шару дорожнього одягу та його жорсткість має значний вплив на характеристики дорожнього покриття. Крім того, було встановлено, що не тільки середнє значення прогнозованих показників ефективності зростає з часом, але і дисперсія цих показників також збільшується.

Це означає, що стан дорожнього одягу можна описати не середніми значеннями показників, а функцією розподілу ймовірностей, яка може описати стан дорожнього покриття на будь-якому рівні надійності.

Висновки. Дослідження показало, що температурні перепади в асфальтобетонному покритті мають великий вплив на кількість повітряних пустот та тривалість його служби. Важливо врахувати ці перепади під час будівництва для досягнення оптимальної щільності та покращення якості дорожнього покриття.

Гнучка система, яка включає модулі для керування процесом укладання асфальтобетонного покриття, має на меті покращити якість будівництва шляхом надання даних в реальному часі для точних стратегій укладання та ущільнення. Проте існують недоліки сучасних промислових рішень, і потрібні інтегровані рішення, що враховують конкретні потреби асфальто-будівельних компаній.

Автоматизація процесу керування формуванням асфальтно-бетонних покриттів є важливим кроком у покращенні інфраструктури автомобільних доріг. Ефективна система керування процесом може значно знизити витрати на ремонт доріг та підвищити якість дорожнього покриття.

Список літератури:

1. Sendy Lender. Prevent Temperature Segregation with a Thermal Profile. *AsphaltPro Magazine*. Jan.21. 2024.
2. How to Monitor Asphalt Temperature with IIoT Devices. Omega Company Brochure. *Michigan City, USA*, 2024. URL: <https://www.omega.com/en-us/resources/iiot-asphalt-temperature> (дата звернення: 19.03.2024).
3. Infrared Asphalt Repair: The Superior Pavement Repair Technique. *Everline Coatings*. August 18, 2022.
4. Efren Diez-Jimenez *et al.* Lightweight Equipment for the Fast Installation of Asphalt Roofing Based on Infrared Heaters. *Energies* 2019. Vol. 12 (22), 4253.
5. Chris Hill. Infrared, all-in-one, 3D pothole repair solutions on the rise, but the basics still rule. *Equipment World*. Jul 11, 2016.
6. Hofstrom, Brian. 10 Things You Should Know about Infrared Asphalt Restoration and Repair. *Asphalt. The magaz. of the asphalt institute* 2012. V27, № 3. P. 25-27.
7. Working Safely with Infrared. *Construction*. March 1, 2016. URL: <https://www.forconstructionpros.com> (дата звернення: 20.03.2024).
8. *Hot Oil Heaters – Thermal Fluid Heaters*. Meeker Equipment Company Brochure. Belleville, PA, USA. 2024. URL: <https://www.meekerequipment.com/productDetails-10> (дата звернення: 19.03.2024).
9. Thermal Oil Heaters with Natural Gas Burner. Sigma Thermal Brochure. URL: <https://www.sugimat.com/en/products/thermal-oil-heaters-with-natural-gas-burner> (дата звернення: 20.03.2024).
10. Speight, J. G. Asphalt Materials Science and Technology. Butterworth Heinemann. *Technology & Engineering* 2015. 650 p.
11. Speight, J. G. Asphalt Paving Technology: Proceedings of the Technical Sessions of the 2019 Annual Meeting of the Transportation Research Board. *National Academies Press*. 2019.
12. Ratman. Thermal oil heater asphalt. *PT. Indira Mitra Boiler* published 10.12.2023.
13. How to Prepare Your Asphalt Plant for Success During the Off-Season. Enerquip Brochure. Jan. 9, 2018. URL: <https://www.enerquip.com> (дата звернення: 20.03.2024).

14. Jahanbakhsh H. *et al.* Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244, 118837.
15. Kai Liu *et al.* Calculative method of effective induction heating depth and its influences on induction healing of dense-graded asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 359, 129388.
16. Hamid Jahanbakhsh *et al.* Induction heating and induced healing evaluation of the asphalt concretes incorporating conductive aggregates exposed to microwave radiation. *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 416, 135126.
17. Karimi M. M., Jahanbakhsh H., Nejad F. M. Energy-based approach to characterize induced heating of asphalt concrete under electromagnetic field. *Construction and Building Materials*. 2020. V. 273, 121762.
18. Mohammad M. Karimi *et al.* Induced heating-healing characterization of activated carbon modified asphalt concrete under microwave radiation. *Construction and Building Materials*. 2018 Vol. 178. P 254-271.
19. Jie Gao *et al.*, Microwave deicing for asphalt mixture containing steel wool fibers, *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 206. P 1110-1122.
20. H. Jahanbakhsh *et al.* Correlation between asphalt concrete induced healing and rheological properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 265, 120577.
21. Saeed Amani, Amir Kavussi, Mohammad M. Karimi, Effects of aging level on induced heating-healing properties of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 263, 120105.
22. Maliszewski M. *et al.* Full-Scale Use of Microwave Heating in Construction of Longitudinal Joints and Crack Healing in Asphalt Pavements. *Materials (Basel)*. 2021 Sep. 14(18): 5159. Doi: 10.3390/ma14185159.
23. Chen C., Williams R.C., Ahmed EI. T., Lee H.D., Schram S. Quality control/quality assurance testing for longitudinal joint density and segregation of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2013. 47:80–85. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.007.
24. Gulisano F., Gallego J. Microwave heating of asphalt paving materials: Principles, current status and next steps. *Constr. Build. Mater.* 2021; 278:121993. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121993.
25. Wang H., Zhang Y., Zhang Y., Feng S., Lu G., Cao L. Laboratory and Numerical Investigation of Microwave Heating Properties of Asphalt Mixture. *Materials*. 2019. 12:146. Doi: 10.3390/ma12010146.
26. Liu, Q.; Chen, C.; Li, B.; Sun, Y.; Li, H. Heating Characteristics and Induced Healing Efficiencies of Asphalt Mixture via Induction and Microwave Heating. *Materials (Basel)* 2018. 11, 913. <https://doi.org/10.3390/ma11060913>.
27. Ter Huerne H., Miller S., Dorée A. Monitoring hot mix asphalt temperature to improve homogeneity and pavement quality. *ResearchGate*. 2009.
28. Brock, J. D. & Jakob, H. Temperature Segregation/Temperature Differential Damage. *Astec Industries, Inc.* 1997.
29. Mahoney Joe P. *et al.* Construction related temperature differentials in asphalt concrete pavement – Identification and assessment. *Construction* 2000, 93-100. <https://doi.org/10.3141/1712-12>.
30. Makarov D. Developing a real-time process control system for asphalt paving and compaction. *PDEng Thesis*. University of Twenty. 2017. 65 p.
31. Hong, F., Guo, R., & Zhou, F. Impact of recycled asphalt pavement material variability on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2014. N15. P. 841 – 855. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.926284>.
32. Abed, A., Thom, N., & Neves, L. Probabilistic prediction of asphalt pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*. 2019. N20. P. 247 – 264. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1593229>.

Steshenko Ya.V., Protasov A.G. AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FORMATION ASPHALT AND CONCRETE COATINGS

The article analyzes the technologies for the formation of asphalt concrete road surface coatings. The current state of this industry indicates the need for large-scale research to improve the quality and durability of asphalt concrete coatings, as well as for automated monitoring of road construction. Attention is focused on the main component of the technological process of laying asphalt mixture – heating during laying. It has been established that the most popular technologies among builders can be conditionally divided into three groups. The first are infrared heaters, the second – heaters on hot oil, steam and indirect fire, and the third – electric heaters. The article considers the disadvantages of these methods, which limit their use. A significant disadvantage of infrared heaters is the presence of gas cylinders working under high pressure as part of their equipment. Electric heaters are the most promising. Today, such electric heaters as induction and microwave have shown their effectiveness in the repair of asphalt pavement with cracks due to the increase in the heating temperature of the mixture, which in road engineering is called healing. Electric heaters belong to innovative

technologies. Problems in road construction also include uniformity of compaction and temperature control of hot asphalt concrete mix. The results of the study showed that thermal imaging, especially with the use of infrared technology, can make a significant contribution to the quality control of asphalt concrete laying and compaction processes. The problem of variability in asphalt quality due to the influence of various parameters can be solved by implementing an automated real-time process control system that would provide asphalt crews with instant data for enhanced process control during construction.

Key words: *diagnostics of road surface, automation of coating technology, management of the process of laying the surface.*