

Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет

МУДРИЧЕНКО АНАТОЛІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ



УДК 625.7/.85

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БУДІВНИЦТВА
АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ШАРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ
ТЕПЛИХ СУМІШЕЙ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2024

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
перший проректор

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 «07» червня 2024 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. 12.

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

Автореферат розісланий «03» травня 2024 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



Олена УСИЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Одним із важливих завдань дорожньої галузі є підвищення довговічності дорожніх одягів та зниження витрат на їх влаштування. Асфальтобетон, наразі, є найпоширенішим матеріалом для влаштування дорожніх покриттів в Україні та світі за рахунок своїх фізико-механічних властивостей, транспортно-експлуатаційних характеристик, відпрацьованій технології виробництва і влаштування, а також відносній простоті в ремонті. Звичайний асфальтобетонна суміш змішується та ущільнюється за температури від 150 °С до 190 °С. Виробництво проходить у кілька етапів, включаючи сушіння та нагрівання мінеральних матеріалів, нагрівання в'язучого та змішування всіх компонентів. Кінцева температура перемішування асфальтобетонної суміші зазвичай складає близько 165 °С. За таких підвищених температур споживається значна кількість енергії, а в атмосферу викидається велика кількість парникових газів та забруднюючих речовин.

Теплі асфальтобетонні суміші «Warm Mix Asphalt» (WMA) це технічний термін, що використовується для опису асфальтобетонних сумішей, які виробляються на тому ж бітумі що і гарячі, за знижених технологічних температур без погіршення фізико-механічних характеристик асфальтобетону. Це досягається за рахунок відносно нових фізико-хімічних ефектів, які дають змогу знизити опір зсуву під час її виготовлення та ущільнення.

Використання технологій теплих асфальтобетонів сприяє екологічності та економії енергоресурсів, тобто зниженню витрат енергії та зниження викидів CO₂. Технології теплих асфальтобетонних сумішей дають можливість влаштовувати асфальтобетонні шари за нижчих температур і при цьому забезпечувати необхідну щільність; транспортувати суміші на довгі відстані і забезпечувати збереження рухомості під час укладання; ущільнювати суміш з меншим зусиллям.

Основні перешкоди впровадження полягають у невизначеності того, як зазначені технології можуть вплинути на довгострокові якісні характеристики влаштованих асфальтобетонних шарів. Оскільки бітумні в'язучі під час виготовлення розігрівають до нижчих виробничих температурах у порівнянні із гарячими асфальтобетонами, то виникає певне занепокоєння, що досліджувані асфальтобетонні шари можуть бути менш стійкі до утворення колійності. Також існує занепокоєння, що покриття, влаштовані із теплих асфальтобетонних сумішей, є менш стійкими до атмосферних впливів. Краще розуміння впливу теплих технологій на фізико-механічні властивості асфальтобетону і їх зв'язок з польовими характеристиками дасть поштовх для подальшого впровадження зазначеної технології.

Тобто, для вірного підходу щодо впровадження технології теплового асфальтобетону в Україні потрібно виконати аналітичний огляд досвіду використання технологій теплих асфальтобетонів, оцінити існуючі напрацювання в даному напрямку, виконати теоретико-експериментальні дослідження зазначеної технології для можливості її ефективною роботи в умовах України.

Таким чином, актуальність роботи полягає у вирішенні наступної науково-практичної задачі – підвищення строку служби автомобільних дорожніх одягів в Україні та зменшення витрат на їх влаштування за рахунок удосконалення технології

будівництва асфальтобетонних шарів з використанням теплих сумішей із визначенням раціональних технологічних режимів.

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 і управління майном Національного транспортного університету: «Розроблення сучасних методів будівництва та експлуатації автомобільних доріг, транспортних споруд з оцінкою їх якісного стану, проведення експертної оцінки основних фондів дорожніх підприємств» (№ державної реєстрації 0122U001566) та Тематичним планом науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт Державного агентства відновлення та розвитку інфраструктури України (Агентства відновлення) під час виконання науково-дослідної роботи: «Провести дослідження та розробити рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів» (№ державної реєстрації 0117U001941).

Мета і задачі досліджень.

Метою цього дослідження є розробка теоретично та експериментально обґрунтованих методів для удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використанням теплих сумішей та визначення раціональних технологічних режимів.

Для досягнення мети роботи необхідно вирішити наступні задачі:

- встановити та проаналізувати найбільш значимі фактори, що впливають на структуру поведінки асфальтобетонного шару дорожнього одягу, улаштованого із теплих асфальтобетонних сумішей;
- розробити математичну модель залежності основних фізико-механічних властивостей теплих асфальтобетонів у залежності від зміни найбільш значущих технологічних параметрів на основі теорії планування експерименту;
- на основі математичного моделювання визначити області раціональних значень основних технологічних параметрів виготовлення асфальтобетонних сумішей, що виготовлені за зниженими, у порівнянні із традиційними технологіями температурами;
- обґрунтувати техніко-економічну доцільність застосування технології теплих асфальтобетонних сумішей та визначити область її раціонального застосування; провести дослідне виробниче впровадження отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – процес будівництва асфальтобетонних шарів дорожнього одягу на автомобільних дорогах із теплих сумішей.

Предмет дослідження – технологія улаштування асфальтобетонних шарів із теплих сумішей.

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 виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей за методом факторного аналізу;

– за результатами теоретико-експериментальних досліджень вперше одержано математичні моделі залежностей фізико-механічних характеристик теплового асфальтобетону від зміни температури змішування суміші, вмісту енергозберігаючої добавки та кількості доданої асфальтобетонної крихти;

– розроблена методологія вибору найбільш вагомих параметрів технології улаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу із теплих сумішей.

Практичне значення отриманих результатів: полягає у практичному впровадженні нових технологій виготовлення асфальтобетонних сумішей для улаштування шарів дорожнього одягу шляхом проведення аналітичного огляду та аналізу досвіду використання технологій теплих асфальтобетонів, умов їх застосування, можливості використання цих технологій в умовах України. Визначено раціональні області: температури змішування суміші, вмісту енергозберігаючої добавки та кількості доданої асфальтобетонної крихти. Розрахована економічна ефективність технології теплих асфальтобетонних сумішей, які виготовлені за знижених технологічних температур з додаванням енергозберігаючої добавки та асфальтобетонної крихти.

Матеріали досліджень були впроваджені в Державному агентстві відновлення та розвитку інфраструктури України під час розроблення нормативного галузевого документу: Р В.2.7-37641918-894:2018 «Рекомендації щодо приготування та застосування асфальтобетонних сумішей на основі спінених бітумів»; ТР 03450778/44583855-001:2023 «Технологічний регламент на виробництво асфальтобетонних сумішей, щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей, асфальтобетонних сумішей з використанням спіненого бітуму та асфальтобетонних сумішей на основі бітумів, модифікованих полімерами, на АБЗ «ASTEC Portable 6' Double Barrel Plant»»; ТР 03450778/44583855-002:2023 «Технологічний регламент на виробництво холодних асфальтобетонних сумішей та сумішей холодних бітумомінеральних дорожніх на АБЗ «ASTEC Portable 6' Double Barrel Plant» та у навчальному процесі, а саме під час викладання дисциплін «Технологія будівництва доріг», «Сучасні технології будівництва автомобільних доріг» та під час дипломного проектування 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 впровадження.

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

– проведено аналітичний огляд досвіду проектування та досвіду впровадження зазначеної технології закордоном [3, 8];

– проведено експериментальні дослідження з підбору зернового складу та вмісту бітуму асфальтобетонів, виготовлених за теплими технологіями. Виконано аналіз фізико-механічних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму [4, 8, 9, 10, 11, 12];

– визначено найбільш вагомі фактори впливу на ефективність технології теплих асфальтобетонів [1, 2];

– розроблено математичні моделі зміни фізико-механічних характеристик теплих асфальтобетонів в залежності від зміни основних технологічних та технічних параметрів [1, 12];

– досліджено стійкість до утворення колії теплих асфальтобетонів на основі бітуму з використанням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму з додаванням асфальтобетонної крихти [5];

– проаналізовано технологічні та вартісні аспекти доцільності впровадження теплих асфальтобетонів [6, 10, 13, 14].

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, отриманих з використанням сучасного лабораторного обладнання; апробацією результатів роботи під час виробничого впровадження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на конференціях і семінарах: I Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених дорожньої галузі «МОЛОДЬ – ДРАЙВЕРИ ВІДНОВЛЕННЯ КРАЇНИ» НТУ, ДП «ДерждорНДІ», ХНАДУ. Київ, 2022. II Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених дорожньої галузі «МОЛОДЬ – ДРАЙВЕРИ ВІДНОВЛЕННЯ КРАЇНИ» НТУ, ДП «ДерждорНДІ», ХНАДУ. Київ, 2023; наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету в 2017 р., 2020 р., 2022 – 2023 рр.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 14 наукових праць, у тому числі: 6 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; 6 у збірниках праць за матеріалами наукових конференцій; 2 праці додатково відображають наукові результати дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел посилань із 136 найменувань та п'ять додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок. Основний текст викладений на 133 сторінках. Текст ілюструється 48 рисунками і містить 52 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** проведено аналіз закордонного досвіду улаштування шарів дорожнього одягу із використанням технологій теплих асфальтобетонів. Наведена класифікація сучасних технологій виготовлення теплих асфальтобетонів, що сформована у результаті аналітичного огляду, а також шляхом узагальнення фізичних процесів, що відбуваються в суміші під час реалізації того чи іншого способу виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей.

Виокремлені основні способи застосування технології теплих асфальтобетонів, що дозволило виділити основні перешкоди впровадження. На даний час не досліджено як зазначені технології можуть вплинути на довгострокові якісні характеристики асфальтобетону. Оскільки бітумні в'язучі під час виготовлення розігрівають до нижчих виробничих температур у порівнянні із гарячими асфальтобетонами, виникає певне занепокоєння, що досліджувані покриття можуть бути менш стійкі до утворення колійності. Також існує занепокоєння, що покриття, улаштовані із теплих асфальтобетонних сумішей є менш стійкими до атмосферних впливів.

Аналітичний огляд існуючого закордонного досвіду використання теплих асфальтобетонних сумішей дає змогу сформулювати наступну гіпотезу:

– з урахуванням того, що вартість виготовлення асфальтобетонних сумішей значно залежить від витрат енергоресурсів на розігрів складових під час перемішування, зменшення температури дасть змогу знизити витрати енергоресурсів та, відповідно, собівартість виготовлення;

– досягти зменшення температури змішування можна за рахунок встановлення раціональних технологічних режимів та введення спеціальних енергозберігаючих добавок. При цьому фізико-механічні властивості теплих асфальтобетонів повинні відповідати вимогам нормативних документів для гарячих асфальтобетонів.

У **другому розділі** визначено узагальнені теоретичні передумови призначення основних параметрів, що впливають на фізико-механічні властивості теплих асфальтобетонів.

Нормативні значення фізико-механічних властивостей асфальтобетонів можна забезпечити раціональним поєднанням мінеральних наповнювачів, заповнювача та в'язучого, а також раціональними технологічними параметрами процесу виготовлення, які призначаються за результатами попередніх досліджень. Під час встановлення таких параметрів орієнтуються на раціональні режими, згідно яких досягається найкраща взаємодія компонентів і більш повно протікають фізичні та хімічні процеси.

З метою дослідження властивостей асфальтобетону, зокрема і теплового асфальтобетону, розглянуто та проаналізовано роботи відомих вчених: А. Онищенко, І. Гамеляка, В. Мозговоого, В. Савенка, І. Копинця, В. Золотарьова, С. Кіщинського,

J. Oliveira, B. Middleton, M. Rubio, A. Dony, J. D'Angelo та їхніх учнів і послідовників.

Виконано дослідження з підбирання складу асфальтобетонів, виготовлених за теплими технологіями та, зокрема, із додаванням у склад асфальтобетонної крихти. Дослідження передбачали проведення ряду експериментів щодо виготовлення та випробовування таких сумішей.

Під час виконання досліджень були проведені випробовування таких асфальтобетонів:

- АСГ.Др.Щ.А.НП.І на вихідному бітумі БНД 70/100, з вмістом бітуму 5,0 %, 5,5 %, 6,0 %;
- АСГ.Др.Щ.А.НП.І на вихідному бітумі БНД 70/100 з додаванням енергозберігаючої добавки, з вмістом бітуму 4,5%, 5,0 %, 5,5 %;
- АСГ.Др.Щ.А.НП.І із спіненням бітуму БНД 70/100, з вмістом бітуму 4,5%, 5,0 %, 5,5 %;
- АСГ. Др.Щ.А.НП.І (+АК) із спіненням бітуму бітумі БНД 70/100, з вмістом бітуму 4,5%, 5,0 %, 5,5 %.

Виготовлення зразків асфальтобетонів здійснювалось з дотриманням стандартної послідовності та змісту технологічних операції згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови» та ДСТУ Б В.2.7-319:2016 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань».

Під час виготовлення гарячого асфальтобетону: температура вихідного бітуму під час перемішування становила (140-155) °С, мінерального матеріалу (170-180)°С. Температура під час ущільнення знаходилась в межах (135-145)°С.

Під час виготовлення теплих асфальтобетонів: температура бітуму становила (130-145) °С, температура нагрівання мінерального матеріалу (140-160)°С. Температура під час ущільнення зразків становила від 125°С до 135°С.

На характеристики асфальтобетону впливають безліч факторів, таких як: температура змішування суміші під час виготовлення, вміст бітуму, вміст енергозберігаючої добавки, зерновий склад мінеральної частини суміші, тривалість перемішування суміші, температура бітуму, кількість доданої асфальтобетонної крихти, температура ущільнення суміші, однорідність перемішування, адгезія бітуму та мінеральних матеріалів.

З метою визначення найбільш вагомих параметрів, що впливають на фізико-механічні властивості теплового асфальтобетону, було використано метод експертних оцінок.

Загальна схема експертних опитувань включала наступні етапи: підбір експертів; формування питань і складання анкет; робота з експертами; формування правил визначення сумарних оцінок на основі оцінок окремих експертів; аналіз і обробка експертних оцінок.

Фактори, що включені до опитування, це основні технологічні та технічні параметри, які наведено у табл. 1. Вибір параметрів було здійснено за результатами попередніх досліджень та аналізом літературних джерел з урахуванням вимог нормативних документів.

Таблиця 1 – Фактори та їх кодовані позначення

| Досліджувана змінна (фактор) | Позначення фактору |
|--|--------------------|
| Температура змішування | X ₁ |
| Вміст бітуму | X ₂ |
| Вміст енергозберігаючої добавки | X ₃ |
| Зерновий склад | X ₄ |
| Тривалість перемішування суміші під час виготовлення | X ₅ |
| Температура бітуму | X ₆ |
| Кількість додано асфальтобетонної крихти | X ₇ |
| Температура ущільнення суміші | X ₈ |
| Однорідність перемішування | X ₉ |

Враховуючи, що деякі експерти не змогли розділити ступінь впливу певних факторів і поставили однакові оцінки, виконується перетворення рангів. З цією метою кожен однаковий ранг j -го фахівця замінюється перетвореним, що обчислюється за співвідношенням:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{k_1} (k_2 + i)}{k_1}, \quad (1)$$

де k_1 – число однакових рангів у відповідній групі рангів для визначеного опитуваного фахівця;

k_2 – кількість факторів, які розташовані попереду групи факторів з однаковими рангами.

Перевіряння вірності матриці визначається за формулою:

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

де k – кількість чинників.

У подальшому було виконано аналізування значимості чинників.

Для оцінювання узагальнення думок за всіма чинниками потрібно розрахувати коефіцієнт конкордації:

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

де Δ_i – відхилення суми рів від середнього;

$$T_i = \sum_{r=1}^{l_j} (\eta_r^3 - \eta_r), \quad (4)$$

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

l_j – кількість груп однакових рангів j -го фахівця.

Коефіцієнт конкордації для даної матриці значень становить 0,68. За повної погодженості фахівців в оцінці поставленої задачі $W=1$, а за повної відсутності погодженості $W = 0$. $W = 0,68$ вказує на наявність середнього ступеня узгодженості думок експертів.

З метою оцінки вагомості коефіцієнта конкордації розраховується критерій узгодження Пірсона:

$$X^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta_i^2}{\frac{1}{12}(n \times k \times (k+1)) - \frac{1}{k-1} \sum T_i} = n \times (k-1) \times W. \quad (5)$$

Критерій узгодження Пірсона розрахований для даної матриці становить 54,4 та є більшим за табличне значення (15,51) для числа ступенів свободи $k-1 = 9-1 = 8$ при заданому рівні вагомості $\alpha = 0,05$. Враховуючи зазначене, можна зробити висновок, що $W = 0,68$ – величина не випадкова, а тому отримані результати мають сенс і можуть використовуватися в подальших дослідженнях.

Отриманими найбільш значимими є фактори X_1 , X_3 та X_7 , тобто температура змішування суміші під час виготовлення, вміст енергозберігаючої добавки та кількість асфальтобетонної крихти.

У **третьому розділі** викладені результати досліджень з визначення раціональних технологічних параметрів найбільш вагомих факторів. З даною метою був використаний експериментально-статистичний метод моделювання.

Під час досліджень були вибрані (визначені у другому розділі) три найбільш вагомні фактори (температура змішування (X_1), вміст енергозберігаючої добавки (X_2) та кількість асфальтобетонної крихти (X_3)) на трьох цілочисельних рівнях «-1», «0», «+1». В якості параметрів оптимізації вибрані показники асфальтобетонів, які показують поведінку їх роботи в критичних умовах – показник водонасичення (Y_1), міцність за стиску за температури 0 °C (Y_2) та 50 °C (Y_3).

Кількість експериментів, які повинні проводитись, визначено за формулою:

$$N_{\text{екс}} = m^n, \quad (6)$$

де m – кількість рівнів;

n – кількість факторів.

За формулою (6) визначено кількість експериментів, що потрібні для вирішення завдань оптимізації – 27.

Для побудови математичних моделей за основу взято квадратичні моделі:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_i^k b_{ii} x_i^2, \quad (7)$$

де b_0 – вільний член рівняння;

b_1 – 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_1, b_{ij} необхідно скласти і вирішити три рівняння, невідомими в яких є параметри даної функції. Тому необхідно провести, як мінімум, 27 експериментів згідно плану повного факторного експерименту. Експерименти проводилися 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 АСГ.Щ.А.НП.І., згідно з ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови».

Для побудови математичної моделі та оцінки значень функцій параметрів оптимізації було проведено багатофакторний експеримент. За остаточний результат кожної серії дослідів приймали середнє арифметичне значення результатів трьох випробувань для кожного значення функції відгуку.

Під час проведення досліджень було визначено довірчий інтервал для кожного експерименту і проведено його порівняння із загальним розкидом значень.

В результаті було отримано коефіцієнти рівняння регресії, на основі яких встановлено математичні моделі, що характеризують функції відгуку:

– для параметра оптимізації Y_1

$$b_0 = 673,11; b_1 = -15,72; b_2 = -0,25; b_3 = -2,43; b_{11} = 0,03; b_{22} = 5,56; b_{33} = 0,09; b_{12} = 0,63; b_{13} = 0,0001; b_{23} = 0,04; b_{123} = 0,0008;$$

$$Y_1 = 0,03X_1^2 + 5,56X_2^2 + 0,09X_3^2 + 0,63X_1X_2 + 0,0001X_1X_3 + 0,04X_2X_3 + 0,0008X_1X_2X_3 - 15,72X_1 - 0,25X_2 - 2,43X_3 + 673,31; \quad (8)$$

– для параметра оптимізації Y_2

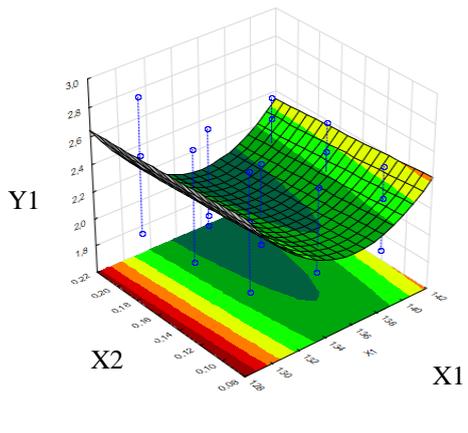
$$b_0 = 166,76; b_1 = -2,43; b_2 = -0,92; b_3 = 9,64; b_{11} = 0,009; b_{22} = 1,11; b_{33} = 0,034; b_{12} = 0,70; b_{13} = 0,14; b_{23} = 0,26; b_{123} = 0,000005;$$

$$Y_2 = 0,009X_1^2 + 1,11X_2^2 + 0,034X_3^2 + 0,70X_1X_2 + 0,14X_1X_3 + 0,26X_2X_3 + 0,0000055X_1X_2X_3 - 2,43X_1 - 0,92X_2 + 9,64X_3 + 166,76; \quad (9)$$

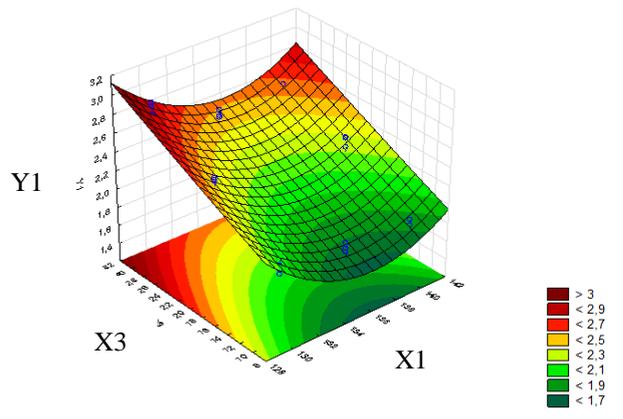
– для параметра оптимізації Y_3

$$b_0 = -8,22; b_1 = 0,12; b_2 = -2,48; b_3 = 0,1; b_{11} = 0,023; b_{22} = 7,78; b_{33} = 0,0005; b_{12} = 0,40; b_{13} = 0,65; b_{23} = 2,48; b_{123} = -9,09;$$

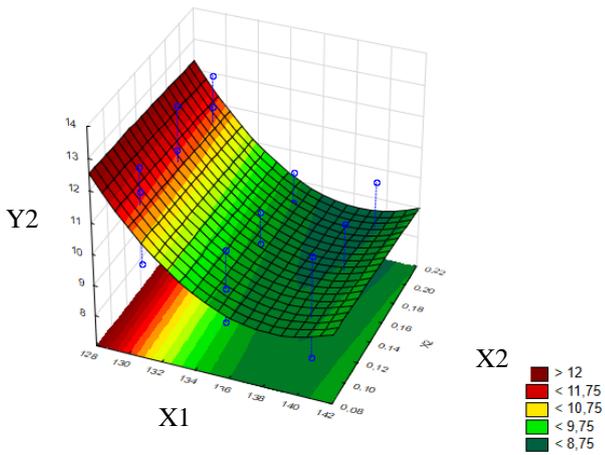
$$Y_3 = 0,023X_1^2 + 7,78X_2^2 + 0,0005X_3^2 + 0,40X_1X_2 + 0,65X_1X_3 + 2,48X_2X_3 - 9,09X_1X_2X_3 - 0,12X_1 - 2,48X_2 + 0,1X_3 - 8,22. \quad (10)$$



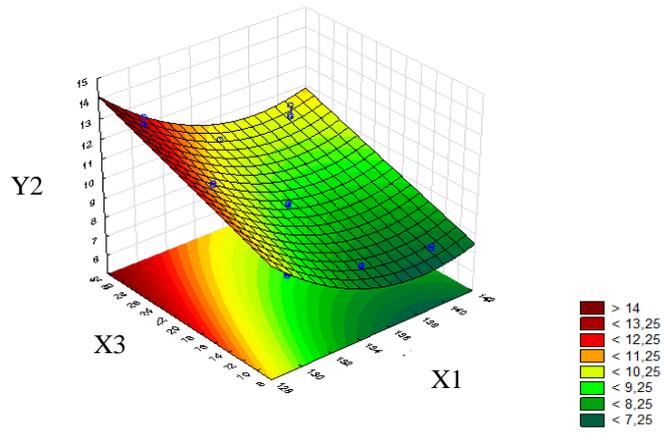
a



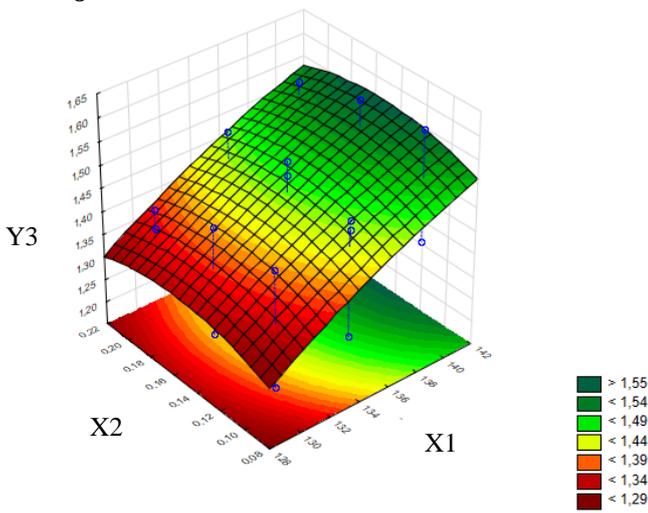
б



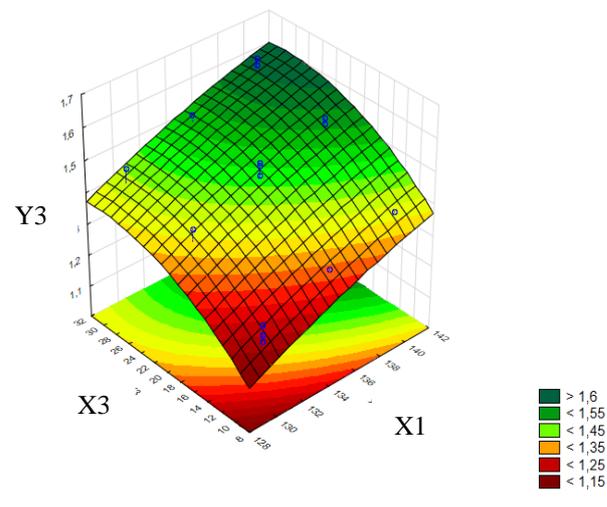
в



г



д



е

a – залежність Y_1 від X_1 та X_2 ; *б* – залежність Y_1 від X_1 та X_3 ; *в* – залежність Y_2 від X_1 та X_2 ; *г* – залежність Y_2 від X_1 та X_3 ; *д* – залежність Y_3 від X_1 та X_2 ; *е* – залежність Y_3 від X_1 та X_3

Рисунок 1 – Тривимірні графічні залежності

Враховуючи значимість коефіцієнтів рівняння регресії отримуємо наступні математичні моделі параметрів оптимізації:

$$Y1 = 5,56X2^2 + 0,63X1X2 - 15,72X1 - 0,25X2 - 2,43X3 + 673,11; \quad (11)$$

$$Y2 = 1,11X2^2 + 0,70X1X2 - 2,43X1 - 0,92X2 - 9,64X3 + 166,77; \quad (12)$$

$$Y3 = 7,78X2^2 + 0,65X1X3 + 2,48X2X3 - 9,09X1X2X3 - 2,48X2 - 8,22. \quad (13)$$

Граничні значення для вихідних параметрів встановлені ДСТУ Б В.2.7-119:2011: $Y1 - 3,5 \%$; $Y2 - 13,0 \text{ МПа}$; $Y3 - 1,1 \text{ МПа}$. Аналізуючи графічні залежності (рис. 1) та граничні значення вихідних параметрів зроблено висновок, що $Y1$, $Y2$ та $Y3$ повністю задовольняють всі досліджувані області.

Визначення раціонального значення температури змішування суміші, вмісту енергозберігаючої добавки та кількості доданої асфальтобетонної крихти під час виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей зображено на рис. 2. З цією метою були вибрані значення бажаності для кожної функції відгуку. Під час вибору ураховувано їх граничні значення фізико-механічних показників.

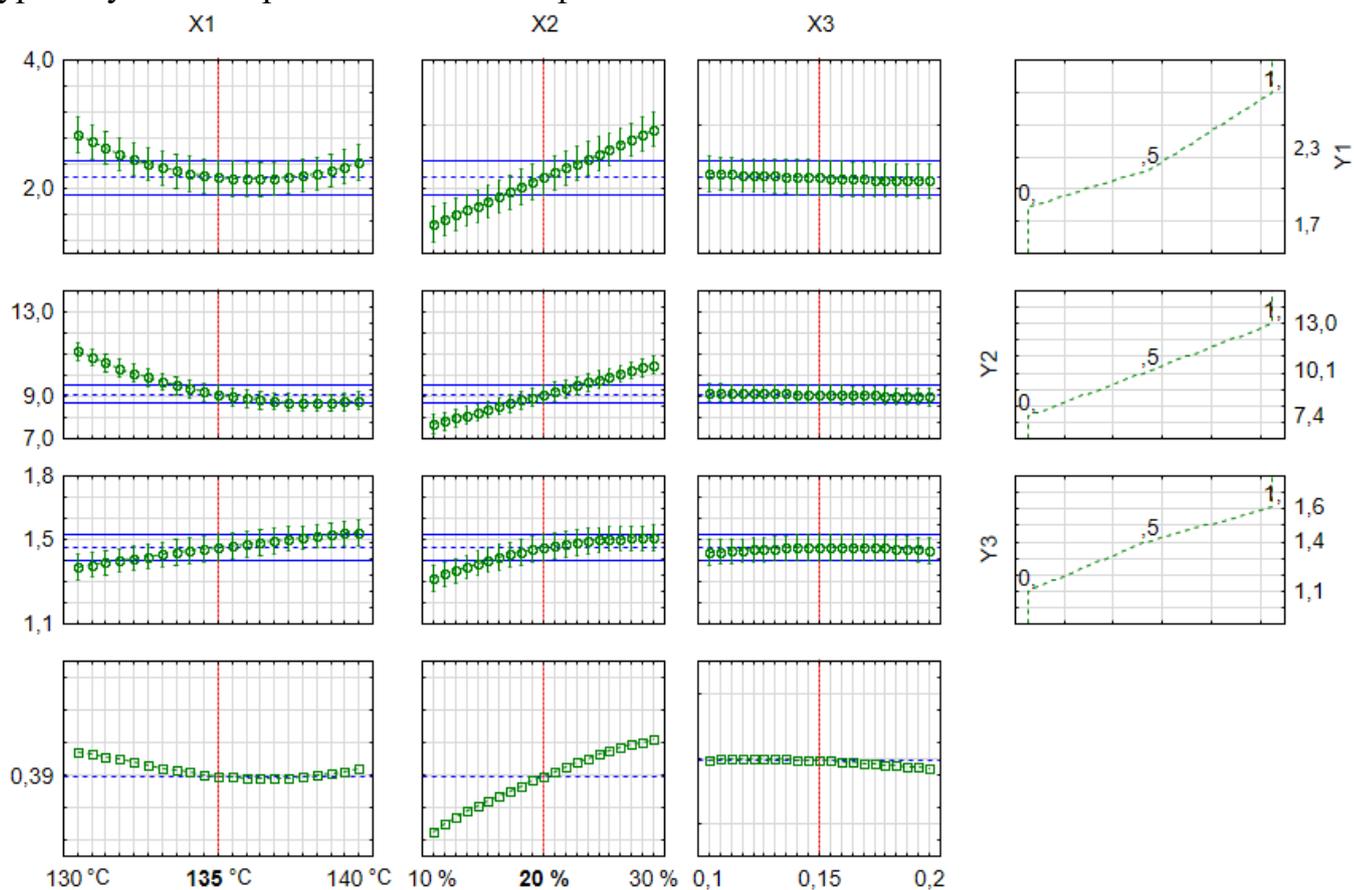


Рисунок 2 – Графіки знаходження раціонального співвідношення температур змішування суміші, вмісту енергозберігаючої добавки та кількості доданої асфальтобетонної крихти

Аналізуючи графіки рис. 2, визначені найбільш раціональні значення досліджуваних параметрів: температура змішування суміші складає 135 °С; вміст енергозберігаючої добавки – 0,15 %; кількість доданої асфальтобетонної крихти – 20 %. З урахуванням граничних значень параметрів оптимізації, встановлено раціональні області досліджуваних параметрів: температура змішування суміші від 133 °С до 138 °С; вміст енергозберігаючої добавки від 0,12 % до 0,17 %; кількість доданої асфальтобетонної крихти від 18 % до 22 %.

З метою оцінювання можливості теплих асфальтобетонів сприймати циклічні навантаження було визначено їх показник колієстійкості, шляхом проведення відповідних випробувань, згідно з вимогами ДСТУ EN 12697-22:2018 «Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 22. Колійність». Було випробувано асфальтобетони на вихідному бітумі марки БНД 70/100; на тому ж бітумі, модифікованому енергозберігаючою добавкою LowTherm 4 G; та на вспіненому бітумі з додаванням асфальтобетонної крихти. Підготовані до випробування зразки-плити піддаються дії циклічного навантаження, яке передається на зразок за допомогою колеса із відповідними розмірами. Кількість циклів зворотньо-поступальних рухів колеса складає 10 000 циклів (або 20 000 навантажень кожної точки по траєкторії випробувального колеса). Під час випробування навантаження на зразок через колесо становить 700 ± 10 N. За результатами випробувань встановлено, що виготовлені зразки відповідають категорії $RD_{AIRmax} = 1,5$ згідно таблиці 14 ДСТУ EN 13108-1:2018 «Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 1. Асфальтобетон».

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений практичному впровадженню результатів досліджень.

Розроблено технологічні регламенти на виробництво асфальтобетонних сумішей, щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей, асфальтобетонних сумішей з використанням спіненого бітуму, холодних асфальтобетонних сумішей та сумішей холодних бітумомінеральних дорожніх на асфальтобетонному заводі.

Розроблено технологічні регламенти, які встановлюють:

- загальну характеристику виробництва;
- характеристику вихідних матеріалів;
- опис технологічного процесу;
- матеріальний баланс;
- контроль виробництва та управління технологічним процесом;
- охорону навколишнього середовища;
- основні вимоги щодо безпеки і охорони праці.

Визначення ефективності різних технологій виробництва теплих асфальтобетонів у дисертаційній роботі здійснено шляхом порівняння витрат на виготовлення 100 т асфальтобетонної суміші.

Розраховані вартості виготовлення асфальтобетонних сумішей гарячих та теплих асфальтобетонних сумішей з додаванням енергозберігаючих добавок та асфальтобетонної крихти.

Вартість прямих витрат визначалась на підставі ресурсних кошторисних норм ДСТУ Б Д.2.2-27:2016 «Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Автомобільні дороги (Збірник 27)». Оскільки, на роботи з приготування теплих асфальтобетонних сумішей з додаванням асфальтобетонної крихти відсутні ресурсні елементні кошторисні норми, на відповідні роботи були розроблені індивідуальні кошторисні норми з урахуванням вимог ДСТУ-Н Б Д.1.1-6:2013 «Настанова щодо розроблення ресурсних елементних кошторисних норм на будівельні роботи».

Для нормування потреби трудових та технічних ресурсів при розробленні індивідуальних кошторисних норм використаний розрахунково-дослідний метод. Він базується на використанні даних, одержаних в результаті проведення спеціальних нормативних досліджень.

Визначення величини норм витрат труда ($H_{втр}$) робітників-будівельників розраховано за формулою:

$$H_{втр} = \frac{P_{вт}}{(100 - (P_{нзр} + P_{е} + P_{мо})) \cdot 60}, \quad (14)$$

де $P_{вт}$ - сума проєктованих витрат на вимірник процесу, люд.хв;

$P_{нзр}$ - проєктовані витрати на підготовчо-заключну роботу, %;

$P_{е}$ - проєктовані витрати на відпочинок і особисті потреби, %;

$P_{мо}$ - проєктовані витрати на технічне обслуговування машин та механізмів.

Час використання машин і механізмів ($H_{чвм}$, маш.год) і витрати труда ланок, що обслуговують машини й механізми ($H_{втм}$, люд.год), визначені на підставі поточного нормативного часу роботи робітників-будівельників і кількісного складу виконавців:

$$H_{чвм} = H_{втр} : N_p; \quad (15)$$

$$H_{втм} = H_{чвм} \cdot N_o, \quad (16)$$

де N_p - кількісний склад ланки робітників-будівельників, чол.;

N_o - кількісний склад ланки, що обслуговує машини й механізми, чол.

При виконанні досліджень були розраховані вартості приготування асфальтобетонних сумішей об'ємом 100 т на асфальтобетонному заводі продуктивністю 230 тон за годину таких асфальтобетонних сумішей:

Гаряча асфальтобетонна суміш АБС.Др.Щ.А.НП.І.БНД 70/100 з вмістом бітуму – 5 %, що виготовлена за стандартних технологічних температур.

Теплі асфальтобетонні суміші: АБС.Др.Щ.А.НП.І.БНД 70/100 з вмістом бітуму – 4,5 %, на бітумі, модифікованому енергозберігаючою добавкою та з додаванням різної кількості асфальтобетонної крихти.

Результати досліджень показують, що виготовлення теплих асфальтобетонних сумішей є економічно вигіднішими, оскільки за рахунок зменшення кількості бітумного в'язучого та складових, замінивши їх на асфальтобетонну крихту, можна

досягти економії у вартості технології виготовлення до 20 %. Вартість виготовлення за будь-якою технологією залежить від вартості будівельних матеріалів та частки використання місцевих матеріалів. Використання технологій теплих асфальтобетонів призводить до зменшення забруднення атмосфери. Нижчі температури змішування та модифікація бітуму призводять до іншої в'язко-пружної поведінки в'язучого в дорожньому покритті, виготовленому за технологією теплового асфальтобетону. Менше старіння під час виробництва та укладання, як правило, покращує гнучкість покриття, що зменшує втомлюваність та температурне розтріскування. Це призводить до покращення довговічності (життєвого циклу) дорожнього одягу, що ще більше зменшує потенційні витрати на відновлення асфальтобетонного дорожнього одягу.

Виконано супровід технологічних процесів під час виготовлення, транспортування та улаштування асфальтобетонного покриття із використанням технології теплих асфальтобетонів з відповідним відпрацюванням температур технологічних процесів.

Результати досліджень впроваджено під час розроблення галузевого нормативного документу, зокрема, галузевих рекомендацій (Р В.2.7-37641918-894:2018) та технологічних регламентів (ТР 03450778/44583855-001:2023 та ТР 03450778/44583855-002:2023) і підтверджено відповідними довідками із таких організацій: Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України (Агентство відновлення), ТОВ «АБЗ1», ТОВ «БП «ІНФРАСТРУКТУРА ІНВЕСТ».

Матеріали досліджень було впроваджено у навчальний процес, а саме під час викладання 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 вирішено важливу науково-практичну задачу, що полягає в удосконаленні технології будівництва асфальтобетонних шарів з використанням теплих сумішей. Отримано нові наукові результати, які дозволяють встановлювати чіткі параметри технологічного процесу та забезпечувати більш економічні рішення під час виконання робіт з будівництва та відновлення автомобільних доріг.

1. На основі аналітичного огляду існуючого закордонного досвіду теплих асфальтобетонних сумішей обґрунтовано доцільність їх використання в Україні. Узагальнені відповідні теоретичні передумови формування найбільш значимих факторів, що впливають на структуру поведінки асфальтобетонного покриття, улаштованого із теплих асфальтобетонних сумішей. За результатами експертної оцінки, за допомогою факторного аналізування, встановлено, що такими параметрами є кількість доданої асфальтобетонної крихти, температура перемішування суміші та вміст енергозберігаючої добавки.

2. За допомогою методу експериментально-статистичного моделювання сформовано математичні моделі залежності основних фізико-механічних властивостей теплих асфальтобетонів від зміни найбільш значимих параметрів технологічного процесу.

3. На основі математичного моделювання визначено раціональний вміст енергозберігаючої добавки для збереження рухливості та зручноукладаності асфальтобетонної суміші, що виготовлена за зниженими, у порівнянні із традиційними технологіями, температурами. На основі проведених досліджень встановлено раціональні області температур перемішування під час виготовлення та раціональну кількість доданої асфальтобетонної крихти від маси суміші. Реалізація розроблених математичних моделей дала змогу встановити раціональні області досліджуваних параметрів: температура змішування суміші – (133 – 138) °С; вміст енергозберігаючої добавки – (0,12 – 0,17) %; кількість доданої асфальтобетонної крихти – (18 – 22) %.

4. За техніко-економічним обґрунтуванням підтверджено доцільність застосування технології теплих асфальтобетонів, тобто за рахунок зменшення технологічних температур заощаджується значна кількість палива на розігрівання агрегатів. Нові фізико-хімічні ефекти дозволяють: знизити кількість використання бітуму, додавати більшу кількість асфальтобетонної крихти. Всі перераховані фактори дають нам змогу досягти економії у вартості технології виготовлення до 20 %.

Результати досліджень впроваджено при розробленні технологічних регламентів (ТР 03450778/44583855-001:2023 та ТР 03450778/44583855-002:2023) і підтверджено відповідними довідками із таких організацій: Державне агентство відновлення та розвитку інфраструктури України (Агентство відновлення), ТОВ «АБЗ1», ТОВ «БП «ІНФРАСТРУКТУРА ІНВЕСТ».

Також результати досліджень були впроваджені у навчальний процес, а саме під час викладання 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. 76-8. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203947>.

2. Mudrychenko A., Savenko V., Illiash S., Honcharenko V., Determination of the weight of factors affecting the physical and mechanical characteristics of warm asphalt concrete mixtures. World Science. 1(83), 2024. URL: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30032024/8116.

Статті у фахових виданнях України:

3. Мудриченко А.Я., Савенко В.Я. Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використання теплих сумішей. Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Київ: НТУ, 2018. – Вип. № 103, С. 075 – 083. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/103/75.pdf

4. Савенко В.Я., Ілляш С.І., Мудриченко А.Я. Аналіз фізико-механічних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму. Збірник Дороги і мости. Розділ «Будівництво та цивільна інженерія», Київ: ДП «ДерждорНДІ», 2022. – Вип. № 25, С. 087 – 099. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2022.25.087>.

5. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Дослідження стійкості до утворення колії теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з використанням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму з додаванням регенованого асфальтобетону. Збірник Дороги і мости. Розділ «Будівництво та цивільна інженерія», К.: ДП «ДерждорНДІ», 2023. – Вип. № 27, С. 121 – 129. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.121>.

6. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я., Стасюк Т.О. Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування теплих асфальтобетонних сумішей для улаштування шарів дорожнього одягу. Вісник НТУ. Київ, 2023 Вип. 55. С. 240 – 246. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-240-246>.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Технологія приготування теплих асфальтобетонних сумішей на в'язкому бітумі. Матеріали LXXIII наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. Київ: НТУ, 2017. С. 134 – 135. URL: <https://drive.google.com/file/d/1GyK8BsnakngvopAADyWv3l4kEA22yhEs/view>

8. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використання теплих сумішей. Матеріали LXVI наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету.

Київ: НТУ, 2020. С. 142. URL:<https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWiv/view>

9. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Аналіз фізико-механічних характеристик теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму. Матеріали LXXVIII наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2022. С. 120 – 121. <https://doi.org/10.33744/2786-6459-2022-78>.

10. Савенко В.Я., Мудриченко А.Я. Теплі асфальтобетонні суміші як компонент енергозбереження у дорожньому будівництві. Матеріали LXXVIV наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, НТУ, 2023 р. Київ. С. 154 – 155. URL: <https://doi.org/10.33744/2786-6459-2023-79>.

11. Мудриченко А.Я. Використання теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму в дорожньому будівництві. I Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених дорожньої галузі «МОЛОДЬ – ДРАЙВЕРИ ВІДНОВЛЕННЯ КРАЇНИ» НТУ, ДП «ДерждорНДІ», ХНАДУ. Київ, 2022. С. 5-6. URL: <https://doi.org/10.36100/conference2022.01>.

12. Мудриченко А.Я. Оптимізація вмісту енергозберігаючої добавки, асфальтобетонної крихти та температурного режиму при приготуванні теплих асфальтобетонних сумішей. II Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених дорожньої галузі «МОЛОДЬ – ДРАЙВЕРИ ВІДНОВЛЕННЯ КРАЇНИ» НТУ, ДП «ДерждорНДІ», ХНАДУ. Київ, 2023. С. 15-16. URL: <https://doi.org/10.36100/conference2023.01.001>.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. ТР 03450778/44583855-001:2023 Технологічний регламент на виробництво асфальтобетонних сумішей, щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей, асфальтобетонних сумішей з використанням спіненого бітуму та асфальтобетонних сумішей на основі бітумів, модифікованих полімерами, на АБЗ «ASTEC Portable 6' Double Barrel Plant». Київ, 2023. 52 с.

14. ТР 03450778/44583855-002:2023 Технологічний регламент на виробництво холодних асфальтобетонних сумішей та сумішей холодних бітомомінеральних дорожніх на АБЗ «ASTEC Portable 6' Double Barrel Plant». Київ, 2023. 45 с.

АНОТАЦІЯ

Мудриченко А.Я. Удосконалення технології будівництва асфальтобетонних шарів з використанням теплих сумішей – 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, 2024.

У дисертації вирішена актуальна науково-практична задача, яка полягає в удосконаленні технології будівництва асфальтобетонних шарів із використанням теплих сумішей. Це дозволило одержати нові наукові результати для більш раціонального встановлення параметрів технологічного процесу, забезпечення більшої енергозбереженості та отримання більш економічних рішень під час будівництва.

Виконані теоретико-експериментальні дослідження з використанням теорії планування експерименту дозволили розробити математичні моделі зміни основних фізико-механічних властивостей теплового асфальтобетону в залежності від зміни найбільш вагомих параметрів.

Реалізація розроблених математичних моделей дала змогу встановити раціональні значення прийнятих факторів варіювання що відповідають температурі змішування під час виготовлення – (133 – 138) °С, вміст енергозберігаючої добавки – (0,12 – 0,17) %, кількість доданої асфальтобетонної крихти – (18 – 22) % від маси суміші.

Досліджено стійкість теплих асфальтобетонних сумішей на основі бітуму з додаванням енергозберігаючих добавок та спіненого бітуму до утворення колії. Результати досліджень показали, що за показником колієстійкості, асфальтобетони, виготовлені за знижених температурами, не поступаються гарячим асфальтобетонам.

На підставі техніко-економічних розрахунків підтверджена доцільність застосування теплих асфальтобетонних сумішей для улаштування шарів дорожнього одягу. За рахунок зменшення температури змішування суміші, зменшення кількості доданого бітуму, можливості додавати асфальтобетонну крихту у суміш, можливо зменшити собівартість виготовлення асфальтобетонної суміші на 20 %.

Ключові слова: автомобільна дорога, в'язуче, дорожній одяг, енергозберігаюча добавка, тепла асфальтобетонна суміш, температура, фізико-механічні показники.

ABSTRACT

Mudrychenko A.Y. Improvement of the technology of laying road pavement using warm mix asphalt – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

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, 2024.

The dissertation solved an important scientific and practical task, which consists in improve the technology of laying road pavement using warm mix asphalt. This made it possible to obtain new scientific results for a more rational setting of technological process parameters, to ensure greater energy efficiency and obtain more economical solutions during construction.

The analysis of the foreign experience of laying road pavement using warm mix asphalt made it possible to determine the main obstacles to implementation, which are the uncertainty about how these technologies can affect the long-term qualitative characteristics of the road pavement. Since bituminous binders during preparation are heated to lower production temperatures compared to hot asphalt concretes, there is some concern that the tested pavements may be less resistant to rutting. A better understanding of how warm technologies affect the physical and mechanical properties of asphalt mixtures and how these properties relate to field performance is necessary for further implementation of this technology.

The theoretical prerequisites for determining the main parameters affecting the physical and mechanical properties of warm asphalt concrete mixtures have been implemented.

According to the results of an expert assessment using factor analysis, the choice of the most important parameters of the technology, which are the temperature of the mixture preparation, the content of the energy-saving additive and the amount of added asphalt concrete crumb, is substantiated.

The performed theoretical and experimental studies using the theory of experiment planning made it possible to develop mathematical models of changes in the main physical and mechanical properties of warm asphalt concrete depending on the change of the most important parameters.

The use of the developed mathematical models made it possible to establish rational values of the accepted variation factors which correspond to the mixing temperature during manufacture - (133 – 138) °C, the content of the energy-saving additive – (0.12 – 0.17) %, the amount of added asphalt concrete crumb – (18 – 22) % of the mass of the mixture.

The stability of warm asphalt concrete mixtures based on bitumen with the addition of energy-saving additives and foamed bitumen to the formation of a rut was investigated. The research results showed that asphalt concrete produced at reduced temperatures is not inferior to hot asphalt concrete in terms of rutting resistance.

On the basis of technical and economic calculations, the expediency of using warm asphalt concrete mixtures for the arrangement of road surfaces has been confirmed. By reducing the mixing temperature of the mixture, reducing the amount of bitumen added, and

the possibility of adding asphalt concrete crumbs to the mixture, it is possible to reduce the cost of the work by 20 %.

Technological regulations have been developed for the production of asphalt concrete mixtures, crushed-mastic asphalt concrete mixtures, asphalt concrete mixtures using foamed bitumen, cold asphalt concrete mixtures and cold bituminous-mineral road mixtures at an asphalt concrete plant.

The developed technological regulations will establish:

- general characteristics of production;
- characteristics of raw materials;
- description of the technological process;
- material balance;
- production control and technological process management;
- environmental protection;
- basic requirements for occupational safety and health.

Research results were implemented in the development of recommendations for the preparation and use of asphalt concrete mixtures based on foamed bitumen, technological regulations for the production of asphalt concrete mixtures, crushed-mastic asphalt concrete mixtures, asphalt concrete mixtures using foamed bitumen, at an asphalt concrete plant. The process of manufacturing mixtures at temperatures lower than those of traditional hot technologies and the process of setting up an asphalt concrete mixture with technological temperature control were supported.

Key words: road, binder, road pavement, energy-saving additive, warm asphalt concrete mix, temperature, physical and mechanical indicators.