

Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет

ІЛЛЯШ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 625.85

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ
АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: Доктор технічних наук, професор
Савенко Вячеслав Якович,
Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, м. Київ
завідувач кафедри транспортного будівництва та управління майном

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, професор
Батракова Анжеліка Геннадіївна,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, м. Харків
завідувач кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою

Кандидат технічних наук, доцент
Ільченко Володимир Васильович,
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» Міністерства освіти і науки України, м. Полтава
доцент кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель

Захист відбудеться « 29 » січня 2021 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02 у Національному транспортному університеті за адресою: 01010, Україна, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 209.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. Михайла Бойчука, 42.

Автореферат розісланий «28» грудня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О.Ю. Усиченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Мережа автомобільних доріг загального користування відповідає темпам розвитку національної економіки. Проте, транспортно-експлуатаційний стан переважної більшості автомобільних доріг не є задовільним: 85 % усіх автомобільних доріг мають високу зношеність та потребують капітального або поточних ремонтів, 35 % автомобільних доріг державного значення не відповідають вимогам за міцністю, а 51 % – за рівністю. Незадовільний стан автомобільних доріг відображається на зниженні експлуатаційної швидкості транспортних засобів, підвищенні витрати палива та збільшенні частки перевезення у собівартості продукції. Ці фактори стримують збільшення транспортного потоку, зокрема транзитних перевезень, які приносять додаткові кошти до дорожнього фонду. Вчасно не проведений ремонт дорожнього одягу призводить до постійного накопичування руйнувань і зменшення несної здатності конструкції. В умовах значної потреби коштів на відновлення дорожньої мережі пріоритетним напрямком розвитку дорожнього господарства є саме удосконалення технологій ремонту існуючих автомобільних доріг. Традиційний ремонт нежорсткого дорожнього одягу виконується шляхом збільшення його товщини або заміни верхніх шарів на шари з вищими деформаційно-міцнісними характеристиками. Виконання такого комплексу робіт дозволяє підсилити конструкцію дорожнього одягу, відновити транспортно-експлуатаційні характеристики дороги, проте, потребує значних коштів та запасу дорожньо-будівельних матеріалів. За умови сталої тенденції до подорожчання дорожньо-будівельних матеріалів, зокрема бітуму, який імпортується, актуальними є технології повторного їх використання. Одним з перспективних шляхів відновлення транспортно-експлуатаційних характеристик доріг з асфальтобетонним покриттям є технологія його гарячої регенерації, яка виконуються комплексом спеціальних машин на дорозі (гаряча регенерація на дорозі).

Основа процесу гарячої регенерації на дорозі полягає у розігріванні шару покриття, його рихленні, введенні нових матеріалів, зокрема добавок – за необхідності, перемішуванні, укладанні та ущільнюванні шару регенованої суміші з проведенням всіх технологічних операцій безпосередньо на дорозі. Влаштований, таким чином, шар може бути дорожнім покриттям або перекриватись асфальтобетоном чи шарами з литих емульсійно-мінеральних сумішей, поверхневої обробки.

Останні роки технологія гарячої регенерації на дорозі досить часто була представлена на ринку дорожніх робіт, що дало змогу визначити її основні переваги та недоліки. Проте, недостатній обсяг наукових досліджень в даній області і, як наслідок, відсутність належної нормативної бази стримує більш широке застосування зазначеної технології при ремонті вітчизняних доріг.

Стримуючим фактором є також відсутність рекомендацій щодо вибору технологічних режимів, що забезпечать більш раціональний з економічної складової варіант ремонту.

Таким чином, актуальність роботи полягає у вирішенні наступної науково-практичної задачі – удосконаленні технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі шляхом дослідження властивостей асфальтобетонів, отриманих

після регенерації та відпрацювання на основі їх результатів раціональних технологічних режимів, які забезпечать економічну ефективність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає напрямам і завданням державних науково-технічних програм: «Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р), «Державна цільова економічна програма розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 21.03.2018 р. № 382).

Наукові результати одержані у процесі виконання науково-дослідних робіт кафедрою транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету: «Удосконалення системи управління станом автомобільних доріг та методів їх оцінки» (РК 0116U002491); «Розроблення сучасних методів проектування, будівництва та експлуатації дорожніх конструкцій, транспортних споруд та інженерних мереж земляного полотна» (РК 0114U006496) та Тематичним планом науково-дослідних робіт Державного агентства автомобільних доріг України: «Провести дослідження та розробити рекомендації і типову технологічну карту з відновлення зношеного шару асфальтобетонного покриття за технологією «гарячий» ресайклінг» (договір № 64-14, РК 0114U003596) та «Провести дослідження технології гаряча регенерація на дорозі та підготувати пропозиції щодо її застосування для різних типів та видів асфальтобетонів» (договір № 49-17, РК 0117U001940).

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в розробленні теоретико та експериментально обґрунтованих методів удосконалення технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі з встановленням раціональних технологічних режимів.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні *задачі*:

- проаналізувати та встановити найбільш вагомні фактори, що впливають на ефективність технології гарячої регенерації на дорозі;
- розробити математичну модель зміни основних фізико-механічних характеристик регенованого асфальтобетону в залежності від зміни найбільш вагомних технологічних параметрів на основі теорії планування експерименту;
- на підставі математичного моделювання визначити раціональний вміст добавки для відповідних значень залишкового бітуму;
- встановити раціональний час розігріву асфальтобетонного покриття на основі проведених натурних досліджень з розробкою математичної моделі;
- обґрунтувати техніко-економічну доцільність застосування технології гарячої регенерації на дорозі та визначити область її раціонального застосування; розробити практичні рекомендації; провести дослідне виробниче впровадження отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – процес відновлення асфальтобетонних покриттів.

Предмет дослідження – технологія гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі.

Методи дослідження: метод аналізу; метод експертних оцінок; теорія планування експерименту; метод порівняння, розрахунково-дослідний та розрахунково-аналітичний методи, економічна оцінка.

Наукова новизна отриманих результатів:

- обґрунтовано основні параметри технології гарячої регенерації на дорозі з використанням методу факторного аналізу;
- на основі теоретико-експериментальних досліджень вперше отримано математичні моделі залежності фізико-механічних характеристик регенованого асфальтобетону від зміни температури перемішування регенованої суміші та вмісту регенеруючої добавки, реалізація яких дала можливість встановити їх раціональні області;
- вперше отримано математичні моделі процесу розігріву асфальтобетонного покриття на основі натурних досліджень та встановлено оптимальні температурні режими розігріву;
- розроблено методологію вибору найбільш раціональних параметрів технології регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі.

Практичне значення отриманих результатів: полягає в розширенні можливостей використання технології гарячої регенерації на дорозі, визначенні найбільш раціональних областей її застосування. Розроблені рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі та визначена економічна ефективність технології.

Матеріали досліджень були впроваджені в Державному агентстві автомобільних доріг України при розробленні нормативних галузевих документів: Р В.3.2-03450778-837:2014 «Рекомендації з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі», ТТК 37641918/03450778-174:2014 «Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі методом Ремікс», ТТК 37641918/03450778-183:2014 «Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі методом «Ремікс плюс», Р В.2.3-37641918-899:2018 «Рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі без зміни та зі зміною складу асфальтобетону». Також результати досліджень були впроваджені у Службі автомобільних доріг Чернігівської області, при ремонті міжнародної автомобільної дороги державного значення М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (км 103+010 – км 103+628 (права смуга)) та у навчальному процесі, а саме при викладанні дисциплін «Експлуатація автомобільних доріг», «Сучасні технології будівництва автомобільних доріг» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

Апробація основних теоретичних і практичних результатів дисертації на підприємствах та в організаціях підтверджується відповідними актами про впровадження.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно. Внесок автора в опублікованих зі співавторами наукових працях:

- автором проаналізовано технологічні та вартісні аспекти впровадження гарячої регенерації на дорозі [2, 4, 8, 9];
- проаналізовано досвід впровадження зазначеної технології в Україні [5, 10, 11, 12, 14, 15];
- проведено аналіз якості влаштування асфальтобетонних шарів в залежності від впливу остигання суміші на етапі її транспортування [6];
- обґрунтовано основні параметри технології гарячої регенерації на дорозі [1, 7, 13, 17, 18, 19, 20];
- визначено найбільш вагомі фактори впливу на ефективність технології гарячої регенерації на дорозі [1, 16];
- розроблено математичні моделі зміни фізико-механічних характеристик регенованого асфальтобетону в залежності від зміни основних технологічних параметрів [1, 16];
- розроблено математичні моделі розігріву асфальтобетонного покриття з метою встановлення раціонального часу розігріву [3].

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів: підтверджується застосуванням фізично обґрунтованих (на основі експериментальних даних) математичних моделей, які перевірені на адекватність; достатнім обсягом експериментальних даних, що отримані з використанням сучасного лабораторного обладнання; апробацією результатів роботи під час виробничого впровадження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на: міжнародній науково-практичній конференції «Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців» 2014 року, м. Харків; міжнародному форумі з будівництва, експлуатації та проектування автомобільних доріг і мостів «Автодорекспо» в 2014 р. та 2016 р.; наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету в 2016 р., 2019 р. та 2020 р.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 20 наукових праць, у тому числі: 7 у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України (1 стаття у виданні, яке включене до наукометричної бази Scopus); 1 стаття у зарубіжних періодичних наукових виданнях; 7 у збірниках праць за матеріалами наукових конференцій; 4 праці додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 132 найменувань та чотири додатки. Основний текст викладений на 130 сторінках. Текст ілюструється 45 рисунками і містить 28 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність дисертаційної теми, сформульовані мета та задачі дослідження. Визначена наукова новизна роботи, наведені основні наукові результати, показано практичне значення отриманих результатів та їх напрямки впровадження у виробництво.

У **першому** розділі проаналізовано стан питання щодо відновлення транспортно-експлуатаційних характеристик дорожнього асфальтобетонного покриття, виділені основні технологічні рішення з поточних ремонтів нежорсткого дорожнього одягу. Всі вони передбачають заміну верхнього шару дорожнього покриття або нарощування нових шарів зносу. Це спричиняє ряд суттєвих недоліків, основним з яких є значні фінансові витрати на влаштування нових шарів покриття. Враховуючи нагальну потребу у відновленні мережі автомобільних доріг, пріоритетним напрямком досліджень є ресурсозберігаючі технології, використання яких дозволяє досягнути значної фінансової економії шляхом оптимізації будівельних процесів, використання сучасної будівельної техніки та повторного використання будівельних матеріалів. До таких технологій відноситься гаряча регенерація на дорозі.

На основі аналізу світового досвіду застосування вищезазначеної технології встановлено раціональну область її використання – поточні ремонти автомобільних доріг, коли за незначні фінансові затрати необхідно відновити транспортно-експлуатаційні показники дорожнього одягу, ліквідувати його руйнування та деформації та продовжити строк служби.

Аналіз результатів досліджень технології гарячої регенерації на дорозі та досвіду її впровадження дають змогу сформулювати наступну наукову **гіпотезу**:

- враховуючи, що вартість гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі суттєво залежить від витрат газу на розігрів покриття, зменшення температури розігрівання дасть змогу зменшити витрату газу та, відповідно, собівартість виконання робіт;

- досягнути зменшення температури розігрівання покриття можливо за рахунок встановлення раціональних технологічних режимів регенерації та введення спеціальних добавок. При цьому якість регенованого асфальтобетону повинна задовольняти вимоги нормативних документів.

Наведений огляд робіт показав відсутність науково-обґрунтованого підходу до вибору параметрів технології регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі. Відсутні кількісні залежності, які дозволяють прогнозувати фізико-механічні властивості асфальтобетону при зміні технологічних параметрів.

У **другому** розділі наведені теоретичні аспекти дослідження властивостей регенованого асфальтобетону.

При вивченні апріорної інформації щодо вибору найбільш вагомих факторів, які впливають на процес гарячої регенерації асфальтобетону було проаналізовано результати вітчизняних та закордонних досліджень: А.Г. Батракової, Г.С. Бахраха, Л.В. Білай, І.П. Гамеляка, В.І. Братчуна, Л.Б. Гезенцвея, М.В. Горелишева, В.К. Жданюка, В.О. Золотарьова, В.В. Ільченка, А.І. Макаrchука, В.В. Мозгового,

А.М. Онищенко, Б.С. Радовського, І.А. Риб'єва, А.В. Руденського, В.Я. Савенка, Г.К. Сюньї та їхніх учнів і послідовників.

Ефективність технології гарячої регенерації на дорозі суттєво залежить від якості отриманої регенованої суміші (РГС) та витрат, пов'язаних з її використанням. Високі фізико-механічні показники РГС забезпечуються раціональним поєднанням технологічних параметрів процесу, які призначаються за результатами попередніх досліджень. При встановленні таких параметрів прагнуть орієнтуватися на оптимальні режими, при яких досягається найкраща взаємодія компонентів і більш повно протікають фізико-хімічні процеси.

Враховуючи велику кількість параметрів, що впливають на кінетику процесу гарячої регенерації, дослідження їх в повному комплексі призведе до збільшення обсягу експериментальних досліджень, часу та значних економічних витрат на їх реалізацію. З метою зменшення таких витрат проведені дослідження залежності фізико-механічних показників регенованої гарячої асфальтобетонної суміші від одночасного впливу декількох найбільш вагомих факторів в процесі її приготування.

З метою встановлення найбільш вагомих факторів, що впливають на фізико-механічні показники регенованого асфальтобетону, використаний метод експертних оцінок.

В якості факторів, що включені в опитування, були прийняті основні технологічні та технічні показники (табл. 1). Вибір факторів обґрунтовано експертною оцінкою фахівців та вимогами ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови».

Таблиця 1 – Фактори та їх кодовані позначення

Досліджувана змінна (фактор)	Позначення фактора
Вміст старого бітуму	X_1
Вміст доданого бітуму	X_2
Температура перемішування суміші при приготуванні	X_3
Вміст регенеруючої добавки	X_4
Тривалість перемішування суміші при приготуванні	X_5
Температура розігріву покриття	X_6
Зерновий склад	X_7
Температура ущільнення суміші	X_8
Однорідність перемішування	X_9

На основі даних анкетного опитування була складена зведена матриця рангів.

Перевірку правильності складання матриці на основі обчислення контрольної суми визначали за формулою:

$$\sum_{i=1}^k b_{ji} = \frac{(1+k)k}{2}, \quad (1)$$

де k – кількість досліджуваних факторів.

Наступним етапом був аналіз значимості досліджуваних факторів.

Для оцінки узагальненої міри узгодженості думок за всіма факторами розрахований коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^n \Delta_j^2}{\left(n^2 (k^3 - k) - n \sum_{j=1}^n T_j \right)}, \quad (2)$$

де Δ_j – відхилення суми рангів від середнього;

$$T_j = \sum_{\eta_r=1}^{l_j} (\eta_r^3 - \eta_r), \quad (3)$$

де η_r – чисельність груп однакових рангів j -го фахівця;

l_j – кількість груп однакових рангів j -го фахівця.

Коефіцієнт конкордації показав достатній ступінь узгодженості думок експертів.

З метою оцінки вагомості коефіцієнта конкордації розраховували критерій узгодження Пірсона, який підтвердив, що отриманий коефіцієнт конкордації – величина не випадкова, а тому отримані результати мають сенс і можуть використовуватися в подальших дослідженнях.

Для розрахунку показників вагомості кожного фактора матрицю, отриману за результатами опитування, відобразили через матрицю перетворених рангів, використовуючи формулу:

$$S_{ij} = X_{\max} - X_j, \quad (4)$$

де $X_{\max} = 9$.

Отримали найбільш значимі фактори X_3 та X_4 , тобто температуру перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки, у подальших дослідженнях відповідно $X1$ і $X2$.

У третьому розділі наведені результати роботи з визначення області раціональних технологічних параметрів найбільш вагомих факторів. З цією метою використовували метод експериментально-статистичного моделювання.

Для проведення дослідження були прийняті (отримані у другому розділі) два найбільш вагомні фактори (температура перемішування суміші при приготуванні ($X1$) та вміст регенеруючої добавки ReActive ACF ($X2$)) на трьох цілочисельних рівнях -1, 0, +1. В якості параметрів оптимізації приймали наступні показниками фізико-механічних властивостей регенованого асфальтобетону – водонасичення ($Y1$) та границі міцності на стиск за температури 0 °C ($Y2$) та 50 °C ($Y3$).

Кількість експериментів, які повинні проводитись, визначено за формулою:

$$N_e = m^n, \quad (5)$$

де m – кількість рівнів;

n – кількість факторів.

Встановлено, що кількість експериментів, що потрібні для вирішення завдань оптимізації – 9.

Важливим етапом планування експерименту є вибір математичної моделі. З урахуванням аналізу апріорної інформації на першому етапі дослідження була вибрана неповна квадратична модель:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (6)$$

де b_0 – вільний член рівняння;

b_i – коефіцієнти лінійних членів рівняння;

b_{ij} – коефіцієнти членів парних взаємодій рівняння;

x_i, x_j – кодований вид вхідних факторів.

Для визначення коефіцієнтів b_0, b_i, b_{ij} було складено 3 рівняння, невідомими в яких є параметри функції та проведено 9 дослідів за планом повного факторного експерименту. Експерименти проводили з урахуванням вимог ДСТУ Б В.2.7-319:2016 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань». В якості матеріалу для дослідження було обрано регеновану гарячу асфальтобетонну суміш, яка за зерновим складом та вмістом бітуму відповідала суміші гарячій, дрібнозернистій, асфальтобетон щільний, типу А, непереривчастої гранулометрії відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Вміст залишкового бітуму розпушеної асфальтобетонної крихти становив 6,0 %.

Математична модель для параметра оптимізації – водонасичення регенованого асфальтобетону наступна:

$$Y_1 = 3,85 - 0,67X_1 - 0,25X_2, \quad (7)$$

При розрахунку неповного квадратичного рівняння за формулою (6) для визначення залежностей границі міцності на стиск при 0 °C та 50 °C отримали математичні моделі, які не достатньо точно описували експериментальні дані, тому було вибрано квадратичну модель:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_i^k b_{ii} x_i^2, \quad (8)$$

де b_{ii} – коефіцієнти членів квадратичних взаємодій рівняння.

Математичні моделі наступні:

– для параметра оптимізації границі міцності на стиск за температури 0 °С:

$$Y2 = 9,64 + 1,18X1^2 + 0,76X2^2, \quad (9)$$

– для параметра оптимізації границі міцності на стиск за температури 50 °С:

$$Y3 = 1,05 - 0,05X1 - 0,14X2 + 0,12X1^2 + 0,11X2^2. \quad (10)$$

Граничні значення для вихідних параметрів встановлені ДСТУ Б В.2.7-119:2011: $Y1$ – 3,5 %; $Y2$ – 13 МПа; $Y3$ – 1,1 МПа. Аналізуючи графічні залежності рис. 1 та граничні значення вихідних параметрів зроблено висновок, що $Y2$ та $Y3$ повністю задовольняють всі досліджувані області, а $Y1$ тільки в межах 3,5 %.

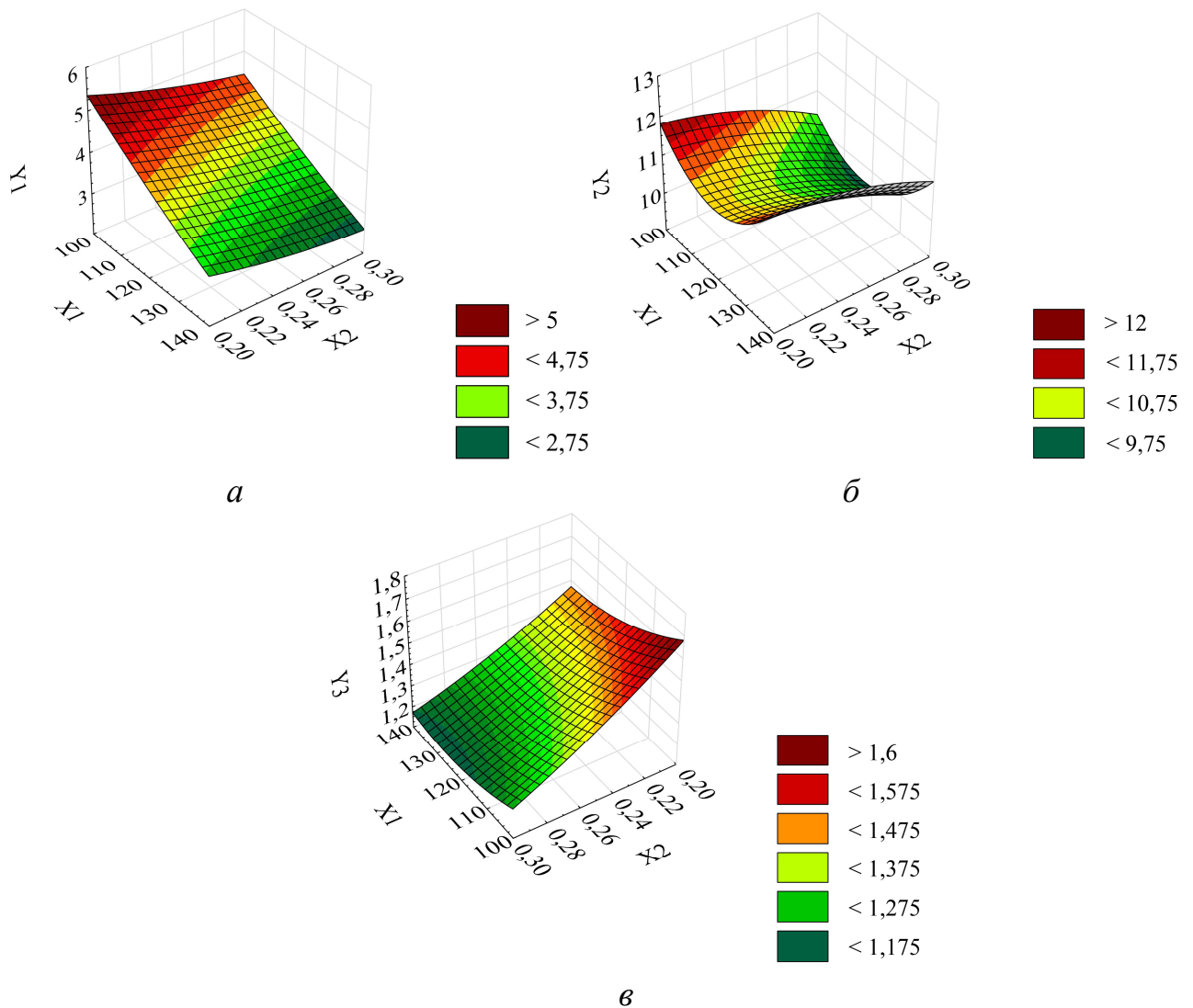


Рисунок 1 – Тривимірні графічні залежності: *a* – залежність $Y1$ від $X1$ та $X2$; *б* – залежність $Y2$ від $X1$ та $X2$; *в* – залежність $Y3$ від $X1$ та $X2$

Реалізацію процедури визначення раціонального температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки при гарячій регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі зображено на рис. 2. З цією метою були вибрані значення бажаності для кожної функції відгуку. При виборі враховували їх граничні значення, що наведені в ДСТУ Б В.2.7-119:2011.

Додавання окремих графіків дають можливість визначити раціональні області вихідних параметрів.

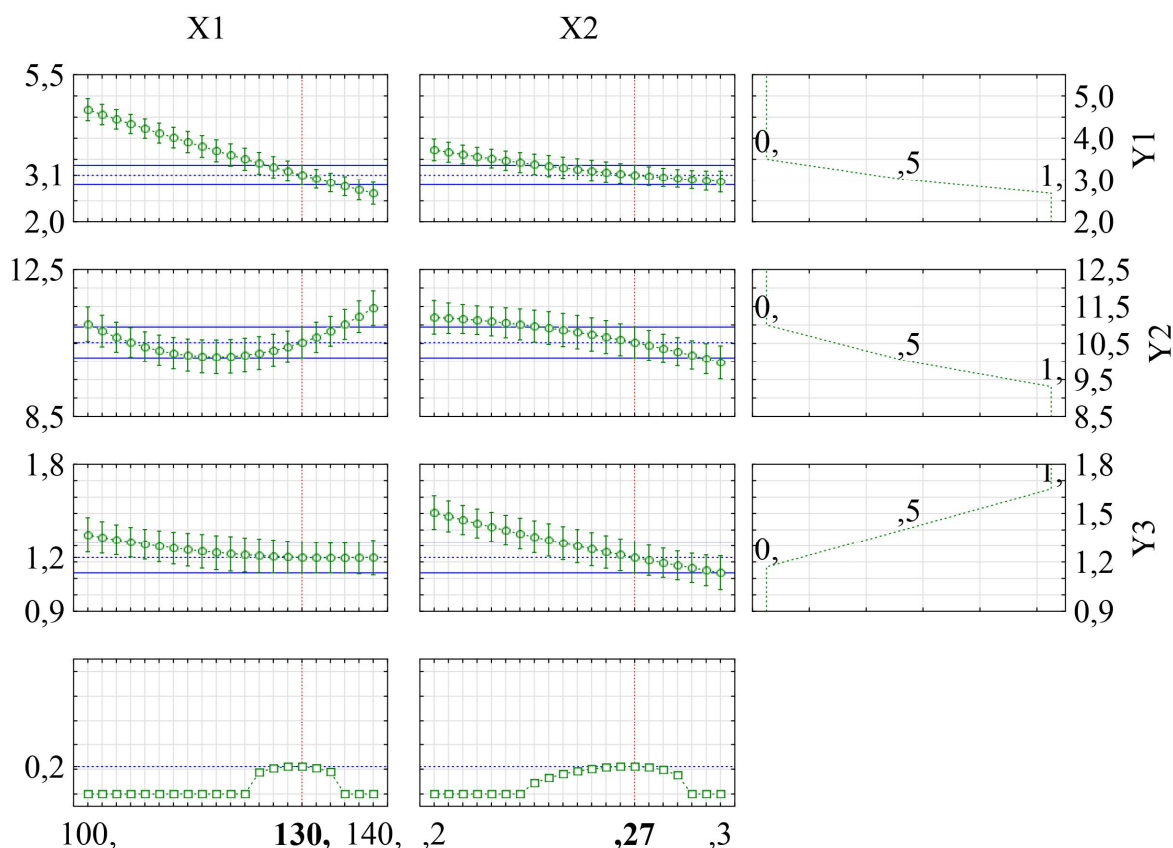


Рисунок 2 – Графіки знаходження раціонального співвідношення температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки

Враховуючи граничні значення параметрів оптимізації встановлені раціональні області факторів, що досліджувались:

- температура приготування суміші – (125–135) °C;
- вміст регенеруючої добавки – (0,26–0,28) %.

На основі експериментальних досліджень і виконаних розрахунків встановлено, що раціональний діапазон залишкового вмісту бітуму в регенований суміші, при якому властивості регенованого асфальтобетону будуть задовольняти вимогам щодо традиційних гарячих асфальтобетонів становить – (5,70–6,85) %. Вміст добавки при цьому доцільно встановлювати:

- для залишкового вмісту бітуму (5,70–6,30) % – добавка (0,30–0,20) %;
- для вмісту бітуму (6,30–6,85) % – добавка (0,20–0,25) %.

З метою встановлення раціональної тривалості розігрівання покриття проведені натурні дослідження зміни температури розігрівання покриття в залежності від швидкості руху термічної установки та температури навколишнього середовища.

Отримані результати вимірювань дали змогу розробити математичні моделі, що характеризують функції зміни температури в залежності від глибини розігрівання (y_1, y_4 – на поверхні; y_2, y_5 – на глибині 3 см; y_3, y_6 – на глибині 5 см):

при температурі навколишнього середовища 25-30 °С, швидкості руху термічної установки 1,8 м/хв (y_1 – y_3) та 2,1 м/хв (y_4 – y_6):

$$y_1 = 63,21 + 23,74x - 1,12x^2, \quad (11)$$

$$y_2 = 70,57 - 31,87x + 10,22x^2 - 0,65x^3, \quad (12)$$

$$y_3 = 46,98 - 2,35x + 0,91x^2, \quad (13)$$

$$y_4 = 44,86 + 32,25x - 2,39x^2, \quad (14)$$

$$y_5 = 62 - 21,72x + 7,19x^2 - 0,44x^3, \quad (15)$$

$$y_6 = 49,29 - 4,17x + 1,12x^2, \quad (16)$$

при температурі навколишнього середовища 10 °С, швидкості руху термічної установки 1,8 м/хв (y_1 – y_3) та 2,1 м/хв (y_4 – y_6):

$$y_1 = 56,98 + 18,27x - 0,54x^2, \quad (17)$$

$$y_2 = 42,57 - 10,21x + 3,81x^2 - 0,17x^3, \quad (18)$$

$$y_3 = 32,64 + 1,45x + 0,40x^2, \quad (19)$$

$$y_4 = 49,71 + 17,12x - 0,52x^2, \quad (20)$$

$$y_5 = 36,71 - 2,60x + 1,33x^2, \quad (21)$$

$$y_6 = 36,71 - 1,75x + 0,61x^2. \quad (22)$$

Аналіз вищезазначених математичних моделей підтверджує, що зменшення температури розігріву покриття на (10–20) °С приведе до збільшення продуктивності термічної установки. У такому випадку збільшення продуктивності може складати від 20 % до 25 %, що зменшить витрату газу та, відповідно, собівартість робіт.

У роботі обґрунтовано розрахунок гранулометричного складу регенованих асфальтобетонних сумішей. Особливості підбору складу мінеральної частини РГС у технології гарячої регенерації на дорозі полягають у застосуванні асфальтобетону існуючого покриття виключно у нефракціонованому вигляді. Також при виконанні робіт з гарячої регенерації на дорозі розрахункова кількість нових мінеральних матеріалів, яка забезпечує відповідність гранулометричного складу РГС нормативним вимогам до асфальтобетону необхідного типу, виду та групи, не завжди забезпечує дотримання проектної товщини шару. У зв'язку з цим, при застосуванні нових мінеральних матеріалів для коригування складу старого асфальтобетону розрахунок гранулометричного складу виконаний з урахуванням проектних вимог за однією з схем: з обмеженням або без обмеження максимальної товщини шару РГС.

З метою оцінювання ефективності гарячої регенерації в залежності від строку експлуатації було визначено показник колієстійкості регенованого асфальтобетону шляхом проведення відповідних випробувань згідно з вимогами AASHTO T 324. Випробування проведені з використанням водяної бані, при температурі 50 °С. В якості вихідного матеріалу для приготування регенованого асфальтобетону використаний асфальтобетон зі строком служби 10 та 20 років.

Результати випробувань показали, що більш колієстійким є регенований асфальтобетон, приготовлений з асфальтобетону зі строком служби 10 років. Зразки такого матеріалу витримали до 20000 циклів проходу колеса і не були зруйновані, тобто працювали в пружному стані. Зразки регенованого асфальтобетону, приготовленого з асфальтобетону зі строком служби 20 років витримали близько 5000 циклів проходу колеса.

Отримані експериментальні дані підтверджують результати теоретичних досліджень та аналізу світового досвіду, які показують, що гаряча регенерація дорожніх одягів є максимально ефективною, коли їх строк експлуатації не перевищує (8–10) років.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений практичному впровадженню результатів досліджень.

Одним із результатів наукових досліджень є розроблені рекомендації з відновлення шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі.

Розроблені рекомендації встановлюють:

- класифікацію методів гарячої регенерації;
- особливості технологічних процесів гарячої регенерації у залежності від виду дефектів покриття та міри ураженості покриття;
- вимоги до матеріалів;
- методологію вибору найбільш раціональних параметрів технології.

Визначення ефективності різних технологій ремонту у дисертаційній роботі було здійснено шляхом порівняння приведених витрат на 1000 м² дорожнього покриття, що складаються з вартості ремонтних робіт, собівартості матеріалів, витрат на експлуатаційне утримання протягом всього строку порівняння (T). В якості критерію оцінки порівняльної ефективності технологій використано мінімальне значення показника інтегральних витрат $B_{заг}$, який включає також і втрати користувачів доріг при виконанні ремонтних робіт.

Для порівняння витрат за різними технологіями ремонту використано наступну формулу:

$$B_{заг} = \sum_{i=1}^n \left[(B_{Пс} (1+E)^i) n \right] + \sum_{i=1}^m \left[(B_{Пд_Еу} (1+E)^i) m \right] + \sum B_{СЕ}^P (1+E)^i, \quad (23)$$

де n – кількість поточних середніх ремонтів, які виконуються протягом порівняльного строку T ;

$B_{Пс}$ – витрати на поточні середні ремонти дорожнього одягу;

$(1+E)$ – коефіцієнт дисконтування витрат;

E – безризикова норма дисконту у відносних одиницях виміру;

t – рік розрахунку;

m – кількість років експлуатаційного утримання та поточного дрібного ремонту дорожнього одягу автомобільної дороги за обраним варіантом виконання робіт;

$B_{По_Еу}$ – витрати на поточний дрібний ремонт та експлуатаційне утримання дорожнього одягу;

B_{CE}^P – втрати користувачів доріг при виконанні ремонтних робіт.

Встановлено, що при порівнянні лише вартостей ремонту економічно вигідними методами відновлення транспортно-експлуатаційних характеристик автомобільних доріг є поверхнева обробка та технологія гарячої регенерації за методом Reshape (застосовують для усунення колійності та інших нерівностей покриття переважно на глибину до 20 мм зі зміною, за необхідності, поперечного профілю покриття).

Технології гарячої регенерації асфальтобетону та влаштування шарів зносу з литих емульсійно-мінеральних сумішей є економічно вигідними при проведенні порівняння на міжремонтний (5 років для поточного середнього ремонту) строк.

Проведення дослідження впливу температури розігріву асфальтобетону на вартість технології гарячої регенерації показало, що зменшення температури розігріву газу на (10–20) °C приведе до економії витрат газу, що суттєво зменшить витрати на матеріали в загальній структурі собівартості робіт. Так при технології Remix собівартість робіт може зменшитись в діапазоні від 8,2 % до 13 %. У свою чергу при технології Reshape, яка є більш енергозалежною, зменшення собівартості робіт може складати від 11 % до 16 %.

Результати досліджень впроваджено при розробленні державних та галузевих нормативних документів, зокрема державного стандарту на кошторисні норми (ДСТУ Б Д.2.2-27:2016), галузевих рекомендацій (Р В.3.2-03450778-837:2014, Р В.2.3-37641918-899:2018), технологічних карт; при ремонті міжнародної автомобільної дороги державного значення М 01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі, в Чернігівській області (км 103+010 – км 103+628 (права смуга)) і підтверджено відповідними довідками із таких організацій: Державне агентство автомобільних доріг України, Служба автомобільних доріг у Чернігівській області, ТОВ «АБЗ-1», ТОВ «СТІ».

Матеріали досліджень були впроваджені у навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін «Експлуатація автомобільних доріг», «Сучасні технології будівництва автомобільних доріг» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична задача, що полягає в удосконаленні технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі. Отримані нові наукові результати, які дозволяють встановлювати чіткі параметри технологічного процесу та забезпечувати отримання більш економічних рішень при виконанні робіт з поточних ремонтів автомобільних доріг.

1. На основі аналізу світового досвіду відновлення властивостей асфальтобетонного покриття обґрунтовано доцільність застосування технології гарячої регенерації на дорозі. Узагальнені теоретичні передумови визначення найбільш вагомих параметрів, які впливають на фізико-механічні характеристики регенованого асфальтобетону. На підставі експертної оцінки, з використанням факторного аналізу, встановлено, що такими параметрами є температура перемішування суміші та вміст регенеруючої добавки.

2. Методом експериментально-статистичного моделювання отримані математичні моделі залежності основних фізико-механічних характеристик регенованого асфальтобетону від зміни найбільш вагомих параметрів технологічного процесу регенерації. Реалізація розроблених математичних моделей дала змогу встановити раціональні діапазони зміни температури приготування (125–135) °C та вмісту регенеруючої добавки (0,26–0,28) % при середньозваженому вмісті бітуму 6 %.

3. Визначено раціональний діапазон вмісту бітуму в регенованих асфальтобетонних сумішах (5,70–6,85) % для збереження нормативних показників водонасичення та міцності.

4. Проведені натурні дослідження та розроблені математичні моделі розігріву асфальтобетонного покриття з використанням інфрачервоних розігрівачів. Реалізація математичних моделей та отримані графічні залежності дозволили встановити раціональний час розігріву залежно від температури навколишнього середовища та необхідної температури перемішування суміші. Використання регенеруючої добавки, встановлення раціональної температури перемішування при приготуванні суміші та, відповідно, часу розігріву дозволяють підвищити продуктивність роботи машин на 20–25 %.

5. На підставі техніко-економічного обґрунтування підтверджена доцільність застосування технології гарячої регенерації на міжремонтний строк для поточного середнього ремонту. Оптимізовано технологічний процес гарячої регенерації, що дозволило зменшити витрату газу та собівартість виконання робіт на 16 %. Розроблено методологію вибору раціональних параметрів технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі.

6. Результати досліджень впроваджено при розробленні державних та галузевих нормативних документів, зокрема державного стандарту на кошторисні норми, рекомендацій, технологічних карт; при ремонті міжнародної автомобільної дороги державного значення М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (км 103+010 – км 103+628 (права смуга)) і підтверджено відповідними довідками із таких організацій: Державне агентство автомобільних доріг України, Служба автомобільних доріг у Чернігівській області, ТОВ «АБЗ-1», ТОВ «СТІ».

Також результати досліджень були впроваджені у навчальний процес, а саме при викладанні дисциплін «Експлуатація автомобільних доріг», «Сучасні технології будівництва автомобільних доріг» та в дипломному проектуванні для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, ОП «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:**

1. Savenko V., Honcharenko V., Illiash S., Mudrychenko A., Balashov I. Substantiating the choice and optimizing the parameters for the technology of hot recycling of asphalt concrete road coating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 3/1 (105). P. 76-84.

2. Savenko V., Illiash S., Stasyuk T. Feasibility study for the applicability of applying the hot recycling technology for repair of asphalt concrete pavements. *World science*. 2020. № 5 (57). P. 7-13.

3. Savenko V., Illiash S., Stasiuk T. Research of temperature change of pavement heating in the process of hot in-place recycling of asphalt concrete. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 2/1 (52). P. 11-13.

Статті у фахових виданнях:

4. Ілляш С. Технологічні та вартісні аспекти впровадження гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі. *Автомобіляховик України*. 2014. № 6. С. 40-43.

5. Nagaychuk V., Illiash S., Tereshchenko T. Experience on implementation of Hot in-place recycling of asphalt concrete in Ukraine. *Автомобіляховик України*. 2018. № 4. С. 28-36.

6. Мінаков О.С., Ілляш С.І. Дослідження якості влаштування асфальтобетонних шарів в залежності від впливу остигання суміші на етапі її транспортування. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2018. Вип. 105. С.50-58.

7. Савенко В.Я., Ілляш С.І., Терещенко Т.А. Класифікація технологій гарячої регенерації дорожнього асфальтобетону методами “in place”. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 107. С. 46-55.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Ілляш С.І., Головка С.К., Свистун А.Я. Відновлення асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі. *Дороги і мости*. 2014. Вип. 14. С. 43-47.

9. Ілляш С.І. Особливості технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття автомобільної дороги. *Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців* : Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків, ХНАДУ, 2014. С. 93-98.

10. Головка С.К., Ілляш С.І. Досвід впровадження сучасних технологій ремонту нежорстких дорожніх одягів. *Автомобіляховик*. Київ, 2014.

11. Головка С.К., Ілляш С.І. Досвід впровадження технологій холодного та гарячої регенерації нежорстких дорожніх одягів. *Автомобіляховик*, Київ, 2016.

12. Савенко В.Я., Ілляш С.І. Аналіз результатів моніторингу ділянок автомобільних доріг, відновлених за технологією гарячої регенерації асфальтобетонного покриття. *LXXII Наукова конференція професорсько-*

викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ. Київ, 2016. С. 123.

13. Нагайчук В.М., Ілляш С.І., Терещенко Т.А. Особливості гарячої регенерації на дорозі зі зміною гранулометричного складу асфальтобетонної суміші. *Автошляховик України*. 2018. № 4. С. 20-27.

14. Савенко В.Я., Ілляш С.І. Практичні аспекти застосування технології гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі. *LXXV Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ*. Київ, 2019. С. 152-153.

15. Савенко В.Я., Ілляш С.І. Відновлення доріг місцевого значення із застосуванням технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття. *LXXVI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ*. Київ, 2020. С. 122.

16. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я., Ілляш С.І. Встановлення можливості використання регенераторів (пластифікуючих добавок) для гарячої регенерації асфальтогранулятової крихти. *LXXVI Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ*. Київ, 2020. С. 143-144.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. Р В.3.2-03450778-837:2014. Рекомендації з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі. Київ, 2014. 36 с.

18. ТТК 37641918/03450778-174:2014. Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі методом «Ремікс». Київ, 2014. 21 с.

19. ТТК 37641918/03450778-183:2014. Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі методом «Ремікс плюс». Київ, 2014. 24 с.

20. Р В.2.3-37641918-899:2018. Рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі без зміни та зі зміною складу асфальтобетону. Київ, 2014. 38 с.

АНОТАЦІЯ

Ілляш С.І. Удосконалення технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача, що полягає в удосконаленні технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі. Це дозволило отримати нові наукові результати для більш точного встановлювання параметрів технологічного процесу та забезпечило отримання більш економічних рішень при виконанні робіт з поточних ремонтів автомобільних доріг.

Проведені теоретико-експериментальні дослідження з використанням теорії планування експерименту дозволили розробити математичні моделі зміни основних фізико-механічних характеристик регенованого асфальтобетону в залежності від зміни температури перемішування суміші та вмісту регенеруючої добавки.

Проведені натурні дослідження та розроблені математичні моделі розігріву асфальтобетонного покриття з використанням інфрачервоних розігрівачів. Реалізація математичних моделей та отримані графічні залежності дозволили встановити раціональний час розігріву в залежності від температури навколишнього середовища та необхідної температури перемішування суміші.

Розроблено методологію вибору раціональних параметрів технології регенерації асфальтобетонного покриття на дорозі.

Ключові слова: автомобільна дорога, гаряча регенерація, дорожнє покриття, регенований асфальтобетон, регенеруюча добавка, реміксер.

АННОТАЦИЯ

Илляш С.И. Совершенствование технологии горячей регенерации асфальтобетонного покрытия – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.11 «Автомобильные дороги и аэродромы». - Национальный транспортный университет, Киев, 2020.

В диссертационной работе решена научно-практическая задача, которая заключается в совершенствовании технологии горячей регенерации асфальтобетонного покрытия методом приготовления на дороге. Это позволило получить новые научные результаты для более точной установки параметров технологического процесса и обеспечило получение более экономичных решений при выполнении работ по текущим ремонтам автомобильных дорог.

Проведенные теоретико-экспериментальные исследования с использованием теории планирования эксперимента позволили разработать математические модели изменения основных физико-механических характеристик регенерированного асфальтобетона в зависимости от изменения температуры перемешивания смеси и содержание регенерирующей добавки.

Проведенные натурные исследования и разработаны математические модели разогрева асфальтобетонного покрытия с использованием инфракрасных разогревателей. Реализация математических моделей и полученные графические зависимости позволили установить рациональное время разогрева в зависимости от температуры окружающей среды и необходимой температуры перемешивания смеси.

Разработана методология выбора рациональных параметров технологии регенерации асфальтобетонного покрытия на дороге.

Ключевые слова: автомобильная дорога, горячая регенерація, дорожнє покриття, регенерированный асфальтобетон, регенерирующая добавка, ремиксер.

ABSTRACT

Illias S.I. Improvement of asphalt pavement hot recycling technology - As manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.11 "Highways and Airfields". (192 - Construction and Civil Engineering). - National Transport University, Kyiv, 2020.

The dissertation solved an important scientific and practical task which is to improve the technology of asphalt pavement hot recycling. This allowed obtaining the new scientific results for a more accurate setting of the technological process parameters and provided the development of more economically efficient solutions for the current repair of asphalt pavements.

Analysis of foreign experience in application of hot asphalt concrete recycling technologies on the road enabled to establish the rational area of their application - current repair when it is necessary to restore riding qualities of the road pavement, eliminate its damages and deformations and increase the service life at the expense of small costs.

Theoretical background for determining the main parameters influencing the physical and mechanical characteristics of the reclaimed asphalt concrete was generalized.

On the basis of expert assessment using the factor analysis, the choice of the most important parameters was substantiated which are the mixing technology and the regenerating additive content.

The conducted theoretical and experimental studies using the theory of planning of experiments allowed developing the mathematical models of changing the main physical and mechanical characteristics of the reclaimed asphalt concrete depending on changing the most important parameters. Realization of the developed mathematical models allowed determining the rational ranges of changing the preparation temperature (125-135) °C and the regenerating additive content (0,26-0,28)% at the average weighted bitumen content of 6%.

The obtained results of mathematical modeling allow determining the additive content at different content of residual bitumen in the existing asphalt concrete. Basing on the research results, the rational range of bitumen content in the reclaimed asphalt mixtures was determined (5,70-6,85) to preserve the standard indicators of water saturation and durability.

The results were also proved by rutting tests. The research results have shown that the most rut is the reclaimed asphalt concrete prepared from the asphalt concrete with the service life of about 10 years.

The experimental data obtained confirm the results of theoretical studies and analysis of world experience, which show that the hot regeneration of road clothing is most effective when its service life does not exceed (8-10) years.

We have conducted field studies and developed a mathematical model of asphalt pavement heating with the use of infrared heating. The implementation of the mathematical

model and the obtained graphic dependencies made it possible to determine the heating time depending on the ambient temperature (in the range from 10 °C to 30 °C) and the necessary mixing temperature. The use of a regenerating additive and a rational mixing temperature during the preparation of the mixture increase machine productivity by 20-25%.

The minimum permissible duration of mixing was established which allowed to provide the normative indicators of water saturation and strength. Generalized recommendations on the calculation of the grading of the reclaimed asphalt mixture with or without limiting the maximum thickness of the reclaimed asphalt concrete layer.

On the basis of the feasibility study, the expediency of using the hot recycling technology for the inter-repair period for the current repair was confirmed. The technological process of hot recycling was optimized which allowed the reducing of the cost of works performance by 16%.

One of the results of scientific research is the developed recommendations for the restoration of layers of asphalt pavement by the technology of hot regeneration on the road.

The developed Recommendations establish:

- classification of methods of hot regeneration of asphalt concrete on the road;
- the characteristics of the hot regeneration processes depending on the type of defects in the coating and the degree of damage to the coating;
- material requirements;
- a methodology for choosing the rational parameters of asphalt pavement hot recycling technology on the road (heating temperature of the coating, speed of movement, regenerating additive content, mixing time).

The research results were implemented in the development of the state and branch regulations, in particular, the state standard on the estimated norms, recommendations, flowcharts, in the repair of the international highway of state importance M-01 Kyiv – Chernihiv - Novi Yarylovychi (km 103+010 - km 103+628).

Key words: highways, hot recycling, road pavement, reclaimed asphalt concrete, regenerating additive, remixer.

Підписано до друку 24.12.2020. Формат 60×84/16.
Папір офсетний № 1. Гарнітура Times.
Вк. 11. Наклад 100. Зам. 4815

Відділ інформаційних технологій ДП «ДерждорНДІ».
03113, Україна, Київ, просп. Перемоги, 57, тел. +(38044) 201 08 79