

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІЛЛЯШ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 625.85

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАРЯЧОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ С.І. Ілляш

Науковий керівник –
Савенко Вячеслав Якович
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

_____ О.Ю. Усиченко

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Ілляш С.І. Удосконалення технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття – Кваліфікаційна наукова праця 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 важлива науково-практична задача, що полягає в удосконаленні технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття. Це дозволило отримати нові наукові результати для більш точного встановлювання параметрів технологічного процесу та забезпечило отримання більш економічних рішень при виконанні робіт.

Аналіз закордонного досвіду застосування технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі дозволив встановити раціональну область її застосування – поточний ремонт автомобільних доріг, коли за незначні фінансові затрати необхідно відновити транспортно-експлуатаційні характеристики дорожнього покриття, ліквідувати його руйнування та деформації та продовжити строк служби.

Узагальнені теоретичні передумови визначення основних параметрів, які впливають на фізико-механічні властивості регенерованого асфальтобетону.

На підставі експертної оцінки з використанням факторного аналізу обґрунтовано вибір найбільш вагомих параметрів технології, якими є температура перемішування суміші та вміст регенеруючої добавки.

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

Реалізація розроблених математичних моделей дала змогу встановити раціональні діапазони зміни температури приготування (125–135) °C та вмісту регенеруючої добавки (0,25–0,30) % при середньозваженому вмісті бітуму 6 %.

Отримані результати математичного моделювання дозволяють призначати вміст добавки при різному вмісті залишкового бітуму у існуючому асфальтобетоні. За результатами досліджень визначено раціональний діапазон вмісту бітуму в регенерованих гарячих дрібнозернистих асфальтобетонних сумішах (5,70–6,85) % для збереження нормативних показників водонасичення та міцності.

Результати досліджень на колієстійкість показали, що найбільш колієстійким є регенований асфальтобетон, приготовлений з асфальтобетону зі строком служби близько 10 років. Отримані експериментальні дані підтверджують результати теоретичних передумов та аналізу світового досвіду, які показують, що гаряча регенерація дорожніх одягів є максимально ефективною, коли їх строк експлуатації не перевищує (8–10) років.

Проведені натурні дослідження та розроблена математична модель розігріву асфальтобетонного покриття з використанням інфрачервоних розігрівачів. Реалізація математичної моделі та аналіз залежностей дозволили встановити час розігріву в залежності від температури навколишнього середовища (в діапазоні від 10 °C до 30 °C) та необхідної температури перемішування суміші. Також для опису температурного режиму розігрівання дорожнього покриття з використанням панелей асфальторозігрівача було адаптовано рішення теплопровідності Фур'є для однорідного півпростору, що дозволило визначати температуру покриття в будь-який момент часу його розігрівання на будь якій глибині. На практиці це дасть змогу контролювати процес розігрівання покриття та не допустити його перегріву на поверхні.

Встановлена мінімально допустима тривалість перемішування суміші для забезпечення нормативних показників водонасичення та міцності. Обґрунтовано розрахунок гранулометричного складу регенованої асфальтобетонної суміші з обмеженням або без обмеження максимальної товщини шару.

На підставі техніко-економічних розрахунків підтверджена доцільність застосування технології гарячої регенерації на міжремонтний строк для поточного ремонту. За рахунок зменшення температури перемішування суміші оптимізовано технологічний процес гарячої регенерації, що дозволило зменшити собівартість виконання робіт на 16 %.

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

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)).

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

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. *Автошляховик 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. *Автошляховик 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. *Автодорекспо*. Київ, 2014.

11. Головка С.К., Ілляш С.І. Досвід впровадження технологій холодної та гарячої регенерації нежорстких дорожніх одягів. *Автодорекспо*, 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.

ABSTRACT

Illiash S.I. Improvement of asphalt pavement hot recycling technology -
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, 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.

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. *Автошляховик 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. *Автошляховик 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. *Автодорекспо*. Київ, 2014.
11. Головка С.К., Ілляш С.І. Досвід впровадження технологій холодного та гарячої регенерації нежорстких дорожніх одягів. *Автодорекспо*, 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.

ЗМІСТ

ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ	16
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ВІДНОВЛЕННЯ ДОРОЖНЬОГО АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ.....	25
1.1 Транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг загального користування.....	25
1.2 Особливості застосування технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі та досвід впровадження	30
1.3 Мета та задачі досліджень.....	43
Висновки до розділу 1	44
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ	47
2.1 Обґрунтування вибору параметрів технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття	47
2.2 Встановлення вагомості факторів	62
Висновки до розділу 2	69
РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ	70
3.1 Визначення області раціональних технологічних параметрів найбільш вагомих факторів.....	70
3.2 Натурні дослідження зміни температури розігрівання покриття в залежності від швидкості руху термічної установки	86
3.3 Встановлення раціональної тривалості перемішування регенованої гарячої асфальтобетонної суміші	94
Висновки до розділу 3	112

РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	114
4.1 Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування технології гарячої регенерації для ремонту асфальтобетонних покриттів.....	114
4.2 Рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі	126
4.2.1 Встановлення вимог до матеріалів.....	126
4.2.2 Встановлення вимог до процедури підбору складу регенерованого гарячого асфальтобетону.....	127
4.2.3 Методологія вибору найбільш раціональних параметрів технології..	129
4.2.4 Встановлення вимог до контролю якості та приймання робіт.....	134
4.3 Практичне застосування удосконаленої технології на автомобільних дорогах загального користування.....	135
Висновки до розділу 4	144
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	148
ДОДАТОК А РОЗРАХУНОК РЕСУРСНИХ КОШТОРИСНИХ НОРМ	165
ДОДАТОК Б РОЗРОБЛЕНІ ГАЛУЗЕВІ НОРМАТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОКУМЕНТИ.....	182
ДОДАТОК В ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК.....	188
ДОДАТОК Г СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	194

ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

При викладанні дисертаційної роботи вжито наступні позначки та скорочення.

Позначки:

B – проектна витрата асфальтобетонної суміші;

B_n – витрата нових матеріалів;

$B_{нв}$ – відносний уміст нових матеріалів в РГС;

B_ϕ – фактична витрата матеріалу в покритті;

$B_{\phi в}$ – відносний вміст фрезерованого асфальтобетону в РГС;

B_{max} – максимальна витрата РГС;

$П_{251}$ – фактичне значення глибини проникнення голки (пенетрації) вторинного бітуму за температури 25 °С;

$П_{252}$ – фактичне значення глибини проникнення голки (пенетрації) доданого бітуму за температури 25 °С;

$П_{25mix}$ – значення глибини проникнення голки (пенетрації) регенерованого бітумного в'язучого за температури 25 °С;

a – масова частка вторинного бітуму від загальної маси бітумного в'язучого в РГС;

b – масова частка доданого бітуму від загальної маси бітумного в'язучого в РГС;

H – проектна товщина шару асфальтобетонного покриття;

H_ϕ – фактична товщина шару асфальтобетонного покриття;

R_0 – міцність при стиску зразків асфальтобетону за температури 0 °С;

R_{20} – міцність при стиску зразків асфальтобетону за температури 20 °С;

R_{50} – міцність при стиску зразків асфальтобетону за температури 50 °С;

T_{p1} – фактична температура розм'якшення вторинного бітуму;

T_{p2} – фактична температура розм'якшення доданого бітуму;

$T_{p mix}$ – температура розм'якшення регенерованого бітумного в'язучого, яка відповідає нормованим значенням для необхідної марки бітуму;

Δ_k – абсолютне значення фактичного відхилення вмісту зерен підібраного складу від нормованих значень;

Δ_n – кориговані значення розрахункового вмісту фракції в новому мінеральному матеріалі відповідно до повного залишку на ситі зерен, менших максимального розміру фракції;

Δ_ϕ – розбіжність між фактичним і призначеним вмістом фракцій, обчислена за повним залишком на ситі зерен, менших максимального розміру фракції;

ρ – фактична густина асфальтобетону покриття, визначена за результатами випробування зразків-кернів;

Φ_n – фактичний склад мінеральної частини старого асфальтобетону за вмістом зерен, менших даного розміру;

Φ_{np} – усереднений стандартний склад асфальтобетонної суміші за вмістом зерен, менших даного розміру;

Φ_{pn} – розрахунковий склад суміші нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру;

Φ_{pp} – розрахунковий вміст мінеральних зерен старого асфальтобетону, менших даного розміру, у мінеральній частині РГС.

Φ_{pv} – вміст фракції за призначеним гранулометричним складом відносно її вмісту в мінеральному матеріалі старого асфальтобетону;

Z_i – підібраний склад суміші нових мінеральних матеріалів за частковим залишком на ситі;

ΣZ_i – підібраний склад суміші нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру.

Скорочення:

ЛЕМС – лита емульсійно-мінеральна суміш;

РГА – регенований гарячий асфальтобетон;

РГС – регенована гаряча асфальтобетонна суміш;

HIR – Hot In-place Recycling.

ВСТУП

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. Гостро стоять проблеми автомобільних доріг нижчих категорій, особливо місцевого значення. 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.

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.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ЩОДО ВІДНОВЛЕННЯ ДОРОЖНЬОГО АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

1.1 Транспортно-експлуатаційний стан автомобільних доріг загального користування

Мережа автомобільних доріг загального користування в Україні налічує близько 170 тис. км., 35 % з них мають асфальтобетонне покриття. Значна частка автомобільних доріг має високу зношеність та потребує капітального або поточних ремонтів [1]. В умовах значної потреби коштів на відновлення дорожньої мережі пріоритетним напрямком розвитку дорожнього господарства є саме розвиток та удосконалення технологій ремонту існуючих автомобільних доріг [2 – 7].

Незадовільний стан мережі автомобільних доріг викликає соціальну напругу у суспільстві. До органів виконавчої влади, які відповідають за автомобільні дороги загального користування постійно надходить велика кількість скарг від користувачів доріг, громадських активістів, що загрожує державі зниженням мобільності робочої сили, а також негативними економічними наслідками. З таких наслідків слід виділити збільшення собівартості перевезень вантажів та пасажирів, втрати від ДТП, додаткові витрати водіїв на утримання та експлуатацію транспортних засобів.

На сьогоднішній день існує низка факторів, які спричиняють незадовільний стан автомобільних доріг в Україні. До фінансових факторів можна віднести неритмічність фінансування дорожнього галузі. Технічні причини не менш вагомі — невідповідність технічних параметрів автомобільних доріг та їх транспортно-експлуатаційних показників сучасним навантаженням. Це зумовлено тим, що значна кількість автомобільних доріг

будувались ще у минулому сторіччі та були розраховані на навантаження групи Б (60 кН на вісь) або групи А (100 кН на вісь) [8 - 11]. Зростання кількості інтенсивності руху та кількості великовагових транспортних засобів у складі транспортного потоку спричинило збільшення і розрахункового навантаження. Наразі будівельні норми України встановлюють навантаження на вісь, зокрема, і 115 кН, 130 кН [12, 13]. Розрахунки проф. Б.С. Радовського показують, що збільшення наднормативного рівня навантажень на 30 % збільшує руйнівний вплив на дорожній одяг в рази.

За останні 3 роки в розвитку дорожньої галузі відбулися серйозні системні зміни, які запровадили нову систему управління і фінансування автомобільних доріг загального користування. Створено Державний дорожній фонд, як стабільне і гарантоване джерело фінансування розвитку та утримання автомобільних доріг. Проте, наявні фінансові ресурси не дають можливості одночасно відновити всі автомобільні дороги. Наразі Укравтодор здебільшого приділяє увагу міжнародним, національним та регіональним дорогам. Фінансування ж ремонтно-будівельних робіт на територіальних автомобільних дорогах є недостатнім та відбувається за залишковим принципом. Фактичний обсяг фінансування розвитку територіальних автомобільних доріг протягом останніх 2 років становив близько 10 % від обсягу видатків на розвиток автомобільних доріг загального користування державного значення, а плановий обсяг бюджетного фінансування на наступні 3 роки складає близько 17 % при тому, що протяжність територіальних автомобільних доріг у відсотковому співвідношенні складає 46,4 % від сукупної протяжності автомобільних доріг державного значення. Такий підхід до фінансування територіальних автомобільних доріг пояснюється нижчою їх пріоритетною значимістю в порівнянні з міжнародними, національними та регіональними автомобільними дорогами

державного значення, які забезпечують транзитні перевезення та з'єднують обласні центри між собою. Враховуючи, що територіальні дороги з'єднують обласні центри з районними, районні між собою, вони є важливими артеріями для руху місцевого населення в регіонах.

Фінансування автомобільних доріг місцевого значення також знаходиться на недостатньому рівні, лише близько 30 % обсягу Державного дорожнього фонду спрямовується на такі дороги. Недостатнє та неритмічне фінансування є причиною порушення міжремонтних строків.

Вчасно не проведений ремонт призводить до накопичення руйнувань та деформацій покриття і основи дорожнього одягу. Найбільш характерні деформації та руйнування покриття, які можливо ліквідувати гарячою регенерацією на дорозі¹ наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Деформації і руйнування покриття нежорсткого дорожнього одягу [14, 15]

Деформації і руйнування	Характеристика	Ілюстрація
1	2	3
Луцення	руйнування поверхні дорожнього покриття у вигляді відшарувань тонких плівок та лущинок матеріалу покриття	
Викришування	руйнування дорожнього покриття за рахунок втрати ним дрібних зерен мінерального матеріалу	

¹ Технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття застосовують виключно у разі структурної цілісності та достатньої несної здатності розташованих нижче шарів.

Кінець таблиці 1.1

1	2	3
Тріщини загальні поперечні	руйнування дорожнього покриття удосконаленого типу внаслідок різких перепадів температури повітря у вигляді наскрізних близьких до поперечних (температурних) тріщин, що розташовані на певній відстані одна від одної (5 – 15) м	
Колійність	деформації нежорстких дорожніх одягів у вигляді поздовжніх борозен різної глибини по лініях накату з причин недостатньої структурної міцності матеріалу покриття (обрамлення борозен валиками переміщеного матеріалу покриття)	
Косі тріщини	руйнування дорожнього одягу тріщинами, що розташовані під кутом (30 - 60)° до осі проїзної частини	

Такі деформації та руйнування покриття спричинені здебільшого дією експлуатаційних та погодно-кліматичних факторів, а також порушенням технологічного регламенту приготування асфальтобетонних сумішей (рис. 1, рис. 2 у табл. 1.1).

На початковому етапі розвитку руйнувань необхідно приділяти особливу увагу поточним ремонтам автомобільних доріг, тобто систематичному та своєчасному відновленню експлуатаційного стану, виправленню незначних пошкоджень дорожнього одягу. Це дасть змогу в перспективі мінімізувати вартість робіт з капітального ремонту та зменшити

витрати на експлуатаційне утримання протягом всього життєвого циклу дорожнього одягу.

На теперішній час існує ряд традиційних технологічних рішень щодо виконання робіт з поточних ремонтів нежорсткого дорожнього одягу. До традиційних можна віднести наступні варіанти поточних ремонтів:

- ліквідація дрібних пошкоджень існуючого дорожнього покриття (вибоїни, тріщини, колійність тощо) з наступним влаштуванням асфальтобетонного чи щебенево-мастикового шару;
- суцільне фрезерування верхнього шару існуючого дорожнього покриття з наступною його заміною;
- влаштування шарів зносу з литих емульсійно-мінеральних сумішей та поверхневих обробок.

Всі вони передбачають заміну верхнього шару дорожнього покриття або нарощування нових шарів зносу. Це спричиняє ряд суттєвих недоліків [16]:

- значні фінансові витрати на влаштування нових шарів покриття;
- необхідність утилізації матеріалів старого покриття;
- підняття висотних позначок покриття (особливо вулиці і проїзди міст та інших населених пунктів, мостові переходи);
- наявна ймовірність утворення з часом відображених тріщин;
- збільшення навантаження від власної маси на мостові конструкції при нарощуванні шарів покриття.

В таких умовах пріоритетним напрямком досліджень є ресурсозберігаючі технології, застосування яких дозволяє досягнути значної фінансової економії шляхом оптимізації будівельних процесів, використання сучасної будівельної техніки та повторного використання будівельних матеріалів [16–20]. До таких технологій відноситься гаряча регенерація асфальтобетону методом на дорозі.

1.2 Особливості застосування технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі та досвід впровадження

Згідно зі світовою практикою дорожнього будівництва, технології ресайклінгу дорожнього асфальтобетону класифікують у залежності від виду і призначення робіт та діапазону технологічних температур процесів виготовлення і застосування регенованих сумішей, зокрема технології ресайклінгу на дорозі класифікують наступним чином [16]:

- гаряча регенерація на дорозі – ресайклінг з виготовленням гарячих регенованих асфальтобетонних сумішей (РГС) змішуванням на дорозі (*Hot-in-place-recycling; HIR; HIPR*);
- холодний ресайклінг на дорозі – ресайклінг з виготовленням регенованих холодних сумішей змішуванням на дорозі, з обробкою матеріалу на неповну товщину асфальтобетонного шару (*Cold-in-place-recycling; CPR CIPR*);
- глибока регенерація [дорожнього одягу] – холодний ресайклінг матеріалу на повну товщину асфальтобетонного шару з використанням дисперсних матеріалів розташованого нижче шару (*Full-depth-reclamation; FDR*).

Згідно з даними [21], ефективність застосування кожної із зазначених технологій ресайклінгу на дорозі залежить від стану та строку експлуатації покриття (рисунок 1.1).

Технології гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі застосовують за умов структурної цілісності розташованих нижче шарів дорожнього одягу у випадку, коли існуюче покриття має багато дефектів у вигляді тріщин, колій, вибоїн, а також зсувів, пов'язаних з недостатньою зсувостійкістю асфальтобетонів.

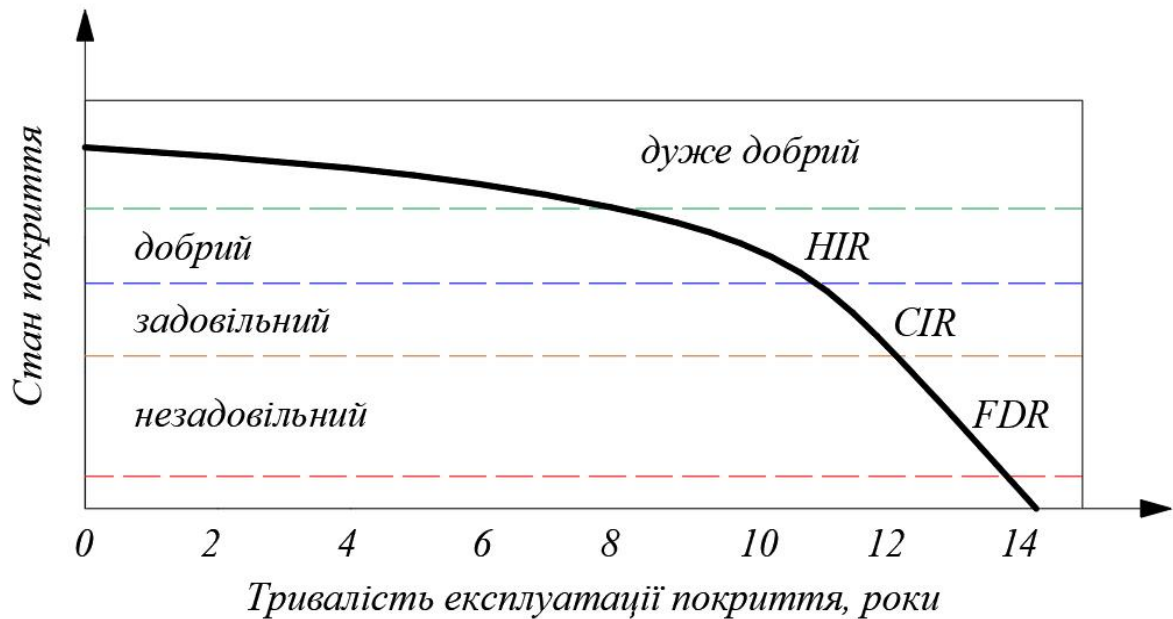


Рисунок 1.1 – Залежність ефективності методів регенерації дорожніх одягів від стану та тривалості експлуатації

Термін «гаряча регенерація асфальтобетонного покриття» об'єднує цілий ряд технологій ремонту асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з дорожнім одягом нежорсткого типу, загальною ознакою яких є базова технологія, що включає процес розігріву старого асфальтобетонного покриття, фрезерування і перемішування розігрітого матеріалу без зміни або зі зміною складу, та повторне укладання гарячої суміші на місці з подальшим її ущільненням.

Основною перевагою технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі є виконання повного циклу робіт спеціалізованою технікою за один робочий прохід. До переваг цих технологій відноситься також стовідсоткове використання матеріалу існуючого асфальтобетонного покриття, економія паливних ресурсів у зв'язку з виконанням всіх робіт, зокрема приготування РГС, безпосередньо на ділянці виконання робіт, стислі строки виконання робіт, перекриття руху транспорту по одній смузі руху, забезпечення високої якості регенованого асфальтобетонного покриття.

Таким чином, іноваційність даної технології також полягає в її економічності, оскільки немає необхідності утилізувати старе

асфальтобетонне покриття і використовувати велику кількість нових матеріалів для його відновлення.

Гаряча регенерація асфальтобетонного покриття самохідною дорожньою колоною дозволяє ефективно усунути ушкодження дорожнього покриття:

- припиняється розвиток тріщин;
- надає можливість усунення вибоїн та вирівнювання поверхні покриття;
- надає можливість коригувати, у певних межах, профіль покриття;
- надає можливість коригування складу асфальтобетону;
- поліпшується безпека руху на автомобільних дорогах завдяки підвищенню зчіпних якостей покриття.

Інтенсивний розвиток технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі як альтернативи традиційним методам ремонтів асфальтобетонного покриття датується 70-ми роками ХХ століття. Чинниками широкого впровадження цих технологій були нафтова криза, яка призвела до суттєвого підвищення цін на нафтопродукти, а також створення та удосконалення спеціальної дорожньої техніки для відповідних робіт.

Станом на 2011 рік [21] у США 34 штати застосовували технології гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі при загальній кількості підрядників, які володіють цією технологією, 24 організації (фірми, підприємства).

Польові та лабораторні випробування конструкції та матеріалів існуючого покриття при виборі технологій *HIR* згідно з [21] передбачали визначення:

- товщини та жорсткості (модуля пружності) шарів та конструкції дорожнього одягу;
- вмісту бітуму у старому асфальтобетоні;

- гранулометричного складу мінеральної частини старого асфальтобетону;
- гранулометричного складу нових мінеральних матеріалів або нової асфальтобетонної суміші для коригування складу старого асфальтобетону (за необхідності);
- необхідність застосування регенеруючих добавок або інших матеріалів [22].

Згідно з [21], регенеруючі добавки (*recycling agents, RA*) призначені для покращення властивостей зістареного бітуму в асфальтобетоні існуючого покриття з дотриманням характеристик в'язучого необхідної марки; за хімічним складом *RA* відносяться до вуглеводневих сполук. У США діє стандарт, який встановлює класифікацію *RA* за марками з урахуванням в'язкості продукту. Вибір марки *RA* залежить від вмісту старого асфальтобетону в РГС; при зменшенні відносного вмісту старого асфальтобетону рекомендується використовувати більш в'язкі *RA* [21]. Згідно з класифікацією та визначенням *RA*, за даним цільовим призначенням можуть застосовуватися бітуми менш в'язких марок.

Окремий стандарт встановлює класифікацію та технічні характеристики емульсованих регенеруючих добавок (*emulsified recycling agents, ER*), які призначені для відновлення зістареного бітуму в асфальтобетоні існуючого покриття з доведенням показників властивостей до нормованих значень в'язучого потрібної марки. За хімічним складом *ER* відносяться до нафтопродуктів, сумісних з бітумом.

Згідно з класифікацією, поширеною в США з 90-х рр. XX століття та прийнятою *ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)*, технології гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі класифікуються як *surface recycling, repaving*, та *remixing* [16, 21, 23]; згідно з [21] у більшості штатів США застосовуються всі перелічені технології.

Технологія *surface recycling (resurfacing)* є найбільш простою та тривало застосовується для ремонту асфальтобетонних покриттів. Існуюче

асфальтобетонне покриття нагрівають та фрезерують на встановлену глибину, гарячий фрезерований матеріал перемішують, розподіляють та ущільнюють. За необхідності застосовують регенеруючі добавки. Зазначену технологію застосовують переважно для регенерації верхнього шару асфальтобетонного покриття завтовшки 1 дюйм (25 мм). Технологія не передбачає зміни складу старого асфальтобетону шляхом введення нових мінеральних матеріалів та бітуму; товщина шару РГА практично дорівнює вихідній товщині шару. За винятком доріг з низькою інтенсивністю руху, шар РГА, влаштований за технологією *surface recycling*, перекривають шаром нової асфальтобетонної суміші за окремий прохід, або влаштовують поверхневу обробку (*chip seal*) [16, 21, 23].

Технологія *remixing* застосовується для зміни складу та властивостей асфальтобетону шляхом додавання нових мінеральних матеріалів та в'язучого до гарячої фрезерованої суміші. Коригуванню за цією технологією підлягають гранулометричний склад, властивості в'язучого, пористість асфальтобетону, склад асфальтобетонної суміші та асфальтобетону за відносним вмістом бітуму [23]. Згідно з [23] виконання робіт за технологією *remixing* може бути одностадійним та мультистадійним. Одностадійний метод був розроблений на рубежі 1970-х – 1980-х рр. у Європі та Японії; мультистадійний метод був розроблений у Північній Америці на рубежі 1980-х – 1990-х рр. Одностадійний метод дозволяє виконувати регенерацію асфальтобетонного покриття на глибину до 50 мм; мультистадійний метод дозволяє виконувати регенерацію на загальну глибину до 75 мм та передбачає почергове пошарове, у два-чотири шари, розігрівання та рихлення асфальтобетонного покриття, де гарячий матеріал попередньо розрихленого шару подається до наступного фрезерувального агрегату без додаткового нагрівання [23]. Порядок та спосіб виконання мультистадійних операцій залежить від конструкції та технічних характеристик спеціалізованої дорожньої техніки.

Технологія *repaving* поєднує технологію гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі з укладанням поверхневого шару нової гарячої асфальтобетонної суміші. Ресайклінг верхнього шару існуючого асфальтобетонного покриття виконують за технологією *surface recycling* (*surface recycling* або *remixing* – згідно з [23]) на глибину (25 – 50) мм, шар нової асфальтобетонної суміші укладається безпосередньо на гарячий шар попередньо ущільненої РГС з одночасним остаточним ущільненням обох шарів. Товщина шару нової асфальтобетонної суміші залежить від номінального максимального розміру зерен заповнювача та становить від 12 мм згідно з [16] до 75 мм згідно з [23]. Доцільно зменшувати товщину шару нової суміші, оскільки влаштування шарів методом «гарячий шар на гарячий шар» та їх одночасне ущільнення забезпечує високу адгезію двох шарів [23].

Проекти з застосуванням технологій *HIR* почали масштабно реалізовуватись на початку 1990-х рр. на об'єктах дорожньої інфраструктури Північної Америки Федеральною адміністрацією доріг США (*FHWA, Federal Highway Administration*), у т.ч. у шт. Флорида, 1995 р., та в Канаді (провінція Альберта), 1993 р. [16]. У шт. Флорида технології *HIR* було застосовано для регенерації асфальтобетонного покриття при ремонті автомобільної дороги з інтенсивністю руху 33000 авт/добу, з кількістю вантажних транспортних засобів 10 %.

При виконанні проекту було здійснено регенерацію покриття на глибину 25 мм з укладанням шару нової асфальтобетонної суміші за один прохід, з попереднім плануванням (холодним фрезеруванням) поверхні старого покриття.

У провінції Альберта технології *HIR* було застосовано при ремонті ділянок автомобільної дороги з інтенсивністю транспортного потоку 3040 авт/добу (з приведенням до розрахункових навантажень 188 *ESALs* на

добу²) з високою аварійністю, з дефектами покриття у вигляді глибоких поперечних тріщин, викришування матеріалів та колійності з глибиною колії до 14 мм. При виконанні проекту було проведено регенерацію шару асфальтобетону на глибину 40 мм з укладанням поверхневого шару нової асфальтобетонної суміші завтовшки 60 мм. Результати моніторингу через 2 роки засвідчили високу якість регенованого покриття. При виконанні обох проектів були застосовані регенеруючі добавки.

Згідно з даними [24], технології *HIR* було застосовано при виконанні дослідницького проекту S 130 (1997 – 1998 рр.) при ремонті магістралі I-55, шт. Міссісіпі, США. Дослідницькі проекти з опрацювання технологій *HIR* виконувались в шт. Міссісіпі з 1978 р. з застосуванням техніки та технологій виробників дорожньої техніки *Cutler, Jackson* та *Wirtgen*. При виконанні проекту S 130 було доопрацьовано дорожню техніку та технологію гарячої регенерації асфальтобетонних сумішей за методами *Superpave*. Цікаво, що гарячу регенерацію асфальтобетонного покриття за проектом S 130 було виконано на ділянці, яку ремонтували у 1991-1992 рр. з застосуванням техніки і технологій *HIR* від виробника *Wirtgen* (ресайклінг на глибину 25 мм з додаванням нової асфальтобетонної суміші у кількості 27,1 кг/м²) [24]. Роботи за проектом S 130 передбачали ресайклінг асфальтобетону на глибину 50 мм з додаванням нової асфальтобетонної суміші у кількості 27,1 кг/м² з метою коригування поперечного похилу.

При виконанні робіт з застосуванням технологій *HIR* у 2006 р. [25] у шт. Колорадо, США, при регенерації ~ 920 тис. м² асфальтобетонного покриття було задекларовано економічний ефект 5 млн. доларів США. Роботи за цим проектом виконувались переважно на дорогах (ділянках доріг) місцевого значення з обмеженим рухом вантажного транспорту та передбачали переважно влаштування шару регенованого асфальтобетону

²*Equivalent Single Axle Load, ESAL*, еквівалент розрахункового навантаження на одну вісь, становить для прийнятої системи проектування 80 кН.

(РГА) завтовшки 50 мм з влаштуванням поверхневого шару гарячої асфальтобетонної суміші завтовшки 25 мм, виготовленої в установці з додаванням асфальтобетонної крихти в кількості 20 % за масою. Поряд з досягнутим економічним ефектом, агентства-замовники відзначили такі переваги, як стислі строки виконання робіт та високу адгезію (зчеплення) двох укладених шарів асфальтобетонного покриття [25].

Гарячу регенерація асфальтобетонного покриття з застосуванням технологій *HIR* було виконано в шт. Вашингтон, США, при ремонті дороги SR 542. Ремонтований об'єкт за конструкцією дорожнього одягу, інтенсивністю руху та станом покриття був умовно розподілений на три ділянки, де інтенсивність руху складала від 4900 до 12000 транспортних одиниць на добу при кількості вантажних транспортних засобів від 9,23 % до 11,52 % [26]. Основні дефекти асфальтобетонного покриття на ремонтованих ділянках були описані як колійність, викришування матеріалів, поздовжні та поперечні тріщини, сітка тріщин, незадовільне зчеплення. На ділянках з розвинутою сіткою тріщин (*alligatored pavement*) перед застосуванням технологій *HIR* асфальтобетонні шари (верхній та нижній) були повністю видалені та здійснено додаткове ущільнювання розташованих нижче шарів; частину видаленого асфальтобетону було компенсовано укладанням нової асфальтобетонної суміші.

Згідно з [26], економічний ефект від застосування технологій *HIR* становив (20 - 30) % у порівнянні з традиційними технологіями ремонту асфальтобетонних покриттів. Було надано висновки, що на якість регенованого асфальтобетонного покриття суттєво впливає вибір бітумного в'язучого.

Сучасні технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття з застосуванням спеціалізованої дорожньої техніки виробника *Wirtgen* (Німеччина) передбачають наступну класифікацію методів гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі:

- метод *Reshape (Reform)* – профілювання;
- метод *Repave* – профілювання з відновленням шару зносу;
- метод *Remix* – регенерація зі зміною складу старого асфальтобетону шляхом додавання нових матеріалів у кількості до 30 % (переважно до 20 %) за масою;

- метод *Remix Plus* – регенерація із зміною складу старого асфальтобетону і одночасним влаштуванням шару нової асфальтобетонної суміші за один прохід.

Метод *Reshape* призначений для усунення колійності та інших нерівностей покриття. Проводиться розігрівання і профілювання пошкодженого покриття. Цей спосіб гарячої регенерації дозволяє досягти необхідної рівності і змінити, якщо потрібно, поперечний похил проїзної частини.

Метод *Repave* також призначений для профілювання старого покриття, але з влаштуванням тонкого поверхневого шару нової асфальтобетонної суміші. Обидва шари: регенований і поверхневий - спочатку ущільнюються обладнанням реміксера, а потім ущільнюються котками. Цей метод призначений для вирівнювання глибокої колії, зміни поперечного похилу, посилення покриття й поліпшення його зчіпних якостей.

Метод *Remix* – використання методу *Remix* дозволяє цілеспрямовано змінити властивості наявного матеріалу за рахунок введення бітуму і кам'яного матеріалу. Метод *Remix* дає можливість відновити зруйнований шар зносу; стабілізувати та посилити покриття; скоригувати поперечні похили. Відновлене за методом *Remix* покриття можна використовувати в якості нижнього шару основи, що дає додатковий резерв збільшення міцності дорожнього одягу.

Метод *Remix Plus* є продовженням і удосконаленням методу *Remix*. Цей метод дозволяє не тільки відновити покриття, але і одночасно укласти новий шар асфальтобетонної суміші. Ущільнення обох шарів здійснюється за

один прохід; загальна товщина двох шарів в ущільненому стані повинна становити не менше ніж 70 мм.

Згідно з інформацією, наявною на сайті виробника дорожньої техніки *Wirtgen* (www.wirtgen.com), методи *Remix* та *Remix Plus* були застосовані при виконанні масштабних проектів у ФРН та КНР.

У ФРН при виконанні робіт на автомобільній дорозі федерального значення В-9 з тріщинуватим покриттям було застосовано метод *Remix Plus* з коригуванням складу старого асфальтобетону шляхом додавання нових мінеральних матеріалів та бітуму [27].

Схематичне зображення технологічного процесу при виконанні робіт на об'єкті В-9 наведено на рисунку 1.2.

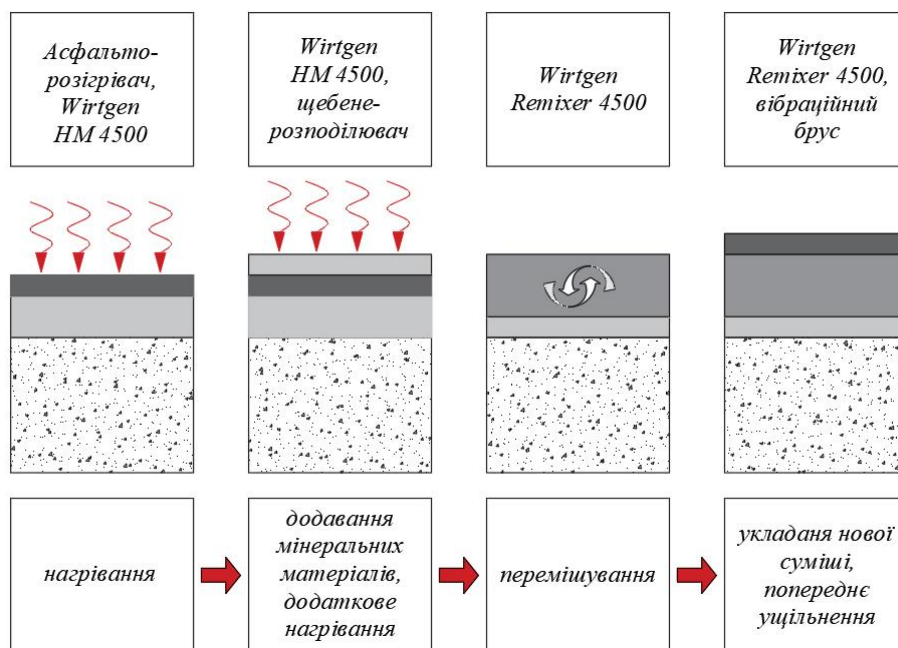
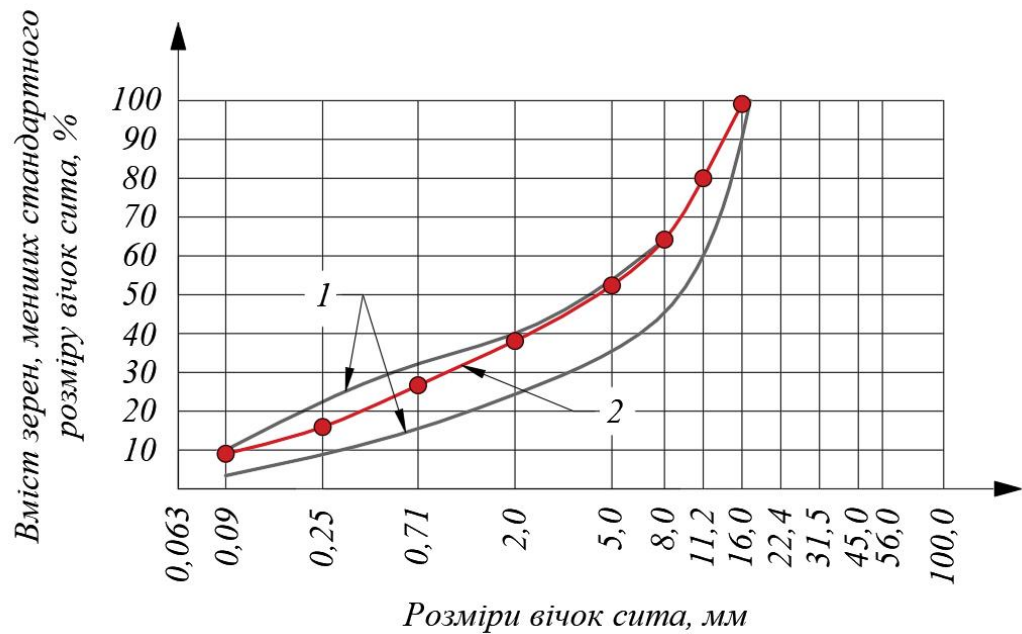


Рисунок 1.2 – Схематична послідовність технологічного процесу
Remix Plus

Процедура підбору складу складалася з підбору гранулометричного складу мінеральної частини РГС, результати якого наведені на рисунку 1.3, та підбору складу РГА за вмістом бітуму (табл. 1.2).



1 – граничні криві гранулометричного складу; 2 – підібраний гранулометричний склад
РГС

Рисунок 1.3 – Результати підбору гранулометричного складу РГС
згідно з [27]

Таблиця 1.2 – Результати підбору складу РГА за вмістом в'язучих
згідно з [27]

Матеріал	Вміст, % за масою				
	Фактичний			Нормований	
	I-й склад	II-й склад	III-й склад	мінімальний	максимальний
Бітум у складі старого асфальтобетону	4,8	4,8	4,8	-	-
Новий бітум	0,1	0,2	0,3	-	-
Бітум у складі РГС	4,9	5,0	5,1	4,00	6,00

При випробуванні зразків було показано, що РГА складів I, II та III (таблиця 1.2) задовольняють вимоги нормативних документів, тому при виконанні робіт на об'єкті було використано суміш складу I [27].

Додавання нових мінеральних матеріалів здійснювали з застосуванням щебенерозподільвача з нанесенням на поверхню розігрітого асфальтобетонного покриття безпосередньо перед другим асфальторозігрівачем (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Технологічна операція нанесення нових кам'яних матеріалів для коригування складу старого асфальтобетону в технології *Remix Plus*

Шар асфальтобетонного покриття, влаштований за технологією *Remix Plus*, складався з шару РГА завтовшки 5 см, та шару нової асфальтобетонної суміші з застосуванням бітуму, модифікованого полімерами, завтовшки 3 см [27].

У КНР станом на 2005 р. з застосуванням техніки і технологій *HIR* від виробника *Wirtgen* було успішно здійснено регенерацію асфальтобетонного покриття на загальній площі 2,5 млн. м² [28]. У КНР технології *HIR* вперше були застосовані у 2002 р. при виконанні робіт на магістралі *Jing-Jin-Tang*, однієї з найбільш завантажених транспортних артерій КНР, де інтенсивність руху становила 32000 авт/добу при кількості вантажних транспортних засобів 10 %. Довжина ремонтваної секції, побудованої у 1990 р., становила 22,5 км; основним дефектом поверхні була розвинута тріщинуватість [28]. Для регенерації покриття був застосований метод *Remix*; склад та властивості старого асфальтобетону коригували додаванням нової асфальтобетонної суміші підібраного складу у кількості 10 % за масою, а також регенеруючої добавки у кількості (0,3 – 0,4) % за масою. Виконання робіт було продовжено у 2002 р. на ділянці довжиною 30 км, яка характеризувалася тріщинуватістю та помірною колійністю покриття. Регенерацію покриття здійснювали методом *Remix*; склад та властивості старого асфальтобетону коригували

додаванням нової асфальтобетонної суміші підбраного складу у кількості (8 – 10) % за масою, а також регенеруючої добавки у кількості (0,4 – 0,6) % за масою [28]. Новий проект з застосуванням метода *Remix Plus* було виконано у 2005 р.; у ході робіт протягом декількох місяців було регеновано 540000 м³ асфальтобетону. Для відновлення властивостей бітуму до фрезерованої асфальтобетонної суміші вводили регенеруючу добавку в кількості від 0,4 л до 1,0 л на 1 м². Товщина влаштованого шару РГА становила 4 см, товщина шару нової асфальтобетонної суміші – 3 см [28]. Агентства-замовники відмічали високу швидкість виконання ремонтних робіт, мінімальні перешкоди руху транспорту, високу якість регенованого покриття та зчеплення шарів РГА та нового асфальтобетону.

У вітчизняній практиці дорожнього будівництва при ремонтах та реконструкції автомобільних доріг застосування методів гарячої регенерації на дорозі почалося з 80-х років, коли фахівцями ДерждорНДІ була сконструйована машина для відновлення асфальтобетонного покриття моделі 4240.

За останні 10 років методи гарячої регенерації на дорозі були застосовані на об'єктах Чернігівської, Закарпатської, Миколаївської та Чернівецької областей, зокрема на автомобільних дорогах:

- М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі;
- М-06 Київ – Чоп;
- Р-06 Ульянівка – Миколаїв;
- Н-09 Мукачеве – Рахів – Богородчани – Івано-Франківськ – Рогатин – Бібрка – Львів.

При виконанні робіт на ділянках автомобільної дороги М-01 було застосовано методи гарячого ресайклінгу на дорозі *Reshape* та *Remix* без зміни та зі зміною складу старого асфальтобетону відповідно.

Переважаючий обсяг робіт (понад 80 % площі асфальтобетонного покриття) передбачав гарячу регенерацію асфальтобетонного покриття з наступним влаштуванням захисного шару ЛЕМС за технологією *Multimac*

для підвищення транспортно-експлуатаційних показників (зчеплення), особливо в зимовий експлуатаційний період.

Роботи з гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі виконувались комплексом дорожніх машин з ведучою машиною реміксером WIRTGEN RP/RC 4500 та асфальторозігрівачем WIRTGEN HM 4500.

Для коригування складу старого асфальтобетону за методом *Remix* на різних ділянках згідно з технічною документацією використовували (нову) гарячу асфальтобетонну суміш у кількості від 50 кг/м² до 75 кг/м².

Одна з головних проблем, виявлених при використанні технології гарячої регенерації на дорозі, полягає в неоднорідності матеріалу старого покриття, який після переробки і поліпшення, укладається повторно. Неоднорідність обумовлена тим, що старе покриття могло бути укладено багато років тому різною товщиною шарів, з різних матеріалів, особливо бітумів, які з часом змінюють свої властивості. У процесі експлуатації старе покриття неодноразово ремонтувалося із застосуванням різних технологій і матеріалів. Тому до моменту регенерації та повторного використання склад матеріалу шарів, що знімаються, може істотно змінитися на окремих ділянках. Необхідний ретельний контроль за складом, якістю та однорідністю матеріалу старого покриття [29, 30].

1.3 Мета та задачі досліджень

Аналіз досліджень технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі та досвіду впровадження дають змогу сформулювати наступну 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 РГА та РГС повинна задовольняти вимоги нормативних документів.

Мета дослідження 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 РГА 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.

Висновки до розділу 1

Аналіз технічного стану автомобільних доріг загального користування та досвіду застосування технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі дозволив зробити наступні висновки:

- технологія гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі виглядає досить перспективною при поточних ремонтах територіальних доріг державного значення або доріг місцевого значення, коли за незначні фінансові затрати необхідно відновити транспортно-експлуатаційні показники дорожнього одягу, ліквідувати його незначні руйнування та деформації та продовжити строк служби [29, 30];

- технологія гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі дозволяє усувати дефекти асфальтобетонного покриття, які не пов'язані з втратою структурної цілісності та несучої здатності дорожнього одягу: колійність, тріщинуватість, вибоїні, викришування матеріалів асфальтобетону; ефективна максимальна робоча глибина ресайклінгу становить 60 мм;

- можливість коригування складу асфальтобетону існуючого покриття методами «*Remix*» та «*Remix Plus*» шляхом введення до складу РГС та РГА нових матеріалів дозволяє ефективно усувати дефекти, пов'язані з невідповідністю складу та властивостей асфальтобетону нормативним вимогам, у тому числі при надлишковому вмісті бітуму, яке призводить до утворення колійності. Поряд з цим, методи «*Remix*» та «*Remix Plus*» дозволяють компенсувати втрати матеріалів покриття внаслідок зносу;

- з метою запобігання впливу неоднорідності матеріалу старого покриття на РГА зазначену технологію регенерації доцільно застосовувати на автомобільних дорогах з покриттям, що знаходиться у доброму стані, на якому мінімум деформацій та руйнувань та місць ліквідації вибоїн [21, 28]. Головною причиною невдалого досвіду застосування технології називають неправильно обрані ділянки для проведення ремонту, оскільки не було належним чином враховано існуючий стан покриття;

- ефективність регенерації асфальтобетонних покриттів з застосуванням гарячої регенерації на дорозі залежить від точності оцінювання стану об'єктів та матеріалів на стадії інженерних вишукувань, та, відповідно, від своєчасного виконання окремих видів ремонтних робіт, таких

як ремонт тріщин на глибину, що перевищує робочу глибину гарячої регенерації;

- для збереження відповідного техніко-експлуатаційного стану дорожнього одягу протягом встановленого періоду експлуатації рекомендується влаштування на шарі РГА захисного шару литої емульсійно-мінеральної суміші або перекриття накладним шаром за технологією «*Remix Plus*»;

- однією з ключових складових технологічного процесу гарячої регенерації асфальтобетону методом «*in place*» є розігрівання асфальтобетонного покриття на певну глибину та, як наслідок, температура перемішування.

Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях: [5, 29 – 34].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування вибору параметрів технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття

Нормативні значення показників фізико-механічних властивостей РГС та РГА 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.

З метою дослідження властивостей асфальтобетону, зокрема і регенованого, розглянуто та проаналізовано роботи відомих вчених: Г.С. Бахраха, Л.В. Білай, І.П. Гамеляка, В.І. Братчуна, Л.Б. Гезенцева, М.В. Горелишева, В.К. Жданюка, В.О. Золотарьова, 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 [35-49].

У роботі [16] встановлено, що гаряча регенерація дорожніх одягів є максимально ефективною, коли строк експлуатації не перевищує (8–10) років при міжремонтних строках (12–14) років. За цей період дорожній одяг втрачає лише близько 40 % якості. Вчасно виконані ремонтні роботи дозволяють попередити стрімкий розвиток руйнувань на дорожньому покритті та продовжити його строк служби. У роботі досліджено вплив вмісту старого бітуму на якісні характеристики РГА. В той же час ці дані є узагальнюючими і не відображають залежності довговічності відремонтованого покриття від комплексного впливу внутрішніх структурних та зовнішніх погоднокліматичних факторів.

Дослідження авторів роботи [50] показали, що при гарячій регенерації асфальтобетону дуже важливо враховувати зміну властивостей бітуму, який є основною складовою, що характеризує поведінку РГА. Причиною зміни властивостей бітуму є його експлуатаційне старіння, яке відбувається під дією різних погодно-кліматичних факторів (температура, кисень та ультрафіолетове випромінювання).

У своїх роботах Риб'єв І.А. визначає, що основними причинами руйнування асфальтобетону є зміна властивостей самого матеріалу, зокрема передчасне старіння бітуму або порушення зв'язків між бітумом і мінеральним матеріалом. У той же час недостатня первинна міцність або деформативна стійкість асфальтобетону не є ключовими факторами [51]. У роботі [52] показано, що чим вище адгезійно-когезійні властивості органічного в'язучого і чим більшою мірою структурований його адсорбційно-сольватний шар на поверхні мінерального матеріалу, тим вище межа міцності бетону R (2.1).

$$R = R^* \left(\frac{\delta^*}{\delta} \right)^n, \quad (2.1)$$

де R^* - межа міцності асфальтов'язучої речовини оптимального складу;

δ і δ^* - товщина плівки в'язучого в асфальтов'язучій речовині асфальтобетону відповідно звичайного і оптимального складу;

n – показник степеневі функції, що залежить від особливостей матеріалів, які застосовуються.

Золотарьов В.А., розвиваючи закон міцності оптимальних структур композиційних матеріалів з коагуляційним типом контактів, отримав залежність міцності асфальтобетону в в'язкопружному стані (2.2) [53], з якої випливає, що міцність такого виду матеріалів визначається в'язкістю і когезією органічного в'язучого, ступенем його структурованості поверхнею мінеральних матеріалів і рівнем розвитку каркаса з мінеральних часток.

$$R_{\phi} = \left(\frac{\delta_{\text{стр}}}{\delta_{\phi}} \cdot K_{\text{ущ}} \right)^n \cdot K_{\text{пов}}, \quad (2.2)$$

де R_{ϕ} – межа міцності асфальтобетону;

$\delta_{\text{стр}}$ і δ_{ϕ} – відповідно товщина плівки бітуму, що відповідає початковій ділянці структуроутворення на концентраційній кривій міцності асфальтов'язучого, і товщина плівки в асфальтобетоні фактичного складу;

$K_{\text{ущ}}$ – коефіцієнт, що характеризує зменшення товщини плівки органічного в'язучого при ущільненні;

n – коефіцієнт, що показує інтенсивність структурування бітуму мінеральною поверхнею;

$K_{\text{пов}}$ – коефіцієнт розвитку поверхні, що характеризує внесок мінерального кістяка в розвиток сумарної поверхні руйнування.

Результати досліджень, наведених в роботі [22, 54], свідчать про те, що у процесі гарячої регенерації на дорозі внаслідок жорстких умов розігрівання покриття асфальторозігрівачем додатково відбувається інтенсивне старіння бітуму. Це проявляється у значному зниженні показника penetрації бітуму на (20–25) % і втраті асфальтобетоном комплексу експлуатаційних характеристик. Однак в роботі залишились невирішеними питання, пов'язані зі зміною фізико-механічних властивостей РГА в залежності від температури перемішування. Вплив високих технологічних температур призводить до випаровування низькомолекулярних компонентів органічного в'язучого – масел і частково смол. Це робить в'язуче більш твердим, крихким і менш деформативним. Асфальтобетонна суміш з таким в'язучим не буде довговічною, а технологія гарячої регенерації економічно не вигідною. Все це дозволяє стверджувати про необхідність встановлення оптимальних технологічних температур, а також пошуку шляхів зниження технологічного старіння бітуму. Одним із перспективних підходів до вирішення цієї

проблеми, згідно з дослідженнями авторів [55] може бути застосування мікрохвильового випромінювання для розігрівання покриття, яке є більш енергетично ефективним, у порівнянні з інфрачервоним випромінюванням, рішенням для розігрівання асфальтобетонного покриття та за якого ефект старіння бітуму є мінімальним.

На основі аналізу вищенаведеного можна зробити висновок про те, що одним з найбільш вагомих факторів, що впливає на довговічність і працездатність асфальтобетонного дорожнього покриття, є якість бітуму. Тому, для підвищення надійності та довговічності дорожніх покриттів необхідно покращити якість органічного в'язучого.

Варіантом вирішення проблеми старіння бітуму може бути використання регенеруючих добавок – продуктів на основі важких нафтових олив, або іншого складу. Введення таких добавок забезпечує пластифікацію залишкового бітуму і часткове відновлення його експлуатаційних властивостей [49, 56, 57]. З метою усунення проблеми старіння бітуму при проектуванні складів РГА в роботі [23] зазначено про важливість додавання нового бітуму.

На практиці встановлено, що вміст залишкового бітуму в фрезерованому асфальтобетоні може змінюватися від 4 % до 8 %. Але на сьогоднішній день при наявності на ринку великої кількості різних видів регенеруючих добавок відсутні дані щодо точної кількості їх дозування залежно від вмісту залишкового бітуму для різних типів асфальтобетонних сумішей.

Враховуючи високу ринкову вартість регенеруючих добавок, доцільним є визначення її оптимальної кількості залежно від вмісту залишкового бітуму, при якій комплекс експлуатаційних властивостей РГА буде найкращим.

У роботі [58] показано, що процеси старіння бітуму супроводжуються структурними змінами, що базуються на зміні його хімічної природи.

Асфальтобетон має коагуляційну структуру, в якій тверді частинки розділені рідкою фазою, тому тривале прикладення навантажень, взаємне переміщення частинок приводять до того, що мінеральна частина асфальтобетону піддається дезінтеграції. Проблемами дезінтеграції мінеральних частинок в старому асфальтобетоні, її впливом на величину внутрішнього тертя, зсувостійкість асфальтобетону займалися В. К. Некрасов, Б. І. Ладигін, В. А. Ромаданов. Під впливом навантаження відбувається подрібнення мінеральної частини, що може сприяти утворенню прогинів дорожнього одягу. При кожному прогині в його шарах відбувається взаємне переміщення зерен матеріалу, що призводить до взаємного стирання частинок, відколювання і розтріскування при зменшенні в розмірі. Таким чином, мінеральний заповнювач в загальній структурі монолітного шару асфальтобетону стає не рівномірно розподіленим [58].

За нормами ЄС, якщо фрезерована асфальтобетонна суміш є неоднорідною, то вона не використовується для шару дорожнього покриття, а в нові асфальтобетонні суміші шарів основи вона може бути додана в кількості, не більше 10% [59]. Додавання фрезерованого асфальтобетону в кількості

(30 – 65) % в РГС допускається тоді, коли стара суміш однорідна, має відомий склад і надходить з одного місця фрезерування. Зазвичай це ділянки доріг великої протяжності. Для таких ділянок дуже часто наявні паспортні дані про конструкцію дорожнього одягу, тому можливо знайти інформацію про асфальтобетон, який використовувався при будівництві дороги. При проведенні лабораторних досліджень фрезерованих сумішей перевіряють їх відповідність стандартним вимогам до нових сумішей. Особливу увагу приділяють ступеню старіння в'язучого, після визначення його властивостей коректують в'язкість та його кількість, яку необхідно додати при приготуванні РГС [59].

При регенерації асфальтобетонних шарів дорожнього одягу методом на дорозі доцільно також приділяти увагу якісному перемішуванню розпушених матеріалів старого покриття.

Перемішування матеріалів є однією з основних операцій технології приготування. Метою процесу перемішування сумішей є максимально повне покриття зерен кам'яних матеріалів суцільним, рівномірним по товщині, для зерен одного розміру, шаром в'язучого.

У міру перемішування однорідність асфальтобетонної суміші зростає, досягає максимуму, а потім знижується. Зниження однорідності суміші обумовлено уповільненням процесу подальшого перерозподілу бітуму і пов'язане з охолодженням та злипанням суміші в грудки. При цьому і якісні характеристики асфальтобетонної суміші погіршуються [44, 51, 59]. Графічні залежності фізико-механічних показників асфальтобетону від тривалості перемішування зображені на рисунках 2.1, 2.2.

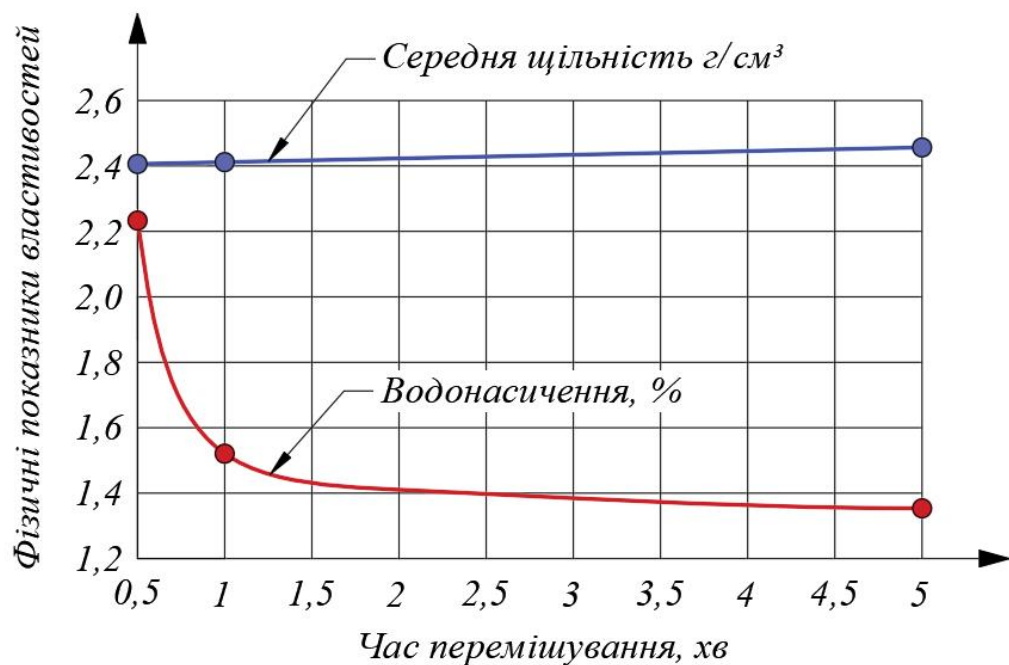


Рисунок 2.1 – Залежність фізичних властивостей асфальтобетону від часу приготування асфальтобетонної суміші [44]

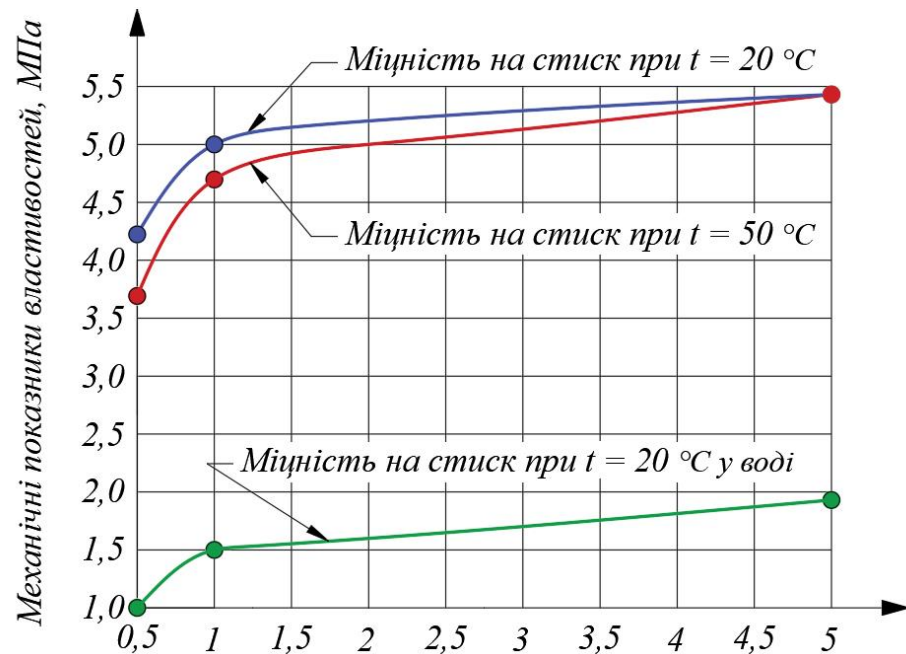


Рисунок 2.2 – Залежність механічних властивостей асфальтобетону від часу приготування асфальтобетонної суміші [44]

Зі збільшенням часу перемішування з 1 хв до (4-5) хв безперервно покращуються всі фізико-механічні властивості асфальтобетону (при оптимальній кількості бітуму для нових умов). Найбільш різкі зміни в перші 2-3 хв, далі зміни менш інтенсивні. Після чого відбувається агрегація частинок, що призводить до зменшення однорідності суміші [44].

Збільшення часу перемішування зменшує потребу в оптимальній кількості бітуму (рис. 2.3) [60]. Це відбувається через розподілення бітуму більш тонкими шарами, що позитивно впливає на механічну міцність. Найвищі показники міцності можна отримати тільки при певній інтенсивності змішування.

На рисунку 2.4 показана залежність міцності асфальтобетону від кількості бітуму при різній тривалості перемішування: більш інтенсивне перемішування (1) призводить до зниження оптимальної кількості бітуму та до збільшення міцності порівняно з асфальтобетонами з менш інтенсивним перемішуванням (2), (3). Графічні залежності фізико-механічних показників асфальтобетону від вмісту бітуму зображені на рисунках 2.5 – 2.7 [60].

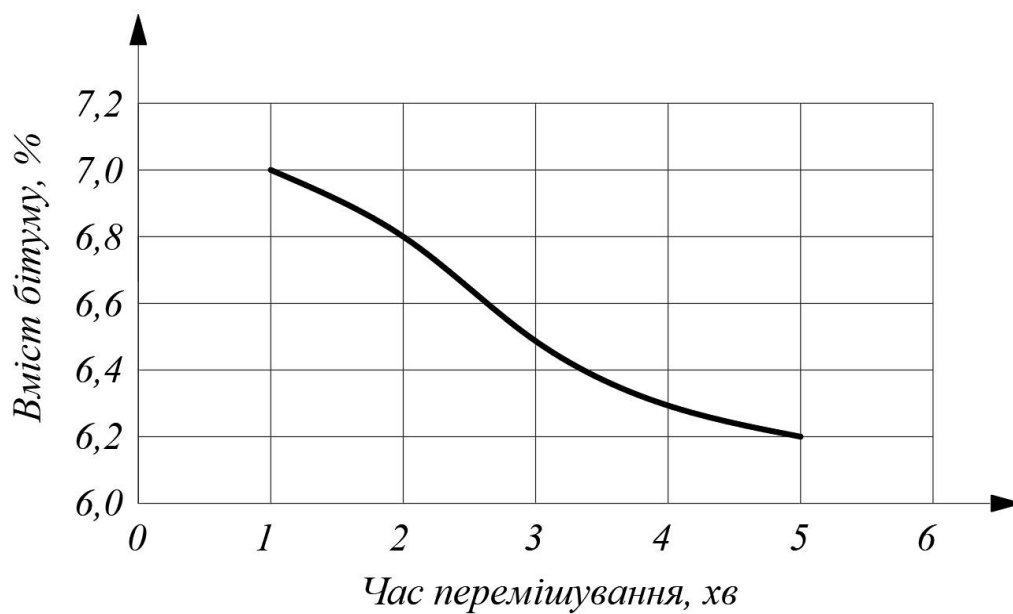
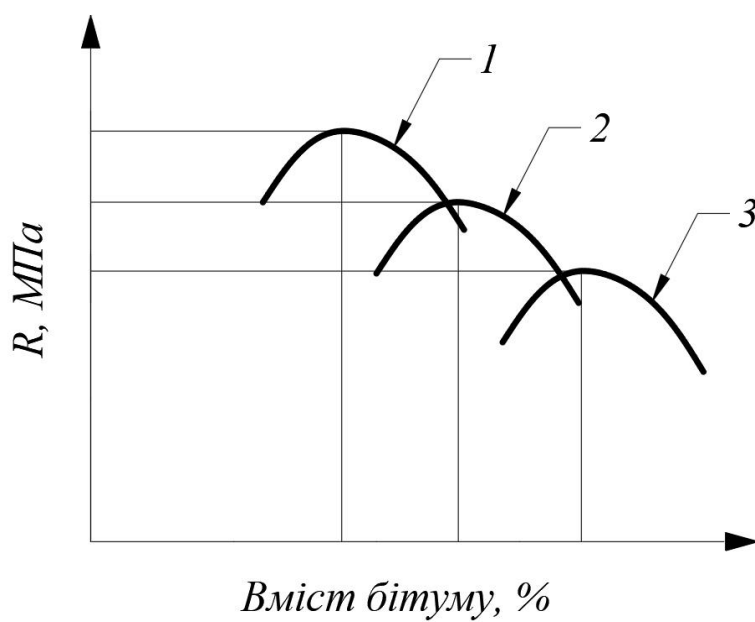


Рисунок 2.3 – Зміна оптимальної кількості бітуму залежно від часу перемішування [60]



1, 2, 3 – максимальна, середня, низька інтенсивність перемішування

Рисунок 2.4 – Схема залежності міцності асфальтобетону від вмісту бітуму та інтенсивності перемішування суміші [60]

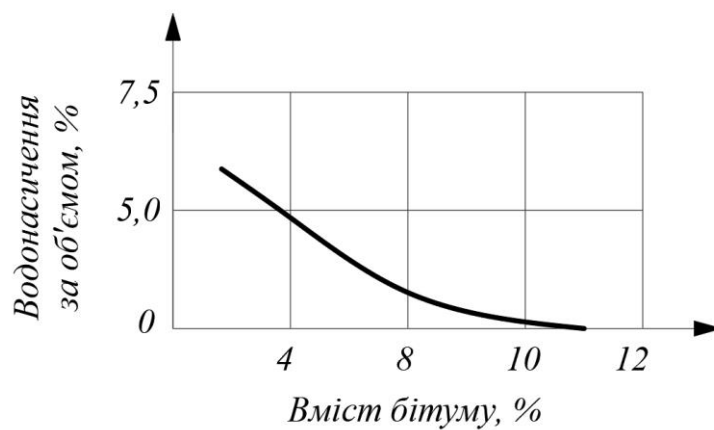


Рисунок 2.5 – Залежність водонасичення від вмісту бітуму [60]

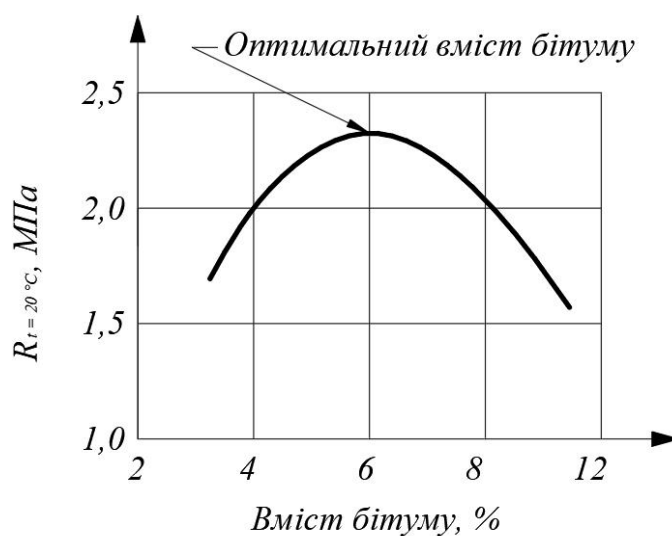


Рисунок 2.6 – Залежність міцності R_{20} від вмісту бітуму [60]

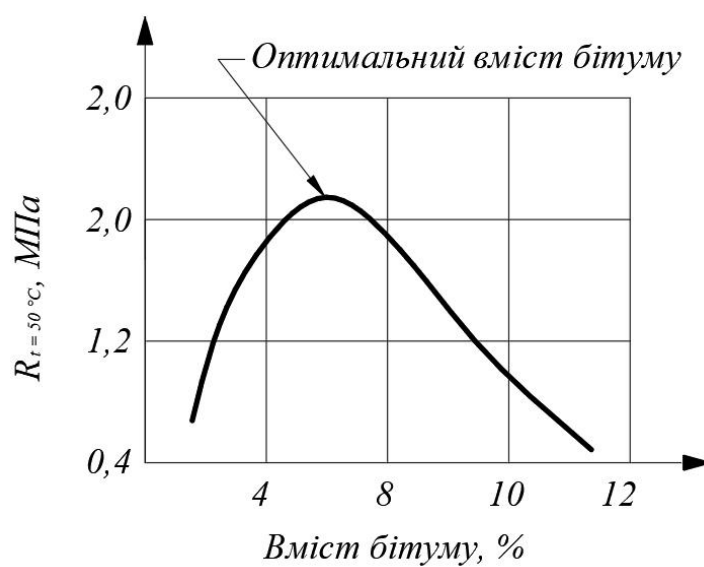


Рисунок 2.7 – Залежність міцності R_{50} від вмісту бітуму [60]

Наявність великої кількості вільного бітуму негативно впливає на характеристики суміші. Якісне перемішування знижує кількість вільного бітуму, що в свою чергу призводить до оптимальної щільності внаслідок зближення мінеральних частинок, збільшується міцність, підвищується пластичність. Правильне змішування дозволяє рівномірно розподілитися всім компонентам в суміші, зокрема в'язучому. Відбувається витіснення надлишків вільного бітуму внаслідок його перерозподілу.

Таким чином, при гарячій регенерації на дорозі дуже важливо встановити мінімально допустимий час перемішування.

Важливою складовою технологічного процесу гарячої регенерації асфальтобетону методом «*in place*» є розігрівання асфальтобетонного покриття на певну глибину із застосуванням переважно теплової енергії інфрачервоного опромінювання [58].

Результати випробувань зразків асфальтобетону після багаторазового розігріву, наведені в роботах [58, 61], свідчать, що за температур, не вищих ніж 180 °C, та тривалості розігрівання до 30 хв. асфальтобетон не змінює характеристики. При забезпеченні температури на поверхні асфальтобетонного покриття (160–180) °C глибина прогрівання асфальтобетону до переходу його у пластичний стан сягає (4–6) см при певних габаритах та швидкості переміщення асфальторозігрівача [58]. Орієнтовні значення температури асфальтобетону на різній відстані від поверхні наведено в роботі [58]. Проте в роботі не враховано вплив швидкості руху асфальторозігрівача на глибину прогрівання шару асфальтобетону. У той же час, у роботі [58] встановлена мінімальна температура попереднього нагрівання дорожнього покриття – 120 °C, при якій забезпечуються ефективно перемішування асфальтобетонної суміші та якісні показники регенованого покриття.

Авторами в роботах [57, 61] встановлено вплив температури та тривалості перемішування суміші на її однорідність. Проведені дослідження показали, що підвищення однорідності суміші досягається збільшенням

температури нагріву. Способом підвищення однорідності суміші може бути також збільшення тривалості її перемішування.

Проте дослідження граничних значень температури розігрівання дорожнього покриття та приготування РГС не дає в повній мірі інформації щодо оптимальних температурних режимів, оскільки діапазон розігріву досить широкий – (120–180) °С.

У дослідженні [25] показано, що недостатня температура розігрівання покриття є однією з головних причин неякісного виконання робіт з гарячої регенерації асфальтобетону методом «*in place*». З іншого боку надмірно висока температура розігріву покриття прискорює старіння бітуму та знижує якість РГС та РГА.

Важливим елементом перемішування гарячих асфальтобетонних сумішей є переведення термопластичного в'язучого в текучий стан. Для бітумних в'язучих важливо встановити температури їх переходу в стан, при якому здійснюється процес перемішування. Температурні залежності в'язкості бітумів різної пенетрації досліджені Золотарьовим. Враховуючи, що розпушений асфальтогранулят покритий бітумною плівкою можна припустити що для рівномірного розподілу в'язучого в суміші температуру перемішування можна зменшити.

Цей висновок підтверджується результатами дослідження регенерації асфальтобетонної суміші з використанням регенеруючої добавки, без додавання нових мінеральних матеріалів [62]. Автори [62] вказують, що температура перемішування сумішей, що містять 100 % асфальтобетону існуючого покриття, становить переважно 110 °С, тобто є нижчою, ніж установлюють для «традиційних» асфальтобетонних сумішей. Поряд з цим авторами роботи [62] досліджено, що підвищення температури перемішування та ущільнення РГС, що містять 100 % асфальтобетону існуючого покриття, до 120 °С та 130 °С дозволяє підвищувати стійкість РГА до утворення колії та впливу вологи.

Автори [63] досліджували комплексний вплив температур розігрівання та тривалості розігрівання покриття, де температури розігрівання досліджувалися в інтервалі: 100 °С, 120 °С, 150 °С, та тривалість розігрівання досліджувалася в інтервалі: 60 хв., 120 хв., 180 хв. Було показано, що за досліджених умов найменше значення температури розігрівання у 120 °С забезпечує належні технологічні та експлуатаційні властивості РГС та РГА.

Вагомий вплив температури розігрівання покриття при гарячій регенерації асфальтобетону методом «*in-place*» зазначено та досліджено також авторами роботи [64]. Як інструменти дослідження застосовано ІЧ-контроль температури (натурні дослідження) та методи моделювання інфрачервоного зображення з метою коригування температурних параметрів процесу; при цьому досліджувалися та порівнювалися три системи нагріву покриття: розігрівання полум'ям, інфрачервоне випромінювання та розігрівання гарячим стиснутим повітрям. Якість розігрівання оцінювали за трьома кількісними параметрами:

- поздовжня однорідність T_u для оцінювання температурної однорідності;
- фактична температура R_t для оцінювання ефективності нагрівання;
- частка температурних значень понад 200 °С РТА 200 для оцінювання впливу перевищення температур.

Результати досліджень показали переваги розігрівання полум'ям та інфрачервоним опромінюванням із точки зору досягнення більш високих температур розігрівання поверхні покриття, проте температурна неоднорідність, як і частка перевищених температур, є високою. На відміну від цього, розігрівання стиснутим повітрям забезпечує високу температурну однорідність покриття та відсутність перегріву, проте ефективність процесу розігрівання є низькою. Аналіз даних показав, що високі значення R_t та

низькі значення T_u призводять до перегріву, а висока температурна однорідність є обов'язковою умовою якісного розігрівання за високих температур. Також у роботі [64] було встановлено залежність (2.3), яка забезпечує якісне розігрівання покриття за умови, що не відбувається перевищення температур понад значення 200 °С:

$$R_t + R_u \cdot T_u < 190^\circ \text{C}. \quad (2.3)$$

Таким чином, температура розігріву та перемішування РГС є вагомим фактором, що визначають якість регенованого асфальтобетонного шару покриття. Визначення її раціонального значення є актуальною науковою задачею, яка має як теоретичне так і практичне значення.

Для опису температурного режиму розігрівання дорожнього покриття з використанням панелей асфальторозігрівача було використане рішення теплопровідності Фур'є для однорідного півпростору [65]. Згідно з цим рішенням температура поверхні півпростору зазнає гармонійного коливання за косинусоїдальною гармонікою (рис. 2.8), що описується аналітичною залежністю:

$$T(t, z = 0) = T_c + A \cdot \cos \omega \cdot t, \quad (2.4)$$

$$\omega = 2\pi/t_n, \quad (2.5)$$

де t – час спостереження, год;

z – вертикальна координата покриття, м;

T_c – середнє значення температури, °С;

A – амплітуда коливань температури на поверхні, °С;

ω – кругова частота, год⁻¹;

t_n – період коливань температури.

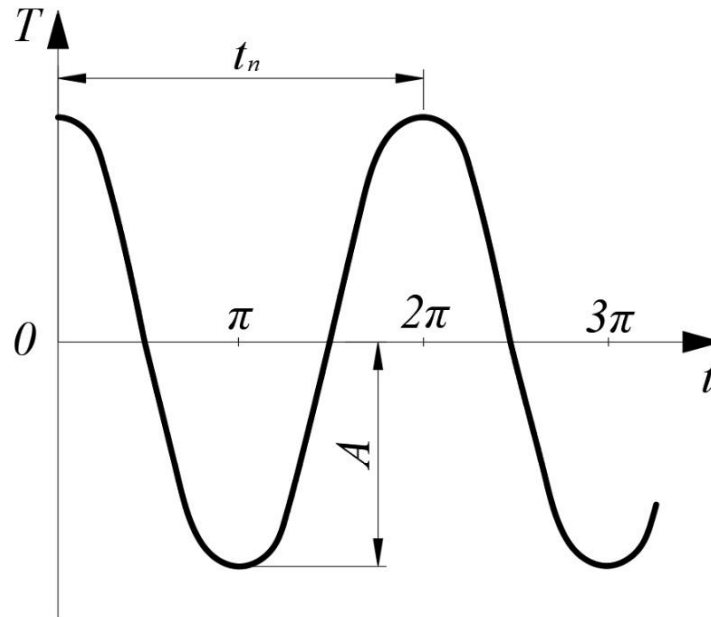


Рисунок 2.8 – Схема зміни температури на поверхні однорідного півпростору при періодичних її коливаннях [65]

Для заданої гармонічної умови на поверхні однорідного півпростору визначення температурного поля і режиму коливання температури за рішенням Фур'є має вигляд:

$$T(t, z) = T_c + A \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cdot \cos(\omega \cdot t - z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}), \quad (2.6)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності асфальтобетону.

Для умов розігріву покриття за допомогою асфальторозігрівачів на початку процесу розігрівання дорожнє покриття буде мати однорідну початкову температуру $T(t=0; z=0) = T_0$, отриману від навколишнього середовища. Максимальна температура розігрівання покриття $T(t=\max; z=0) = T_{\max}$ обмежена допустимою температурою, яка забезпечує недопущення температурної деструкції асфальтобетону. При проходженні асфальторозігрівача стан дорожнього покриття буде характеризуватися

тим, що температура в будь якій його точці буде змінюватися подібно гармонійним коливанням. Розподіл температури в покритті відбуватиметься за гармонічною температурною хвилею від поверхні покриття вглиб масиву (2.6). Зміну температури покриття при його розігріванні асфальторозігрівачами можна представити схемою, що зображено на рисунку 2.9.

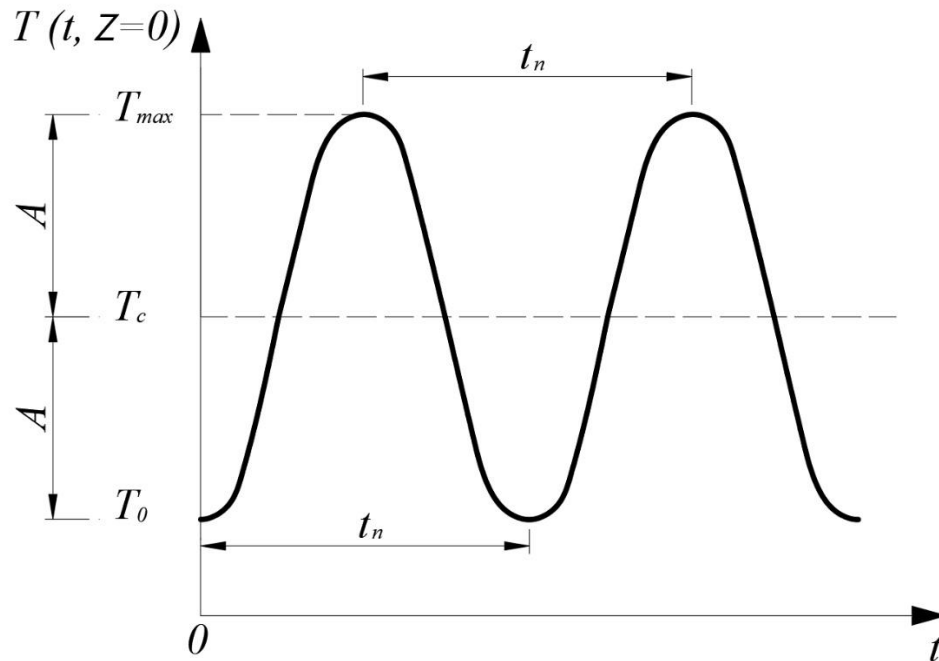


Рисунок 2.9 – Схема зміни температури дорожнього покриття при його розігрівання асфальторозігрівачем

Адаптуючи рішення Фур'є до умов розігрівання дорожнього покриття періодичними проходами асфальторозігрівача з урахуванням схеми зміни температури на поверхні (рис. 2.9) отримана наступна залежність:

$$T(t, z) = T_c + A \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - z \sqrt{\frac{\omega}{2a}} - \pi\right). \quad (2.7)$$

Амплітуда коливань температури на поверхні визначається за формулою:

$$A = \frac{(T_{\max} - T_0)}{2}. \quad (2.8)$$

На підставі зазначеної залежності можна визначати температуру покриття в будь-який момент часу його розігрівання на будь якій глибині. На практиці це дасть змогу контролювати процес розігрівання покриття та не допустити його перегріву на поверхні.

Таким чином, за результатами аналізу теоретичних досліджень в області забезпечення нормативних фізико-механічних показників асфальтобетонів, зокрема і РГА, необхідно відмітити, що цілу низку наукових робіт присвячено дослідженню впливу факторів на кінетику технологічних процесів приготування РГС. До таких факторів можна віднести температуру розігріву покриття, вміст старого та доданого бітуму, вміст регенеруючої добавки, температуру перемішування суміші при приготуванні, тривалість перемішування та його однорідність. Проте, потребують вирішення питання обґрунтування вагомості факторів, що суттєво впливають на фізико-механічні характеристики РГА та визначення оптимальних технологічних режимів його приготування. Рішення, що отримані в роботах [19, 56, 57, 61, 66], здебільшого ґрунтуються на встановленні впливу окремих факторів на фізико-механічні властивості РГА. Це дало підстави стверджувати про доцільність проведення досліджень впливу декількох вагомих факторів одночасно, що відповідає реальній ситуації під час застосування гарячої регенерації.

2.2 Встановлення вагомості факторів

Наведені у 2.1 чинники, що впливають на якість РГА, інтенсивно досліджуються протягом останніх років. Так, автори роботи [67] досліджували вплив ряду технологічних параметрів на ефективність процесу розігрівання HIR. Було показано, що оптимальне сполучення параметрів у кожному окремому випадку забезпечує належну дифузію регенеруючої добавки на глибину регенерації шару асфальтобетону та адгезію старого та нового матеріалів у складі РГА.

З метою встановлення найбільш вагомих факторів, що впливають на фізико-механічні показники РГА, використаний метод експертних оцінок [68 – 79].

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.

В якості факторів, що включені в опитування, були прийняті основні технологічні та технічні показники (табл. 2.1). Вибір факторів обґрунтовано експертною оцінкою фахівців та вимогами [80].

Таблиця 2.1 – Фактори та їх кодовані позначення

Досліджувана змінна (фактор)	Позначення фактору
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

В опитуванні прийняли участь 10 експертів. З метою отримання найбільш об'єктивних результатів в якості експертів були вибрані кваліфіковані фахівці з представників:

- підрядних організацій – ТОВ «СТІ» (Україна), ТОВ «АБЗ-1» (Україна);

– замовників – Служби автомобільних доріг у Чернігівській та Чернівецькій областях (Україна);

– науково-дослідних установ – Національний транспортний університет (Україна), Одеська національна академія будівництва та архітектури (Україна), ДП «ДерждорНДІ» (Україна).

Основним критерієм відбору експертів була наявність досвіду роботи з технологіями гарячої регенерації асфальтобетону. На основі даних анкетного опитування складена зведена матриця рангів (табл. 2.2).

Позначили a_i – ранг i -го фактора у j -го опитуваного фахівця, n – кількість опитуваних фахівців.

Таблиця 2.2 – Зведена матриця рангів

Фахівець, який бере участь в опитуванні	Ранги факторів, що включені в опитування								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
1	4	3	2	1	5	6	8	7	9
2	2	3	1	4	7	4	7	6	5
3	4	6	2	3	1	5	7	8	9
4	1	4	3	2	7	4	6	5	7
5	5	1	2	3	6	4	6	7	5
6	3	2	4	5	4	1	3	5	6
7	4	2	3	1	5	6	6	7	7
8	5	6	3	2	1	5	4	7	5
9	1	4	2	4	3	5	6	5	7
10	2	5	3	1	4	7	6	7	5
Сума рангів по факторах $\sum_{j=1}^n a_{ji}$	31	36	25	26	43	47	59	64	65
Умовний ранг факторів по сумі рангів a_i	3	4	1	2	5	6	7	8	9

Враховуючи, що деякі експерти не змогли розділити ступінь впливу певних факторів і поставили однакові ранги, виконується перетворення

рангів. З цією метою кожен однаковий ранг j -го фахівця замінюється перетвореним, що обчислюється за співвідношенням (2.9) [70]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{k_1} (k_2 + i)}{k_1}, \quad (2.9)$$

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.

Інші ранги замінюються порядковим номером фактора у ранжированому ряді. Так як в матриці є пов'язані ранги (однаковий ранговий номер) в оцінках 2-го експерта, зробимо їх переформування (табл. 2.3)

Таблиця 2.3 – Переформування пов'язаних рангів

Фактори, включені в опитування	X ₃	X ₁	X ₂	X ₄	X ₆	X ₉	X ₈	X ₅	X ₇
Значення рангів фахівця, отримані при	1	2	3	4	4	5	6	7	7
Порядковий номер, займаний факторами в ранжированому ряді	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перетворені ранги	1	2	3	4,5	4,5	6	7	8,5	8,5

У таблиці 3 є дві групи однакових рангів. Для першої групи перетворений ранг $b = 4,5$. Для другої групи $b = 8,5$.

Аналогічно виконуються перетворення рангів інших фахівців, вони наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Перетворені ранги

Фахівець, який бере участь в опитуванні	Зв'язані ранги факторів, що включені в опитування									Сума рангі в по фахів цях $\sum_{i=1}^k b_{ji}$	Чисель ність однако вих рангів η_i	T_j
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9			
1	4,0	3,0	2,0	1,0	5,0	6,0	8,0	7,0	9,0	45	-	-
2	2,0	3,0	1,0	4,5	8,5	4,5	8,5	7,0	6,0	45	2; 2	12
3	4,0	6,0	2,0	3,0	1,0	5,0	7,0	8,0	9,0	45	-	-
4	1,0	4,5	3,0	2,0	8,5	4,5	7,0	6,0	8,5	45	2; 2	12
5	5,5	1,0	2,0	3,0	7,5	4,0	7,5	9,0	5,5	45	2; 2	12
6	3,5	2,0	5,5	7,5	5,5	1,0	3,5	7,5	9,0	45	2; 2; 2	18
7	4,0	2,0	3,0	1,0	5,0	6,5	6,5	8,5	8,5	45	2; 2	12
8	6,0	8,0	3,0	2,0	1,0	6,0	4,0	9,0	6,0	45	3	24
9	1,0	4,5	2,0	4,5	3,0	6,5	8,0	6,5	9,0	45	2; 2	12
10	2,0	5,5	3,0	1,0	4,0	8,5	7,0	8,5	5,5	45	2; 2	12
Сума рангів по факторах $\sum_{i=1}^n b_{ji}$	33,0	39,5	26,5	29,5	49,0	52,5	67,0	77,0	76,0	$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n b_{ji} = 450$	—	$\sum_{j=1}^n T_j = 114$
Умовний ранг по сумі рангів β_i	3	4	1	2	5	6	7	9	8	—	—	—
Відхилення суми рангів від середнього Δ_i	-17,0	-10,5	-23,5	-20,5	-1,0	2,5	17,0	27,0	26,0	$\sum_{j=1}^n \Delta_i = 0$	—	—
Квадрати відхилень Δ_i^2	289,0	110,3	552,3	420,3	1,0	6,3	289,0	729,0	676,0	$\sum_{j=1}^n \Delta_i^2 = 3073$	—	—

Перевірка правильності складання матриці на основі обчислення контрольної суми визначається за формулою (2.10) [70]:

$$\sum_{i=1}^k b_{ji} = \frac{(1+k) \cdot k}{2} = 45, \quad (2.10)$$

де k – кількість досліджуваних факторів.

Суми рангів по фахівцях і контрольна сума рівні між собою, значить, матриця складена правильно.

Наступним етапом є аналіз значимості досліджуваних факторів. Табл. 3 показує, що найбільш значимими факторами є X_3 та X_4 , найменш значимим – X_8 .

Для оцінки узагальненої міри узгодженості думок по всім факторам необхідно розрахувати коефіцієнт конкордації (2.11) [70]:

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^n \Delta_j^2}{(n^2 \cdot (k^3 - k) - n \cdot \sum_{j=1}^n T_j)}, \quad (2.11)$$

де

$$T_i = \sum_{\eta_r=1}^{l_j} (\eta_r^3 - \eta_r), \quad (2.12)$$

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 0,52, що вказує на наявність середнього ступеня узгодженості думок експертів.

З метою оцінки вагомості коефіцієнта конкордації розраховується критерій узгодження Пірсона (2.13) [70]:

$$X^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta_j^2}{\frac{1}{12} \cdot (n \cdot k \cdot (k+1)) - \frac{1}{k-1} \cdot \sum T_i} = n \cdot (k-1) \cdot W = 41,63. \quad (2.13)$$

Критерій узгодження Пірсона, розрахований для даної матриці, становить 41,63 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 $W=0,52$ – величина не випадкова, а

тому отримані результати мають сенс і можуть використовуватися в подальших дослідженнях.

Для розрахунку показників вагомості кожного фактору необхідно матрицю, отриману за результатами опитування (табл. 2.2), відобразити через матрицю перетворених рангів (табл. 2.5), використовуючи формулу (2.14):

$$S_{ij} = X_{\max} - X_j, \quad (2.14)$$

де $X_{\max} = 9$.

Таблиця 2.5 – Матриця перетворених рангів

Фахівець, який бере участь в опитуванні	Ранги факторів, що включені в опитування								
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
1	5	6	7	8	4	3	1	2	0
2	7	6	8	5	2	5	2	3	4
3	5	3	7	6	8	4	2	1	0
4	8	5	6	7	2	5	3	4	2
5	4	8	7	6	3	5	3	2	4
6	6	7	5	4	5	8	6	4	3
7	5	7	6	8	4	3	3	2	2
8	4	3	6	7	8	4	5	2	4
9	8	5	7	5	6	4	3	4	2
10	7	4	6	8	5	2	3	2	4
Сума рангів	59	54	65	64	47	43	31	26	25
Сума рангів всього	$\Sigma=414$								
Вага фактору	0,143	0,130	0,157	0,155	0,114	0,104	0,075	0,063	0,060

На основі даних таблиці 5 будується діаграма вагомості факторів (рисунок 2.10).

Отже, найбільш значимими є фактори X_3 та X_4 , тобто температура перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки, у подальших дослідженнях відповідно X_1 і X_2 .

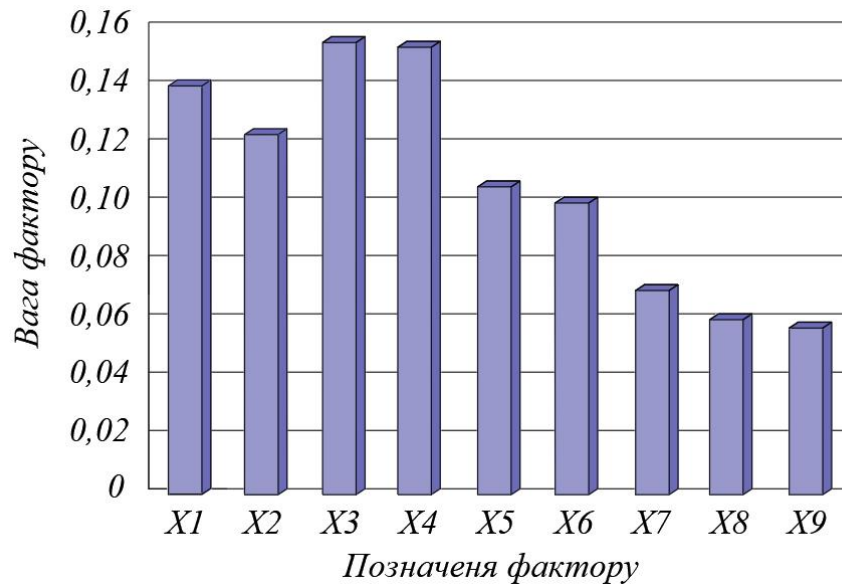


Рисунок 2.10 – Діаграма вагомості факторів

Висновки до розділу 2

Узагальнені теоретичні передумови визначення найбільш вагомих параметрів, які впливають на фізико-механічні характеристики РГА. На підставі експертної оцінки, з використанням факторного аналізу, встановлено, що такими параметрами є температура перемішування суміші та вміст регенеруючої добавки.

Адаптовано (удосконалено) рішення Фур'є щодо визначення температурного поля і режиму коливання температури для гармонічної умови на поверхні однорідного півпросору до умов розігрівання дорожнього покриття періодичними проходами асфальторозігрівача. На підставі удосконаленого рішення можна визначати температуру покриття в будь-який момент часу його розігрівання на будь якій глибині. На практиці це дасть змогу контролювати процес розігрівання покриття та не допустити його перегріву на поверхні.

Результати досліджень другого розділу викладено у наступних публікаціях [81, 82].

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ

3.1 Визначення області раціональних технологічних параметрів найбільш вагомих факторів

3.1.1 Матеріали та методи експериментальних досліджень

В якості матеріалів для дослідження було обрано РГС, яка за зерновим складом та вмістом бітуму відповідала суміші гарячій, дрібнозернистій, асфальтобетон щільний, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки П відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 [80]. Вміст залишкового бітуму розпушеної асфальтобетонної крихти становив 6,0 %.

В якості регенеруючої добавки використовували «омолоджуючу» добавку ReActiveACF, виготовлену на основі силану, в поєднанні з рослинними та парафіновими маслами, застосування якої дозволяє забезпечити пластифікацію старого бітумі.

Дослідження проводилися в лабораторії Державного підприємства «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (ДП «ДерждорНДІ») на обладнанні: шафа температурна типу «MATEST»; прес гідравлічний «MATEST»; установка вакуумна «УВ-12»; ваги лабораторні 4-го класу точності.

Методи дослідження були визначені згідно з [83].

Для проведення випробування були виготовлені зразки з РГА при різних температурах приготування та з різною кількістю добавки. Температура приготування визначалася та підтримувалася температурною шафою типу «MATEST».

Випробування проведені за показниками водонасичення та границя міцності на стиск за температури 0 °C та 50 °C.

Для приготування суміші використано змішувач B026N PAVEMIX – Asphalt laboratory mixer. Фрезерований асфальтобетон подрібнено на окремі зерна. Суміш перевірено на наявність частинок сторонніх матеріалів та видалено їх. Нагріту суміш подавали в змішувальну камеру, слідкуючи за тим щоб не було температурної сегрегації.



Рисунок 3.1 – Лабораторний змішувач для приготування асфальтобетонних сумішей

Визначання водонасичення полягає у вимірюванні кількості води, яку поглинає зразок при заданому режимі насичення. Цей параметр визначали на зразках, які були попередньо приготовлені в лабораторних умовах з суміші за ДСТУ Б В.2.7-319:2016, п.7. Засоби контролю і допоміжне обладнання: ваги лабораторні 4-го класу точності згідно з ДСТУ EN 45501 з пристосуванням для гідростатичного зважування; установка вакуумна, що забезпечує досягнення та підтримання тиску 2000 Па (15 мм рт.ст.); термометр; посудина; вода. За результат водонасичення приймали середнє значення з трьох дослідів.

Міцність на стиск визначали шляхом встановлення граничного напруження, що призводить до руйнування зразка при заданих умовах випробування. Визначання границі міцності при стиску проводили на попередньо приготовлених зразках одного віку, що мають циліндричну форму згідно з ДСТУ Б В.2-7-319:2016. При кожній заданій температурі випробовували по три зразка. Зразки для випробувань застосовували одного віку. За результат приймали середнє значення трьох випробувань.

3.1.2 Побудова математичних моделей

Для побудови математичних моделей використано метод експериментально-статистичного моделювання [70, 84-94].

Для проведення дослідження були прийняті (отримані у другому розділі) два найбільш вагомні фактори (температура перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки) на трьох цілочисельних рівнях -1, 0, +1. Кількість експериментів, які повинні проводитись, можливо розрахувати за формулою [70]:

$$N_e = m^n, \quad (3.1)$$

де m – кількість рівнів;

n – кількість факторів.

За формулою (3.1) визначено кількість експериментів, що потрібні для вирішення завдань оптимізації – 9. На основі апріорної інформації були вибрані інтервали варіювання факторів та проведено їх кодування (табл. 3.1).

В якості параметрів оптимізації (функції відгуку) прийняті міцнісні показники асфальтобетону, які характеризують його роботу в найбільш критичних умовах – міцність на стиск при 0 °C та при 50 °C, а також

фізичний показник – водонасичення. Граничні значення функції відгуку прийняті для дрібнозернистого щільного асфальтобетону, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки ІІ відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Значення факторів варіювання

Ч.ч.	Код фактору	Фізичний зміст фактору	Одиниця виміру	Інтервал варіювання	Значення фактору		
					Рівні		
					-1	0	+1
1	X1	Температура приготування, Т	°С	20	100	120	140
2	X2	Вміст регенеруючої добавки, C_d	%	0,05	0,20	0,25	0,30

Таблиця 3.2 – Значення параметрів оптимізації (функції відгуку)

Ч.ч.	Код фактору	Фізичний зміст фактору	Одиниця виміру	Граничні значення функції відгуку
1	Y1	Водонасичення, W, не більше	%	3,5
2	Y2	Границя міцності на стиск при 0 °С, R_{cm}^0 , не більше	МПа	13,0
3	Y3	Границя міцності на стиск при 50 °С, R_{cm}^{50} , не менше	МПа	1,1

Важливим етапом планування експерименту є вибір математичної моделі. З урахуванням аналізу апріорної інформації на першому етапі дослідження була вибрана неповна квадратична модель [70]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (3.2)$$

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 входних 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 (табл. 3.3).

Перевірка відтворюваності експериментів (дослідів) проводилася за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_1^N S_u^2} \leq S_2^T(f_1, f_2). \quad (3.3)$$

Необхідне (табличне) значення критерію Кохрена при $f_1 = 2$; $f_2 = 9$; $[G_{0,05}^T] = 0,4775$. Дисперсія відтворюваності S_u^2 , що характеризує помилку результатів експериментів (дослідів) на u -тому поєднанні чинників, розраховували за формулою:

$$S_u^2 = \frac{\sum (y_g - \bar{y}_u)^2}{n - 1}. \quad (3.4)$$

Експерименти (досліди) відтворювані, тому що необхідне значення критерію Кохрена перевищує фактичне.

Таблиця 3.3 – Матриця планування, результати дослідів

Номер досліду	Порядок проведення дослідів	Значення факторів варіювання				Значення функції відгуку												
		Кодовані		Натуральні														
		X1, %	X2, %	X1, %	X2, %	Y1 ₁ , %	Y1 ₂ , %	Y1 ₃ , %	Ȳ1, %	Y1 ₁ , МПа	Y1 ₂ , МПа	Y1 ₃ , МПа	Ȳ2, МПа	Y1 ₁ , МПа	Y1 ₂ , МПа	Y1 ₃ , МПа	Ȳ3, МПа	
1	8	-1	-1	100	0,2	5,28	5,4	5,33	5,34	11,8	11,7	11,68	11,72	1,6	1,65	1,7	1,65	
2	9	-1	0	100	0,25	4,9	4,8	4,75	4,82	11,2	11,3	11,28	11,26	1,4	1,49	1,6	1,49	
3	7	-1	1	100	0,3	4,38	4,5	4,46	4,45	10,3	10,35	10,7	10,5	1,1	1,2	1,35	1,22	
4	5	0	-1	120	0,2	4,05	4,23	4,20	4,17	10,8	11	11,16	10,99	1,65	1,46	1,58	1,56	
5	3	0	0	120	0,25	3,75	3,97	3,85	3,86	10,8	10,2	10,62	10,54	1,2	1,33	1,3	1,28	
6	2	0	1	120	0,3	3,3	3,38	3,39	3,36	9,3	9,12	9,5	9,31	1,25	1,2	1,07	1,17	
7	1	1	-1	140	0,2	3,2	3,22	3,29	3,25	12,05	12,02	11,8	11,96	1,37	1,55	1,48	1,47	
8	4	1	0	140	0,25	2,6	2,68	2,80	2,69	11,5	11,77	11,7	11,66	1,2	1,35	1,31	1,29	
9	6	1	1	140	0,3	2,75	2,7	2,58	2,68	11,3	11,1	11,1	11,17	1,1	1,15	1,3	1,18	

Коефіцієнти b_0 , b_i , b_{ij} визначили за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \overline{y_u}}{N}, \quad (3.5)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \overline{y_u}}{N}, \quad (3.6)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \overline{y_u}}{N}, \quad (3.7)$$

де N – число точок плану, $N = 9$;

$\overline{y_u}$ – середнє значення вихідного параметра. в точці u ;

значення i -го фактору в рядку матриці в u -тому досліді;

x_{ju} – значення j -го фактору в рядку матриці в u -тому досліді.

У результаті розрахунків отримали наступні коефіцієнти регресії:

$$b_0 = 3,85; \quad b_1 = -0,67; \quad b_2 = -0,25; \quad b_{12} = 0,04.$$

Математична модель залежності показника водонасичення РГА від впливу температури приготування та вмісту регенеруючої добавки в першому наближенні мала вигляд:

$$Y_1 = 3,85 - 0,67X_1 - 0,25X_2 + 0,04X_{12}. \quad (3.8)$$

Коефіцієнти регресії вважаються значущими, якщо розрахункове значення t – критерію Стюдента t_p виявиться більше табличного t_T , встановленого залежно від заданого рівня значущості числа ступенів свободи

(в даному випадку $t_T = 2,31$ для рівня значущості 0,05 і довірчої вірогідності 0,95).

$$t_p \{b_0\} = \frac{|b_0|}{S_F^2} \geq t_T, \quad (3.9)$$

де S_F^2 – середньоквадратичне відхилення вихідного параметра, $S_F=0,0576$.

У результаті розрахунків встановлено, що значущими є такі коефіцієнти b_0 , b_1 і b_2 . Відкидаючи незначущі коефіцієнти рівняння регресії, отримали наступну математичну модель:

$$Y_1 = 3,85 - 0,67 X_1 - 0,25 X_2. \quad (3.10)$$

Для оцінки адекватності отриманого рівняння регресії скористаємося F -критерієм Фішера. Рівняння вважається адекватним, якщо розрахункове значення F_p менше табличного значення F_T , яке знаходиться в залежності від довірчої ймовірності і числа ступенів свободи. Розрахункове значення критерію Фішера визначили за формулами:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_F^2} \text{ при } S_{ad}^2 > S_F^2; \quad F_p = \frac{S_F^2}{S_{ad}^2} \text{ при } S_F^2 > S_{ad}^2. \quad (3.11)$$

Дисперсія адекватності S_{ad}^2 визначали за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_u - \overline{y_u})^2}{N - m}, \quad (3.12)$$

де $\overline{y_u}$ – середнє значення вихідного параметру;

N - число дослідів, $N = 9$;

m —число значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

В результаті обчислень отримано $S_{ad}^2 = 0,1376$.

Для розглянутого завдання прийнята довірна ймовірність $p = 0,95$,
($F_p = 2,3891$) $<$ ($F_T = 2,66$) – математична модель адекватна.

При розрахунку неповного квадратичного рівняння (за формулою 1) для визначення залежності границі міцності на стиск при 0°C та 50°C отримали неадекватні математичні моделі, тому за основу взято квадратичні моделі.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_i b_{ii} x_i^2, \quad (3.13)$$

Коефіцієнти b_0 , b_i , b_{ij} і b_{ii} визначали за формулами

$$b_0 = a_1 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u - a_2 \sum_1^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{y}_u, \quad (3.14)$$

$$b_i = a_3 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{y}_u, \quad (3.15)$$

$$b_{ij} = a_4 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u, \quad (3.16)$$

$$b_{ii} = a_5 \sum_u x_{iu}^2 \bar{y}_u + a_6 \sum_i x_{iu}^2 \bar{y}_u - a_7 \sum_{u=1}^N \bar{y}_u. \quad (3.17)$$

де $a_1, a_2 \dots a_7$ – табличні значення коефіцієнтів.

У результаті розрахунків коефіцієнтів регресії та з урахуванням їх значимості отримали наступну математичну модель залежності границі міцності на стиску при 0°C:

$$Y_2 = 9,64 + 1,18X_1^2 + 0,76X_2^2, \quad (3.18)$$

Адекватність отриманої моделі оцінено за допомогою критерію Фішера за формулою:

$$F_p = \frac{S_{LF}^2}{S_{\{y\}}^2} \leq F_{\alpha}^T(f_{LF}, f_y), \quad (3.19)$$

де S_{LF}^2 – дисперсія за рахунок неадекватності моделі, розраховано за формулою:

$$S_{LF}^2 = \frac{SS_{LF}}{f_{LF}}, \quad (3.20)$$

де SS_{LF} – сума квадратів відхилень, пов'язана з адекватністю моделі, f_{LF} - число ступенів свободи, $f_{LF} = N - n - 1 = 6$,

$$SS_{LF} = \theta \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_u), \quad (3.21)$$

де θ – кількість дубльованих дослідів, $\theta = 3$;

y_u – розраховане значення цільової функції.

Дисперсію експерименту $S_{\{y\}}^2$ визначено за формулою:

$$S_{\{y\}}^2 = \sum_{u=1}^N \sum_{q=1}^{\theta} \frac{(y_{uq} - \bar{y}_u)^2}{N \cdot (\theta - 1)} = \frac{SS_y}{f_y}, \quad (3.22)$$

SS_y – сума квадратів відхилень, пов’язана з похибкою дослідів, f_y – число ступенів свободи, $f_y = N(\theta - 1) = 18$.

У результаті обчислень критерій Фішера становить $(F_p = 0,48827) < (F_{\alpha}^T = 2,66)$ – математична модель адекватна.

Аналогічно визначено математичну модель залежності границі міцності на стиск при 50°C.

$$Y_3 = 1,05 - 0,05X_1 - 0,14X_2 + 0,12X_1^2 + 0,11X_2^2. \quad (3.23)$$

Розрахункове значення коефіцієнту Фішера зазначеної моделі менше табличного $(F_p = 1,9424) < (F_{\alpha}^T = 2,66)$, що свідчить про її адекватність.

3.1.3 Визначення області раціональних технологічних параметрів

На основі експериментальних досліджень побудовані тривимірні графіки (рис. 2) зміни вихідних параметрів, які необхідно оптимізувати. На кожному з графіків чітко виділяються області, що обмежені граничними значеннями і на відповідних графіках достатньо легко можна встановити межі цих областей.

На рис. 3.2 представлені граничні значення для вихідних параметрів: a – Y_1 3,5 %; b – Y_2 13 МПа; c – Y_3 1,1 МПа. У відповідності із граничними значеннями вихідних параметрів можна прийти до висновку, що Y_2 та Y_3 повністю задовольняють всі досліджувані області, а Y_1 тільки в межах 3,5 %.

Реалізацію процедури визначення раціонального температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки при гарячому ресайклінгу асфальтобетонного покриття методом «*in place*» зображено на рис. 3.3. З цією метою були вибрані значення бажаності для кожної функції відгуку. При виборі враховували їх граничні значення, що наведені в табл. 6.

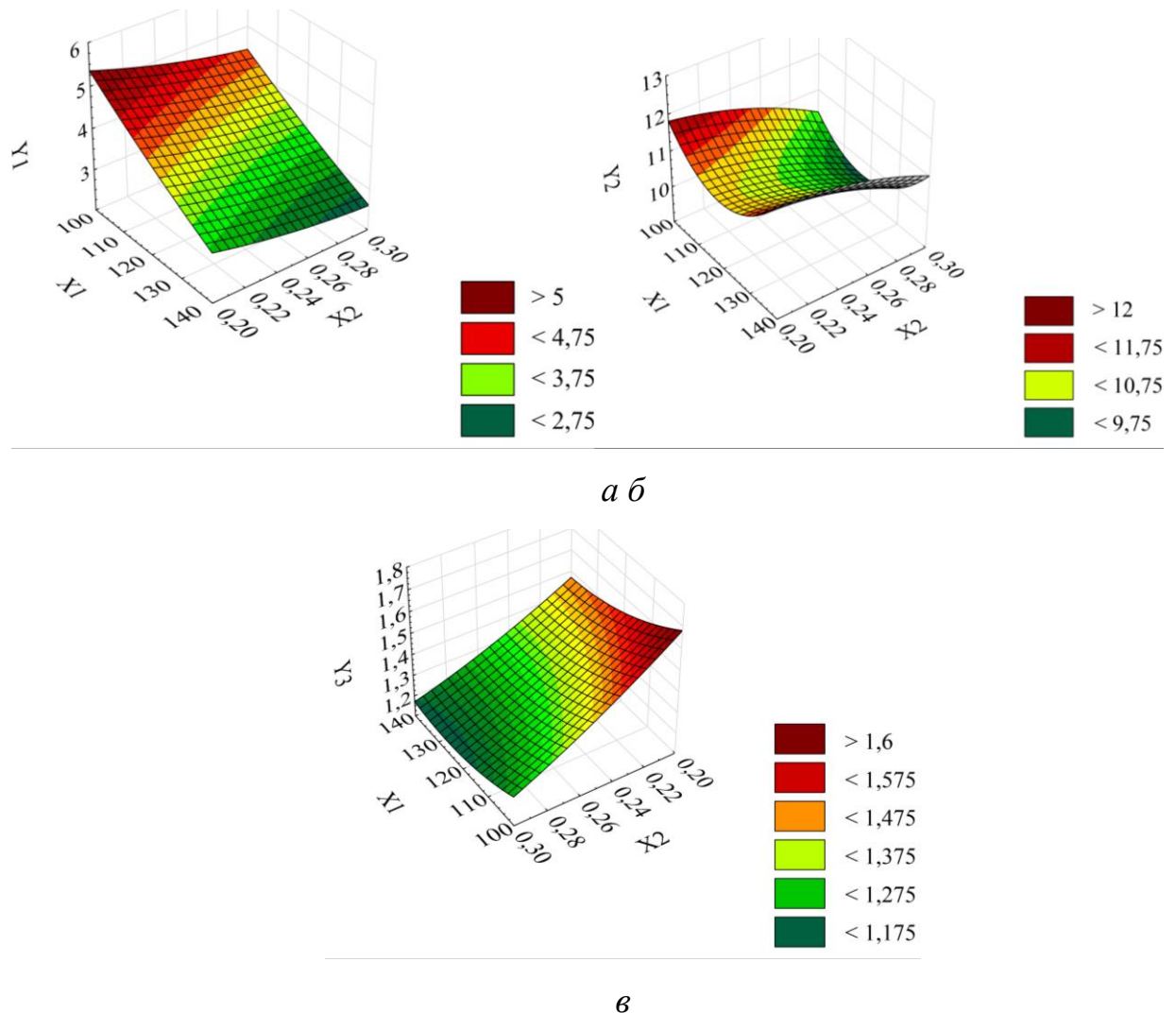


Рисунок 3.2 – Тривимірні графічні залежності: *а* – залежність Y_1 від X_1 та X_2 ; *б* – залежність Y_2 від X_1 та X_2 ; *в* – залежність Y_3 від X_1 та X_2

На рис. 3 представлені графіки зміни водонасичення, міцності на стиск при 0 °C та при 50 °C в залежності від зміни вихідних параметрів. Додавання

окремих графіків дають можливість визначити раціональні області вихідних параметрів.

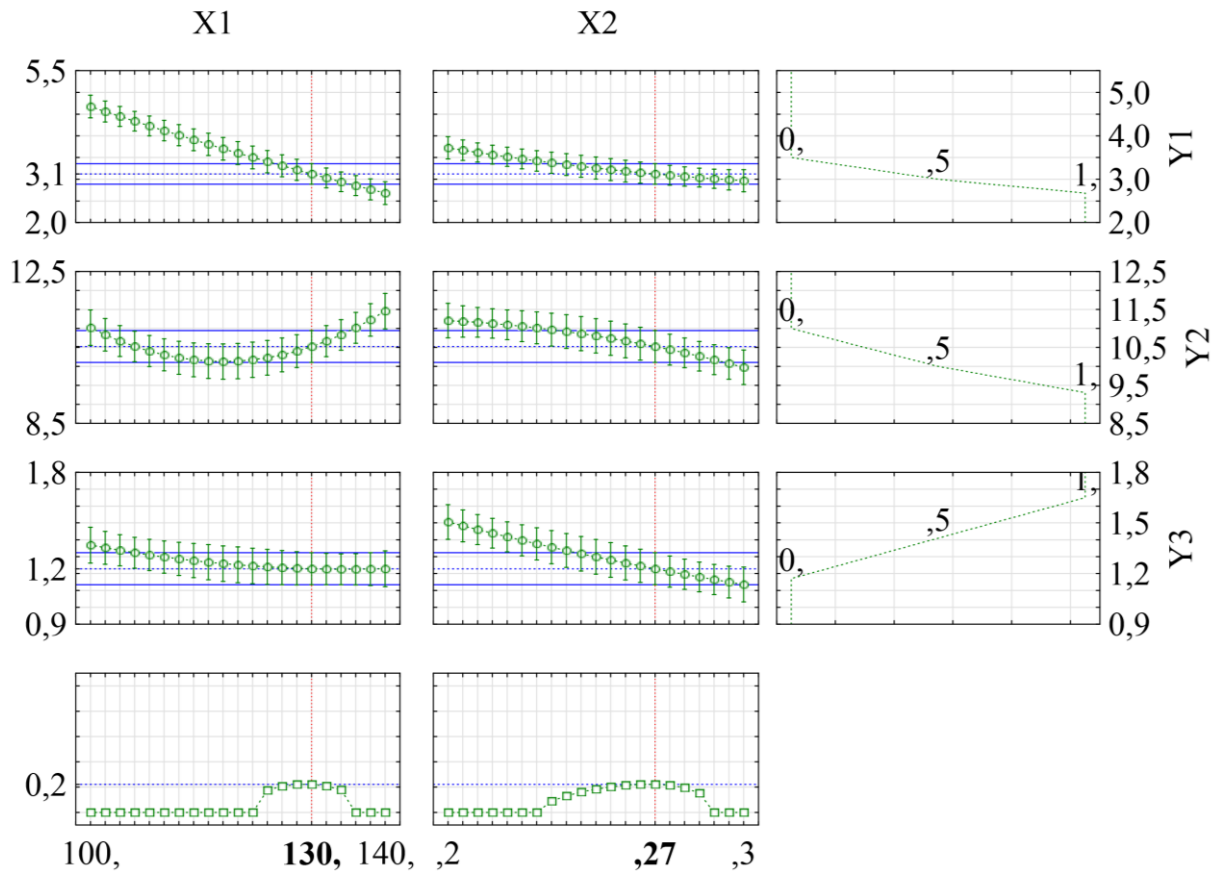


Рисунок 3.3 – Графіки знаходження раціонального співвідношення температурного режиму приготування суміші та вмісту регенеруючої добавки

Враховуючи граничні значення параметрів оптимізації, встановлені раціональні області досліджуваних параметрів:

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

Зазначені області справедливі для регенерації дрібнозернистого щільного асфальтобетону, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки ІІ відповідно до ДСТУ Б В.2.7-119:2011 з вмістом бітуму 6 %. З метою

встановлення раціонального співвідношення регенеруючої добавки при регенерації дрібнозернистого щільного асфальтобетону, типу А, непереривчастої гранулометрії, марки ІІ в залежності від вмісту бітуму проведені аналогічні дослідження. Для зменшення кількості експериментів температура приготування суміші прийнята 130 °С. Зроблено припущення, що раціональна область температури приготування суміші не залежить від залишкового вмісту бітуму. Визначення кількості оптимального введення добавки буде проводитися при варіюванні вмісту бітуму. Для цього підбираються суміші з залишковим вмістом бітуму 5 %, 7 %. Температура приготування суміші становить 130 °С. Добавку змінюють від 0,2 % до 0,3 %, з кроком введення 0,05 %. Результати експериментальних досліджень зміни показника водонасичення в залежності від зміни вмісту бітуму та добавки наведені в таблиці 3.4 та на рисунку 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати визначення показника водонасичення

Ч.ч.	Вміст добавки, %	Вміст бітуму, %	Водонасичення, %
1	0,20	5	5,76
2	0,20	6	3,70
3	0,20	7	2,50
4	0,25	5	5,32
5	0,25	6	3,25
6	0,25	7	2,00
7	0,30	5	5,17
8	0,30	6	3,00
9	0,30	7	1,80

За даними випробувань отримуємо значення, з яких побудовані графічні залежності:

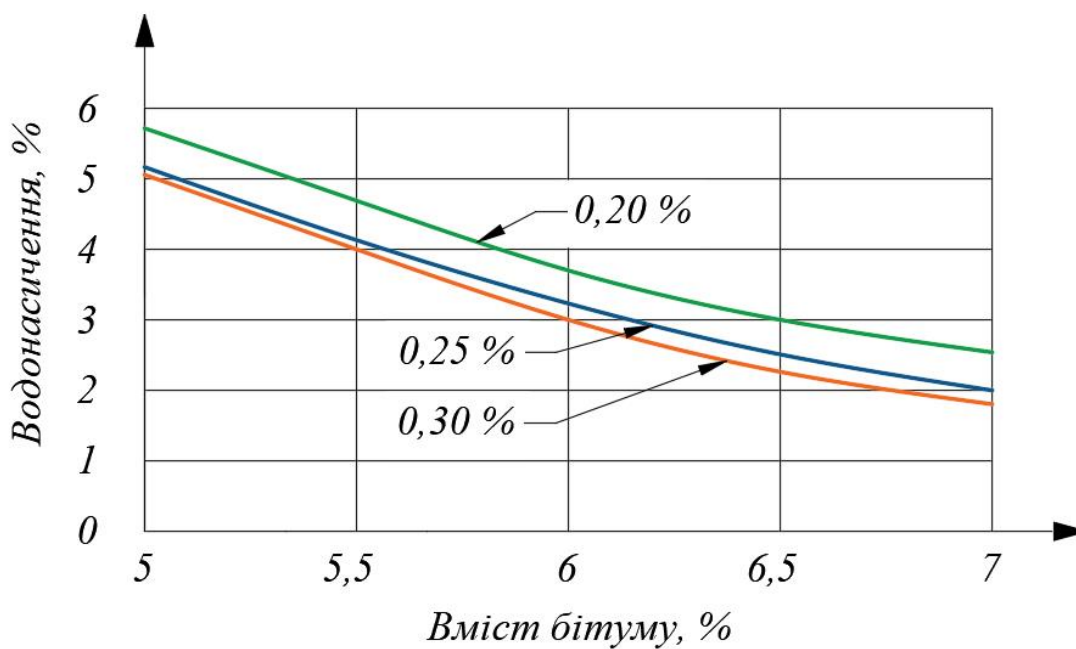


Рисунок 3.4 – Залежність водонасичення від вмісту бітуму та добавки

Результати визначення границі міцності на стиск за температури 0 °C та 50 °C наведені в таблицях 3.5, 3.6 та на рисунках 3.5, 3.6.

Таблиця 3.5 – Результати визначення границі міцності на стиск за температури 0 °C

Ч. ч.	Вміст добавки, %	Вміст бітуму, %	Міцність на стиск за температури 0 °C, МПа
1	0,20	5	9,68
2	0,20	6	11,40
3	0,20	7	10,66
4	0,25	5	9,28
5	0,25	6	11,00
6	0,25	7	9,73
7	0,30	5	8,53
8	0,30	6	10,00
9	0,30	7	9,13

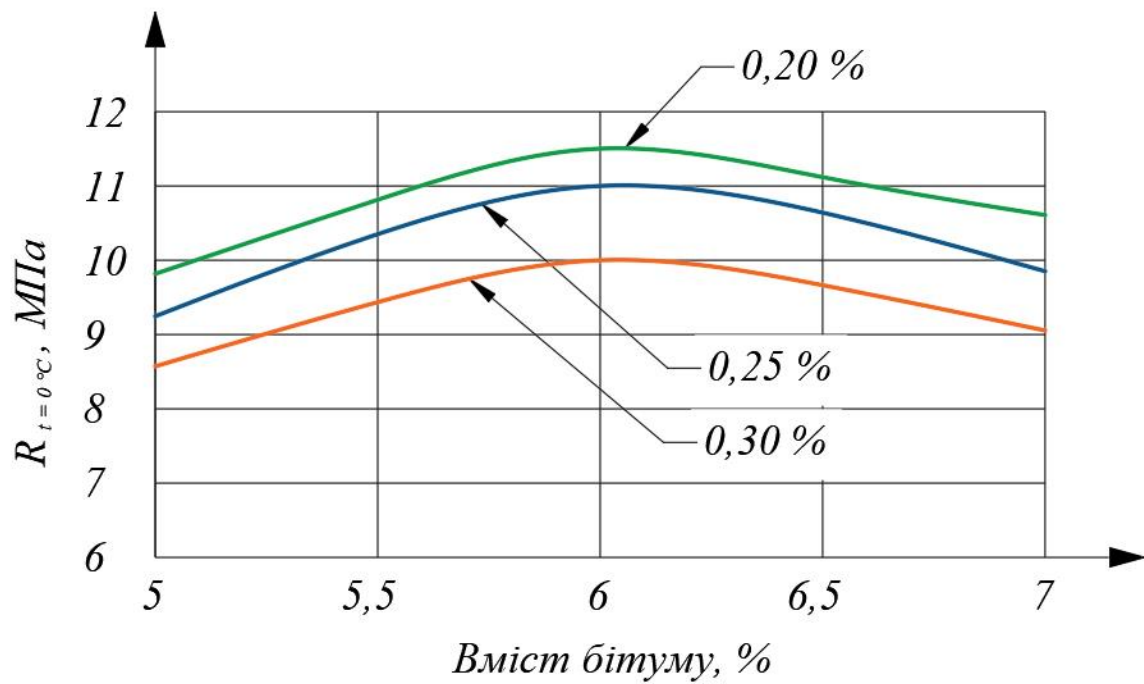


Рисунок 3.5 – Залежність міцності на стиск за температури 0 °С від вмісту бітуму та добавки

Таблиця 3.6 – Результати визначення границі міцності на стиск за температури 50 °С

Ч.ч.	Вміст добавки, %	Вміст бітуму, %	Міцність на стиск за температури 50 °С, МПа
1	0,20	5	1,50
2	0,20	6	1,52
3	0,20	7	1,40
4	0,25	5	1,20
5	0,25	6	1,28
6	0,25	7	1,18
7	0,30	5	1,10
8	0,30	6	1,18
9	0,30	7	1,07

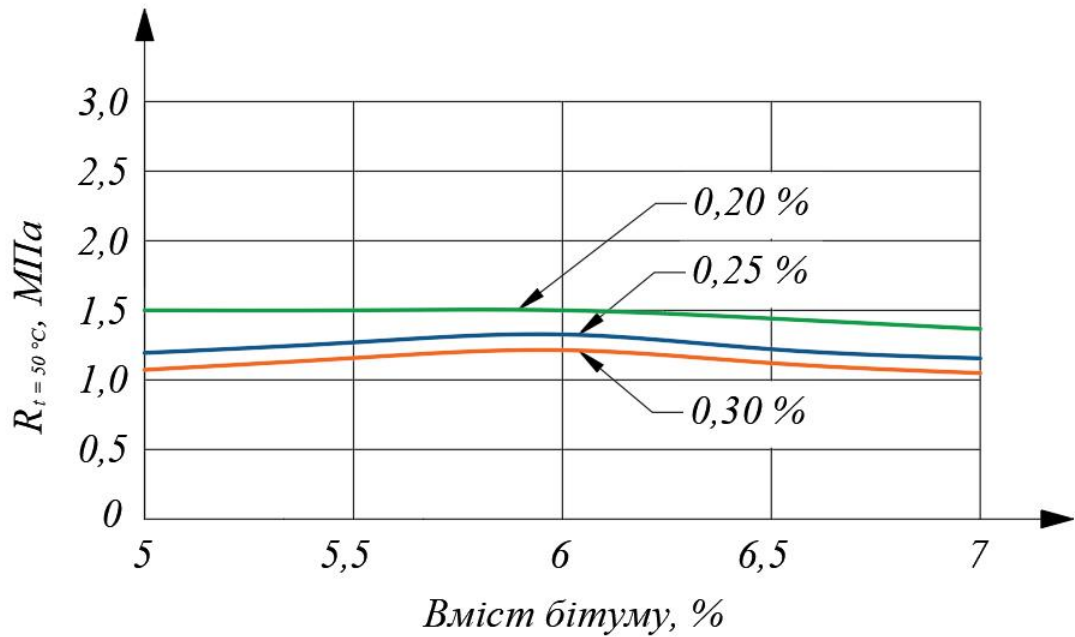


Рисунок 3.6 – Залежність міцності R_{50} від вмісту бітуму та добавки

На основі отриманих залежностей встановлено, що раціональний діапазон вмісту бітуму, за якого будуть забезпечені основні фізико-механічні показники РГА, 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) %.

3.2 Натурні дослідження зміни температури розігрівання покриття в залежності від швидкості руху термічної установки

При виконанні роботи використовували наступні методи досліджень:

- вибіркові спостереження за процесом виконанням робіт;
- контрольні вимірювання основних фізичних величин;
- аналіз вихідних даних;
- метод експертних оцінок.

На практиці дорожнє покриття розігрівається нерівномірно на глибині. Температура нагрівання на поверхні не повинна перевищувати 180 °С, щоб не допустити випалювання бітуму. При цьому, необхідно забезпечити мінімальну температуру розігрівання на рівні основи регенованого шару, що дасть змогу розрихлювати суміш без руйнування щебеню. Орієнтовно значення мінімальної температури в такому випадку становить 75–90 °С.

Основні фактори, які впливають на процес розігрівання асфальтобетонного покриття:

- 1) температура повітря;
- 2) час і інтенсивність нагрівання;
- 3) висота розміщення нагрівальної панелі над покриттям;
- 4) вологість покриття;
- 5) швидкість вітру;
- 6) тип покриття.

Найбільш вагомими з перелічених є перші три фактори.

З метою встановлення залежності температури розігрівання покриття на різній глибині від часу розігрівання проведені натурні дослідження безпосередньо під час виконання робіт з гарячої регенерації асфальтобетону методом «*Reshape*». Роботи виконувались за температури навколишнього середовища 25–30 °С та безвітряній погоді. РГС, що використовувалась при проведенні досліджень, за зерновим складом та вмістом бітуму відповідала суміші, прийнятій в параграфі 3.1.1. При проведенні досліджень вимірювання проводили при різній швидкості руху (1,8 м/хв та 2,1 м/хв) термічної установки для розігріву асфальтобетонного покриття *Wirtgen HM 4500* (країна виробник – Німеччина).

Результати досліджень наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати експериментальних досліджень за температури навколишнього середовища 25–30 °С

Показник	Значення							
Швидкість руху 1,8 м/хв								
Час розігрівання, хв	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура розігрівання на поверхні, °С	82	110	127	142	149	167	170	185
Температура розігрівання на глибині 3 см, °С	45	49	51	57	87	107	130	135
Температура розігрівання на глибині 5 см, °С	45	47	49	51	55	68	77	85
Швидкість руху 2,1 м/хв								
Час розігрівання, хв	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура розігрівання на поверхні, °С	75	100	120	135	142	160	150	—
Температура розігрівання на глибині 3 см, °С	45	48	51	54	80	98	108	—
Температура розігрівання на глибині 5 см, °С	45	47	48	50	54	66	75	—

На основі отриманих даних вимірювань побудовані графічні залежності температури асфальтобетону від тривалості розігрівання інфрачервоним опромінюванням, які наведені на рис. 3.7, рис. 3.8 та встановлені наступні 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):

за температури 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):

$$y_1 = 63,21 + 23,74x - 1,12x^2, \quad (3.24)$$

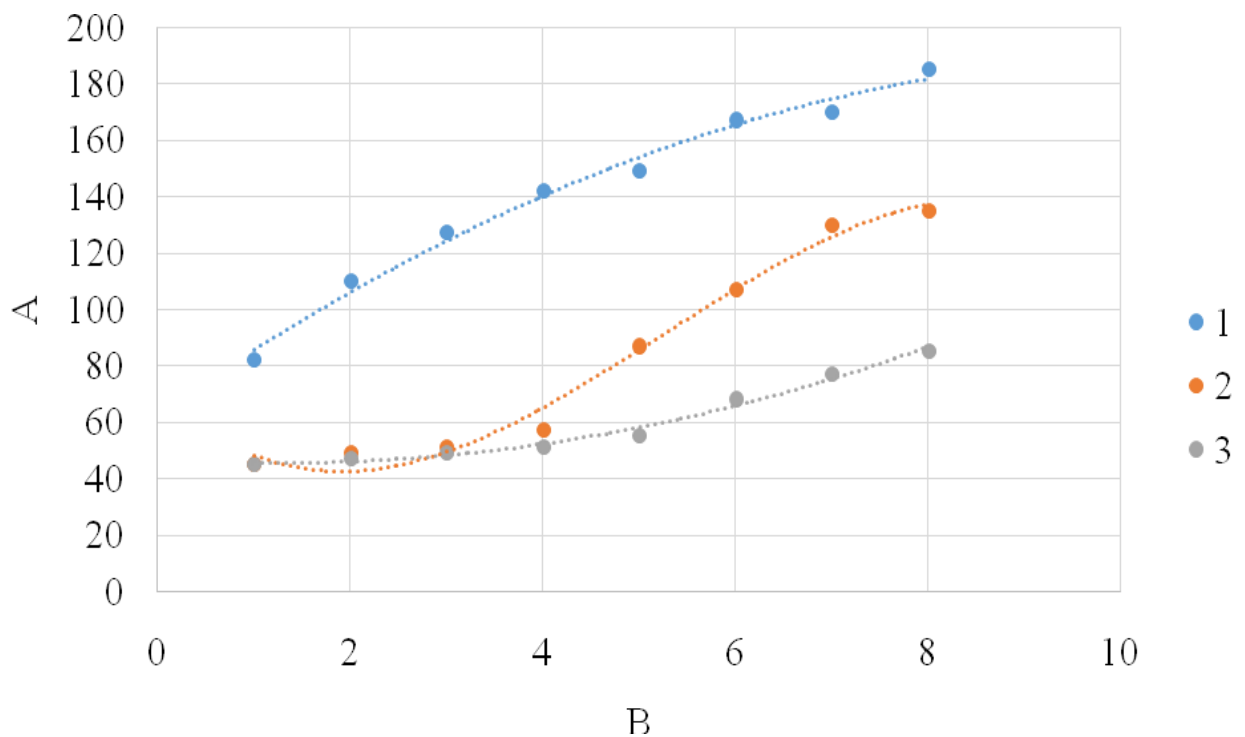
$$y_2 = 70,57 - 31,87x + 10,22x^2 - 0,65x^3, \quad (3.25)$$

$$y_3 = 46,98 - 2,35x + 0,91x^2, \quad (3.26)$$

$$y_4 = 44,86 + 32,25x - 2,39x^2, \quad (3.27)$$

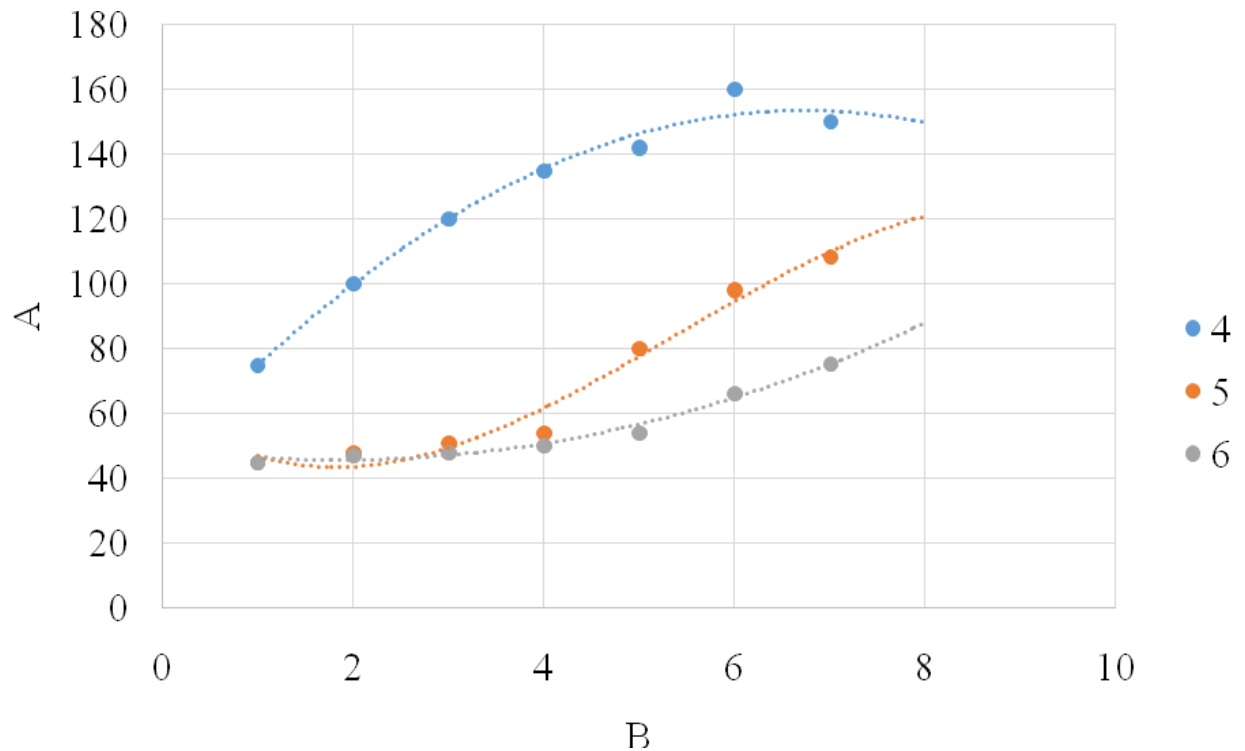
$$y_5 = 62 - 21,72x + 7,19x^2 - 0,44x^3, \quad (3.28)$$

$$y_6 = 49,29 - 4,17x + 1,12x^2. \quad (3.29)$$



1 – залежність температури розігрівання на поверхні;
 2 – залежність температури розігрівання на глибині 3 см; 3 – залежність температури розігрівання на глибині 5 см

Рисунок 3.7 – Графік залежності температури розігрівання асфальтобетону від тривалості розігрівання (температура навколишнього середовища 20–30 °C), при швидкості руху термічної установки 1,8 м/хв;
 А – температура розігрівання; В – час розігрівання



4 – залежність температури розігрівання на поверхні;
 5 – залежність температури розігрівання на глибині 3 см; 6 – залежність температури розігрівання на глибині 5 см

Рисунок 3.8 – Графік залежності температури розігрівання асфальтобетону від тривалості розігрівання (температура навколишнього середовища 20–30 °C), при швидкості руху термічної установки 2,1 м/хв;
 А – температура розігрівання; В – час розігрівання

Аналогічним чином проведені натурні дослідження зміни температури розігрівання покриття за температури навколишнього середовища 10 °C.

Результати досліджень наведені в табл. 3.8.

На основі отриманих даних вимірювань побудовані графічні залежності температури асфальтобетону від тривалості розігрівання інфрачервоним опромінюванням, які наведені на рис. 3.9, рис. 3.10 та встановлені наступні математичні моделі:

Таблиця 3.8 – Результати експериментальних досліджень за температури навколишнього середовища 10 °С

Показник	Значення							
Швидкість руху 1,8 м/хв								
Час розігрівання, хв	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура розігрівання на поверхні, °С	75	89	108	126	133	143	160	169
Температура розігрівання на глибині 3 см, °С	35	38	42	51	63	86	100	119
Температура розігрівання на глибині 5 см, °С	35	37	40	43	53	57	60	71
Швидкість руху 2,1 м/хв								
Час розігрівання, хв	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура розігрівання на поверхні, °С	70	79	90	112	127	135	141	—
Температура розігрівання на глибині 3 см, °С	35	38	40	49	54	72	83	—
Температура розігрівання на глибині 5 см, °С	35	36	37	41	43	45	56	—

за температури 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):

$$y_1 = 56,98 + 18,27x - 0,54x^2, \quad (3.30)$$

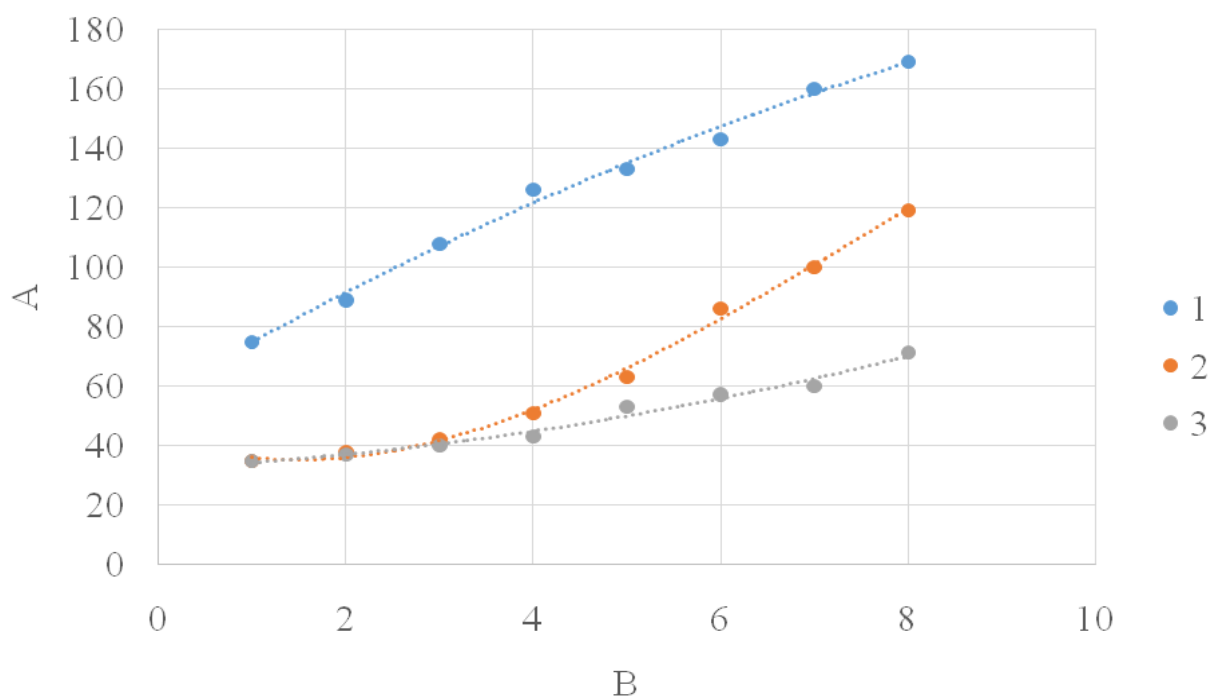
$$y_2 = 42,57 - 10,21x + 3,81x^2 - 0,17x^3, \quad (3.31)$$

$$y_3 = 32,64 + 1,45x + 0,40x^2, \quad (3.32)$$

$$y_4 = 49,71 + 17,12x - 0,52x^2, \quad (3.33)$$

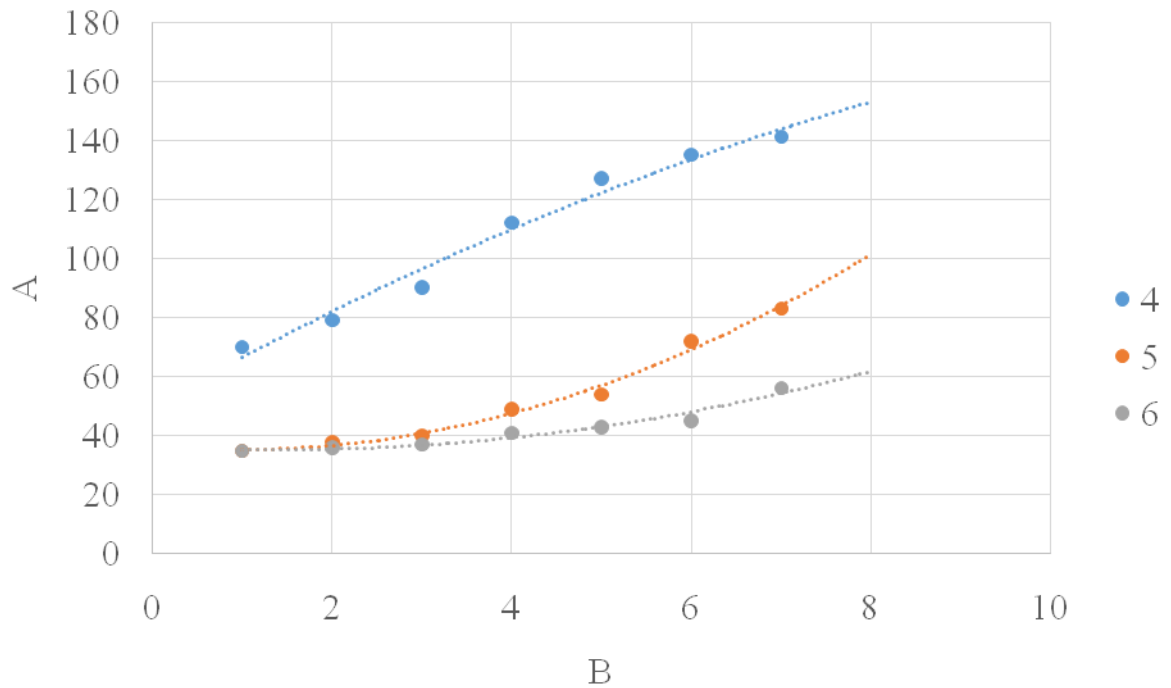
$$y_5 = 36,71 - 2,60x + 1,33x^2, \quad (3.34)$$

$$y_6 = 36,71 - 1,75x + 0,61x^2. \quad (3.35)$$



1 – залежність температури розігрівання на поверхні; 2 – залежність температури розігрівання на глибині 3 см; 3 – залежність температури розігрівання на глибині 5 см

Рисунок 3.9 – Графік залежності температури розігрівання асфальтобетону від тривалості розігрівання (температура навколишнього середовища 10 °C), при швидкості руху термічної установки 1,8 м/хв;



4 – залежність температури розігрівання на поверхні; 5 – залежність температури розігрівання на глибині 3 см; 6 – залежність температури розігрівання на глибині 5 см

Рисунок 3.10 – Графік залежності температури розігрівання асфальтобетону від тривалості розігрівання (температура навколишнього середовища 10 °C), при швидкості руху термічної установки 2,1 м/хв;
А – температура розігрівання; В – час розігрівання

У ході роботи проведені натурні дослідження зміни температури розігрівання покриття в залежності від швидкості руху термічної установки для розігріву асфальтобетонного покриття та часу розігрівання. Також дослідженнями врахована зміна температури навколишнього середовища. Отримані графічні залежності та математичні моделі дають змогу контролювати потрібний час розігрівання покриття в залежності від необхідної температури перемішування суміші. Це дасть змогу не допустити перегріву покриття.

3.3 Встановлення раціональної тривалості перемішування регенованої гарячої асфальтобетонної суміші

У своїх дослідженнях Л. Б. Гезенцевей показав, що ретельне перемішування мінеральних матеріалів є основною операцією в технологічному процесі, що забезпечує рівномірний розподіл бітуму як в обсязі суміші, так і на поверхні мінеральних компонентів.

Суміш повинна бути перемішана до гомогенності. Якщо було виявлено занадто велику кількість в'язучого, вміст бітуму, що додається в суміші, повинен бути знижений. Враховуючи, що при приготуванні РГС використовується розрихлений асфальтобетон, який вже містить залишковий бітум, орієнтування при її приготуванні на час перемішування як для нової асфальтобетонної суміші не є коректним. Тому були проведені експериментальні дослідження з метою встановлення раціонального часу перемішування РГС.

Матеріали і методи досліджень аналогічні прийнятим в параграфі 3.1.1.

У процесі експериментальних досліджень температура перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки прийняті з урахуванням раціональних діапазонів, що наведені в параграфі 3.1.1. Зразки були випробувані на за показниками водонасичення та границя міцності на стиск за температури 0 °С та 50 °С. Отримані графічні залежності, які показують вплив тривалості перемішування на фізико-механічні властивості асфальтобетону (рис. 3.11 – 3.13).

Зі збільшенням часу перемішування з 1 хв до 3 хв безперервно покращуються всі фізико-механічні властивості асфальтобетону. Найбільш різкі зміни відбуваються в перші хв, далі зміни менш інтенсивні. Після чого відбувається агрегація частинок, що призводить до зменшення однорідності суміші.

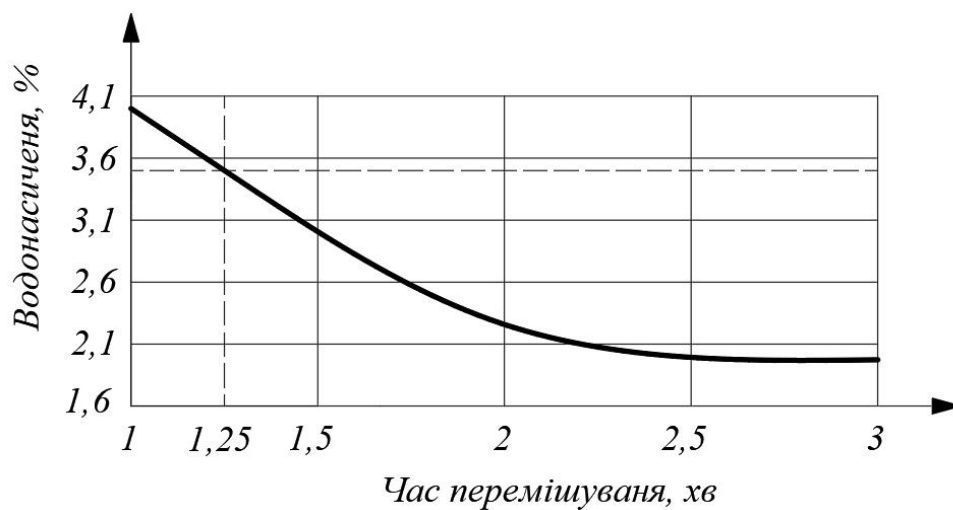


Рисунок 3.11 – Вплив часу перемішування на водонасичення

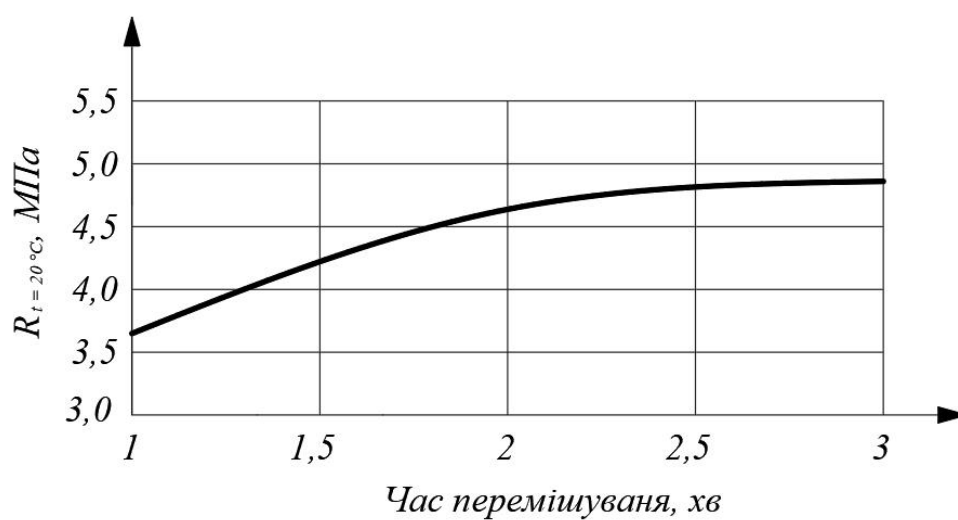


Рисунок 3.12 – Вплив часу перемішування на межу міцності R_{20}

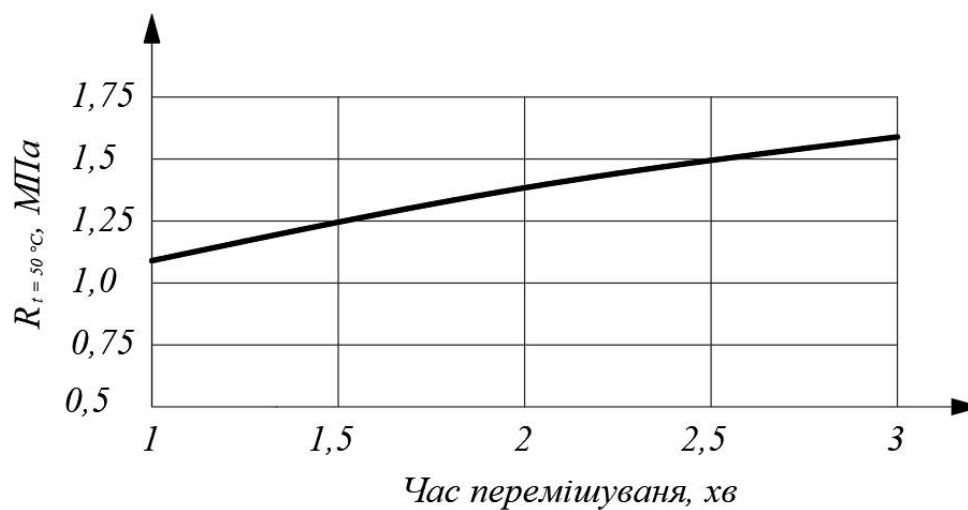


Рисунок 3.13 – Вплив часу перемішування на межу міцності R_{50}

Отримані залежності дали змогу встановити мінімальний діапазон часу перемішування регенованої асфальтобетонної суміші, який складає – (1,25 – 1,30) хв.

3.4 Випробування на колієстійкість

Випробування РГА для визначення показників його колієстійкості виконано згідно з вимогами AASHTO T 324 [95] з використанням положень [96-102].

Матеріали для проведення досліджень аналогічні прийнятим в параграфі 3.1.1.

Дослідження проводилися на лабораторному обладнанні ТОВ «Автомагістраль-Південь».

У процесі експериментальних досліджень температура перемішування суміші при приготуванні та вміст регенеруючої добавки прийняті з урахуванням раціональних діапазонів, що наведені в параграфі 3.1.1.

Для приготування суміші використано змішувач B026N PAVEMIX - Asphalt laboratory mixer.

Після проведення перемішування одразу виконується ущільнення на гіраторному ущільнювачі для уникнення втрати температури. При цьому температура суміші повинна відповідати температурі ущільнення ± 5 °C. Для досягнення високоякісного ущільнення використано гіраторний ущільнювач B041 ENGyrotronic - Superpave Gyrotory Compactor (рис. 3.14).

Для проведення одного вимірювання підготовлені два циліндричних зразки (рис. 3.15). З метою оцінки властивостей РГА одного складу проведено два вимірювання.



Рисунок 3.14 – Гіраторний ущільнювач B041 ENGyrotronic - Supergrave
Gyratory Compactor



Рисунок 3.15 – Загальний вигляд підготовлених зразків

Проведення випробування колієстійкості

Методика проведення випробувань

Для проведення випробувань необхідно наступне обладнання:

Установка для випробувань прокатування колеса за гамбурзьким методом – установка з електричним приводом, що дозволяє виробляти прокатування сталевого колеса діаметром 203,2 мм і шириною 47 мм по зразку, який випробують. Навантаження на колесі становить $705 \pm 4,5$ Н. Колесо має здійснювати зворотно-поступальний руху за зразком, розташування колеса в часі змінюється по синусоїдальній траєкторії, колесо має здійснювати за зразком 52 ± 2 проходи на хвилину, максимальна швидкість руху колеса повинна становити 0,305 м/с і припадати на середню точку зразка. установка для випробувань прокатування колеса за гамбурзьким методом наведена на рисунку 3.16.



Рисунок 3.16 – Установка для випробувань прокатування колеса за гамбурзьким методом

Система регулювання температури – водяна баня з регулюванням температури з точністю $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від 25 до 70°C . Баня повинна бути оснащена системою циркуляції для стабілізації температури в ємності з зразком.

Система вимірювання вдавнення - електронний датчик, що дозволяє вимірювати глибину вдавнення колеса з точністю не менше $0,15\text{ мм}$ в діапазоні вимірювань від 0 до 20 мм . Система повинна бути змонтована таким чином, щоб дозволяти проводити вимірювання глибини вдавнення з різною частотою по ширині проходу колеса по тестовому зразку. Вдавнювання має вимірюватися не рідше, ніж через кожні 400 проходів колеса. Дана система повинна дозволяти вимірювати глибину колії без зупинки колеса. Дані вимірювання повинні співвідноситися з кількістю проходів колеса.

Лічильник проходів колеса - безконтактний датчик, що забезпечує облік кожного проходу колеса за зразком. Сигнал з лічильника повинен бути пов'язаний з системою вимірювання вдавнення, так щоб глибина колії виражалася як функція кількості проходів колеса.

Система встановлення плитного зразка - піддон з нержавіючої сталі, жорстко фіксується в тестовій машині. Система повинна обмежувати зрушення зразка в ході випробувань в межах до $0,5\text{ мм}$. Зразок повинен бути встановлений в системі так, щоб забезпечувати рідини в водяній бані вільну циркуляцію з усіх його сторін. Зразок встановлюється таким чином, щоб шар води, що циркулює з усіх боків зразка, становив не менше 20 мм .

Система установки циліндричного зразка - монтажний піддон з нержавіючої сталі, жорстко фіксується в випробувальній установці. Система повинна обмежувати зрушення зразка в ході випробувань в межах до $0,5\text{ мм}$. Система повинна включати в себе дві форми з поліетилену високої щільності або іншого схожого за характеристиками матеріалу, поміщених в піддон з нержавіючої сталі для утримування зразка. Піддон з нержавіючої сталі

повинен бути встановлений так, щоб забезпечувати рідини в водяній бані вільну циркуляцію з усіх його сторін. При цьому шар води, що циркулює з усіх боків зразка повинен складати не менше 20 мм.

Зразки, які виготовлені на гіраторному ущільнювачі, термостатуються протягом 5-ти годин за температури 50 °С. Підготовані до випробування зразки піддаються дії циклічного навантаження, яке передається на зразок за допомогою колеса. Кількість циклів зворотно-поступальних рухів колеса складає 10000 циклів (або 20000 навантажень кожної точки по траєкторії випробувального колеса).

Результати випробувань

Під час випробування асфальтобетону, для визначення показників його колієстійкості, були випробувані 2 склади асфальтобетонної суміші по 2 проби (зразки) даного матеріалу, виготовлені за вказаною методикою. В якості вихідного матеріалу для приготування РГС використаний асфальтобетон зі строком служби 10 та 20 років. Графічні зображення зміни глибини колії залежно від кількості проходів випробувального колеса наведені на рисунках 3.17 та 3.18.

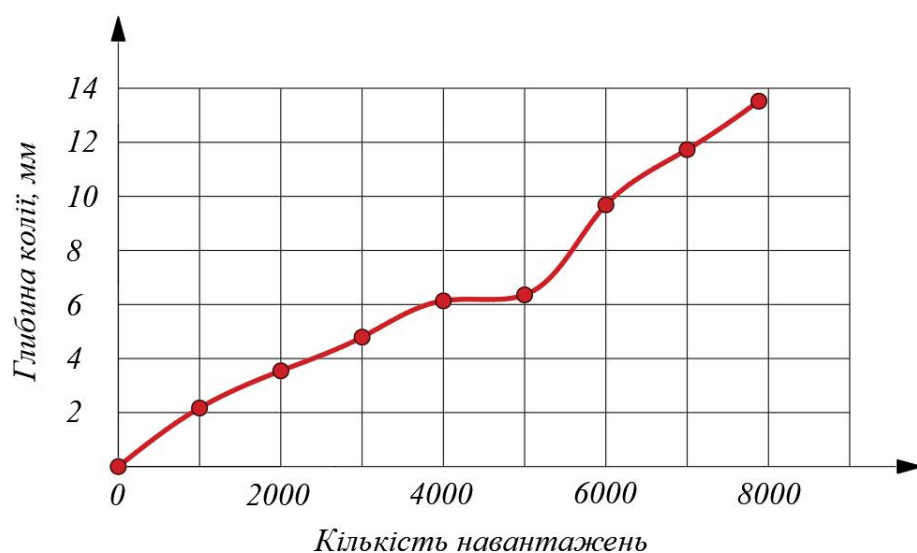


Рисунок 3.17 – Зміна глибини колії, залежно від кількості проходів колеса зразків, виготовлених з асфальтобетону зі строком служби 20 років

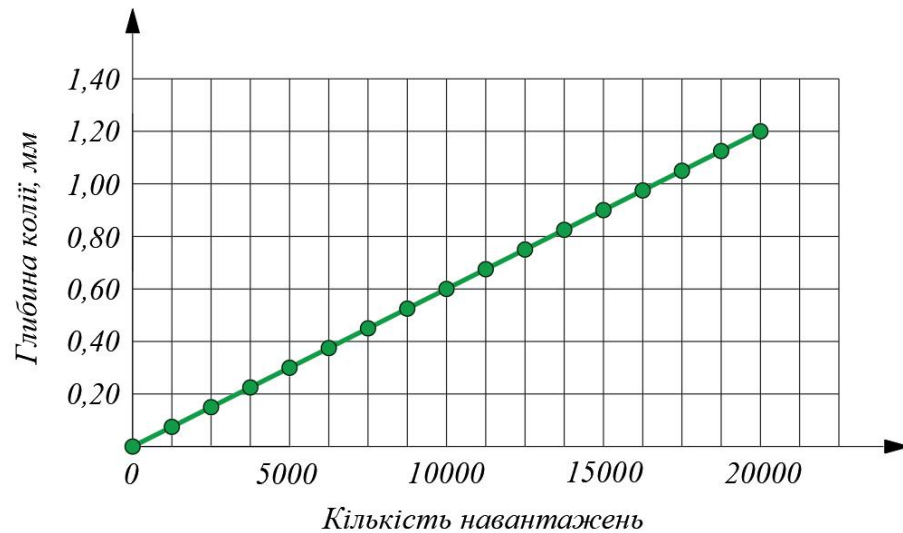


Рисунок 3.18 – Зміна глибини колії, залежно від кількості проходів колеса зразків, виготовлених з асфальтобетону зі строком служби 10 років

З результатів випробувань (рис. 3.17) слідує, що глибина колії після 1000 навантажень рівна 2,4 мм; після 2000 навантажень – 3,8 мм; після 5000 навантажень – 6,2 мм; після 7000 навантажень – 11,6 мм. За результатами випробування можна зробити висновок, що матеріал працює в пружному стані до 5000 навантажень.

З результатів випробувань (рис. 3.18) слідує, що глибина колії після 1000 навантажень рівна 0,06 мм; після 2000 навантажень – 0,12 мм; після 5000 навантажень – 0,3 мм; після 20000 навантажень – 1,2 мм. За результатами випробування можна зробити висновок, що матеріал працює в пружному стані понад 20000 навантажень.

Загальний вигляд зразків після випробування на колієстійкість наведено на рисунках 3.19 та 3.20.

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.



Рисунок 3.19 – Загальний вигляд зразків, виготовлених із асфальтобетону зі строком служби 20 років після випробування на колієстійкість



Рисунок 3.20 – Загальний вигляд зразків, виготовлених із асфальтобетону зі строком служби 10 років після випробування на колієстійкість

3.5 Розрахунок гранулометричного складу регенованих асфальтобетонних сумішей

Підбір складу РГА складається з підбору складу мінеральної частини, підбору складу бітуму – за необхідності, а також підбору складу за вмістом в'язучого відповідно до стандартних вимог.

Підбір складу мінеральної частини РГА складається з етапів:

- визначення втрат матеріалу в асфальтобетонному покритті – за необхідності;
- визначення складу старого асфальтобетону;
- розрахунок та підбір гранулометричного складу суміші нових мінеральних матеріалів для коригування складу старого асфальтобетону;
- перевіряння підібраного гранулометричного складу РГС на відповідність вимогам нормативним до матеріалів необхідного типу, виду та групи³.

Особливості підбору складу мінеральної частини РГА у технологіях гарячої регенерації на дорозі полягають у застосуванні асфальтобетону існуючого покриття виключно у нефракціонованому вигляді. Також при виконанні робіт з ресайклінгу асфальтобетону на дорозі розрахункова кількість нових мінеральних матеріалів, яка забезпечує відповідність гранулометричного складу РГС нормативним вимогам для асфальтобетону необхідного типу, виду та групи, не завжди забезпечує дотримання проектної товщини шару.

Відповідно до прийнятих проектних рішень можливі два варіанти розрахунків: з обмеженням та без обмеження максимальної товщини шару.

Розрахунок з обмеженнями максимальної товщини шару.

Для визначення втрат матеріалу в асфальтобетонному покритті використовують результати оцінювання стану покриття з застосуванням руйнівних методів (відбирання кернів, розкриття дорожнього одягу з визначенням товщини асфальтобетонного шару) або неруйнівних методів (підповерхневе георадарне зондування). Результати визначення втрат матеріалу в покритті рекомендується наводити за формою таблиці 3.9.

³У наведених прикладах розрахунків вміст нових мінеральних матеріалів визначається у відсотках від маси мінеральної частини РГС.

Таблиця 3.9 – Дані щодо втрат матеріалів у покритті

Показник, одиниця вимірювання	Значення показника
Проектна товщина шару асфальтобетонного покриття, H , см	5,0
Фактична товщина шару асфальтобетонного покриття, H_{ϕ} , см	4,5
Фактична густина асфальтобетону покриття, визначена за результатами випробувань зразків-кернів, ρ , кг/дм ³	2,353
Проектна витрата асфальтобетонної суміші, B , кг/м ²	120,0
Фактичний вміст матеріалу в покритті, B_{ϕ} , кг/м ² ($B_{\phi} = \rho \cdot H_{\phi} \cdot 10$)	106,0
Витрата нових матеріалів для регенерації асфальтобетонного шару, B_n , кг/м ² ($B_n = B - B_{\phi}$)	17,5
Відносний вміст нових матеріалів у РГС, $B_{нв}$, % за масою ($B_{нв} = \frac{B_n \cdot 100}{B}$)	14,6
Відносний вміст старого асфальтобетону в РГС, $B_{фв}$, % за масою ($B_{фв} = 100 - B_{нв}$)	85,4

Вихідні дані для розрахунків наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Зерновий склад нових мінеральних матеріалів

Найменування матеріалу	Зерновий склад у відсотках за масою, за частковим залишком на ситі з розміром вічок, мм													
	0	0,071	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	15	20	25	40	70
Щебінь фракції (10-20) мм	-	-	-	-	-	-	-	0,5	40,0	51,0	8,0	0,5	-	-
Щебінь фракції (5 -10) мм	-	-	-	-	-	6,5	3,5	80,0	10,0	-	-	-	-	-
Відсів дроблення гірських порід фракція (0-5) мм	9,0	8,2	14,9	15,1	12,3	16,9	17,6	5,5	0,5	-	-	-	-	-
Мінеральний порошок	81,6	10,6	5,6	1,0	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Мінеральна частина старого асфальтобетону	11,9	6,7	8,6	9,9	8,2	13,2	15,5	13,5	5,1	3,5	4,0	-	-	-

Розрахунок гранулометричного складу суміші нових мінеральних матеріалів для коригування гранулометричного складу РГС з обмеженням максимальної товщини шару РГА наведено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11– Розрахунок гранулометричного складу суміші нових мінеральних матеріалів для виготовлення регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії з обмеженням максимальної товщини шару

Розмір вічок сита, мм	Зерновий склад мінеральної частини старого асфальтобетону, % за масою		$\Phi_{pp}, \%;$ $\Phi_{pp} = \frac{\Phi_n \times B_{\phi\phi}}{100}$	$\Phi_{np}, \%$	Розрахунковий зерновий склад нових мінеральних матеріалів		
	Φ_{ϕ}	Φ_n			$\Delta\phi$ $\Delta\phi = \Phi_{np} - \Phi_{pp}$	$\Phi_{pn}, \%^{*}$ $\Phi_{pn} = \frac{\Delta\phi_i}{B_{нв}} \times 100$	Δ_n
0	11,9						
0,071	6,7	11,9	10,2	11,0	0,8	5,5	5,5
0,14	8,6	18,6	15,9	14,5	-1,4	9,6	9,6
0,315	9,9	27,2	23,2	20,5	-2,7	18,5	18,5
0,63	8,2	37,1	31,7	28,0	-3,7	25,3	25,3
1,25	13,2	45,3	38,7	36,5	-2,2	15,0	15,0
2,5	15,5	58,5	50,0	47,0	-3,0	20,5	20,5
5	13,5	74,0	63,2	60,0	-3,2	21,9	21,9
10	5,1	87,5	74,7	75,5	0,8	5,5	5,5
15	3,5	92,6	79,1	88,5	9,4	64,4	64,4
20	3,9	96,1	82,1	97,5	15,4	105,5	100,0
25	-	100,0	85,4	100,0	14,6	100,0	100,0
Примітка. Φ_n – фактичний склад мінеральної частини старого асфальтобетону за вмістом зерен, менших даного розміру; Φ_{np} – усереднений стандартний склад асфальтобетонної суміші за вмістом зерен, менших даного розміру; Φ_{pn} – розрахунковий склад суміші нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру; Φ_{pp} – розрахунковий вміст мінеральних зерен старого асфальтобетону, менших даного розміру, у мінеральній частині РГС.							

Якщо окремі значення Φ_{pn} суттєво перевищують 100 %, кількість нових мінеральних матеріалів є недостатньою для коригування складу асфальтобетону. У таких випадках, за погодженням з Замовником та з урахуванням результатів попередніх розрахунків, розглядають можливість підвищення вмісту нових мінеральних матеріалів за рахунок видалення частини старого асфальтобетонного покриття попереднім холодним фрезеруванням.

Приклад підбору складу суміші нових мінеральних матеріалів, розрахунковий склад якої наведено в таблиці 3.10, з перевіренням гранулометричного складу РГС на відповідність вимогам [80] наведено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Підбір складу суміші нових мінеральних матеріалів та регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії з перевіренням на відповідність вимогам [80], з обмеженням максимальної товщини шару

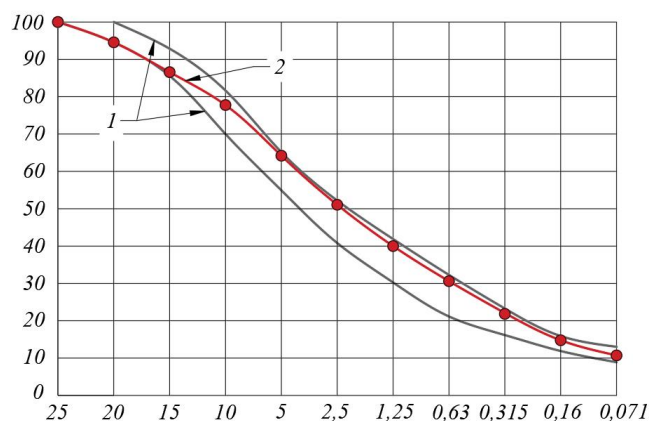
Підібраний склад нових мінеральних матеріалів за фракціями, % за масою		Підібраний зерновий склад суміші нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру (мм), % за масою												
		інше	0,071	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	15	20	25	40
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
фр. 10-20	80 %	-	-	-	-	-	-	-	0,5	32,1	40,9	6,5	-	-
фр. 5-10	10 %	-	-	-	-	-	0,7	0,3	8,0	1,0	-	-	-	-
фр. 0-5	5 %	0,5	0,4	0,7	0,8	0,6	0,8	0,9	0,3	-	-	-	-	-
МП	5 %	4,1	0,5	0,3	0,0	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Z_i		4,6	0,9	1,0	0,8	0,7	1,5	1,2	8,8	33,1	40,9	6,5	-	-
ΣZ_i			4,6	5,5	6,5	7,3	8,0	9,5	10,7	19,5	52,6	93,5	100	-
Перевірення підбраного складу РГС на відповідність вимогам [80]														
Δ_n			5,5	9,6	18,5	25,3	15	20,5	21,9	5,5	64,4	100	100	-
$\frac{\Sigma Z_i \cdot B_{не}}{100}$			0,7	0,8	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	2,8	7,7	13,7	14,6	-
Φ_{pp}			10,2	15,9	23,2	31,7	38,7	50,0	63,2	74,7	79,1	82,1	85,4	-
$\Phi_{РГС} = \frac{\Sigma Z_i \cdot B_{не}}{100} + \Phi_{pp}$			10,9	16,7	24,1	32,8	39,9	51,4	64,8	77,5	86,8	95,8	100	-
Φ_{np}			11,0	14,5	20,5	28,0	36,5	47,0	60,0	75,5	88,5	97,5	100	100
$\Delta_k = \Phi_{np} - \Phi_{РГС} $			0,1	2,2	3,6	4,8	3,4	4,4	4,8	2,0	1,7	1,7	0,0	-
Допустимі відхилення від нормованого вмісту зерен менших даного розміру			$\pm 3,0$	$\pm 3,5$	$\pm 4,5$	$\pm 5,0$	$\pm 5,5$	$\pm 6,0$	$\pm 5,0$	$\pm 6,5$	$\pm 4,5$	$\pm 2,5$	0	-

Кінець таблиці 3.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Відповідність вимогам [44.2]		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Примітка. $\Phi_{PГС}$ – підібраний склад PГС за вмістом зерен, менших даного розміру; Z_i – підібраний склад суміші нових мінеральних матеріалів за частковим залишком на ситі; ΣZ_i – підібраний склад суміші нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру; Δ_k – абсолютне значення фактичного відхилу вмісту зерен підбраного складу від нормованих значень.													

Згідно з таблицею 3.12 для коригування зернового складу мінеральної частини старого асфальтобетону з метою отримання регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії для компенсації втрат матеріалів у покритті необхідно ввести суміш нових мінеральних матеріалів складу: щебінь фракції (10-20) мм – 80 %, щебінь фракції (5-10) мм – 10 %, відсів подрібнення гірських порід фракції (0-5) мм – 5 %, мінеральний порошок – 5 %, при загальній кількості такої суміші 14,6 %.

Результати підбору зернового складу PГС у графічному вигляді наведено на рисунку 3.21.



1 – граничні криві гранулометричного складу згідно з [10], 2 – крива гранулометричного складу PГС

Рисунок 3.21 – Гранулометричний склад регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії, підібраний з обмеженням максимальної товщини шару

Розрахунок без обмеження максимальної товщини шару

У даному випадку розрахунок доцільно здійснювати для вмісту нових мінеральних матеріалів, наближеного до максимально можливого вмісту.

Приклад розрахунку гранулометричного складу суміші нових мінеральних матеріалів для коригування гранулометричного складу РГС при вмісті нових мінеральних матеріалів, наближеному до максимального, наведено в таблиці 3.13. Вихідні дані для розрахунку прийняті згідно з таблицею 3.9.

Таблиця 3.13 - Розрахунок гранулометричного складу суміші нових мінеральних матеріалів для регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії при вмісті нових мінеральних матеріалів, наближеному до максимального

Розмір вічок сита, мм	Зерновий склад мінеральної частини старого асфальтобетону, % за масою *)		$\Phi_{np}, \%$	$\Phi_{p_s}, \%$ $\Phi_{p_s} = \frac{\Phi_{np} \cdot 100}{\Phi_n}$	$\Phi_{p_p}, \%$ $\Phi_{p_p} = \frac{\Phi_n \cdot \Phi_{p_{s_{min}}}}{100}$	Розрахунковий зерновий склад нових мінеральних матеріалів		
	Φ_q	Φ_n				$\Delta\phi = \Phi_{np} - \Phi_{pp}$	$\Phi_{p_n}, \%$ $\Phi_{p_n} = \frac{\Delta\phi_i \cdot 100}{B_{не}}$	Δ_n
0	11,9							
0,071	6,7	11,9	11,0	92,4	9,0	2,0	8,1	8,1
0,14	8,6	18,6	14,5	78,0	14,0	0,5	2,0	2,0
0,315	9,9	27,2	20,5	75,4	20,5	0	0	0
0,63	8,2	37,1	28,0	75,5	28,0	0	0	0
1,25	13,2	45,3	36,5	80,6	34,2	2,3	9,4	9,4
2,5	15,5	58,5	47,0	80,3	44,1	2,9	11,8	11,8
5	13,5	74,0	60,0	81,1	55,8	4,2	17,1	17,1
10	5,1	87,5	75,5	86,3	66,0	9,5	38,6	38,6
15	3,5	92,6	88,5	95,6	69,8	18,7	76,01	76,0
20	3,9	96,1	97,5	100	72,5	25,0	100,0	100,0
25	-	100,0	100,0	100	75,4	24,6	100,0	100,0

Приклад підбору складу суміші нових мінеральних матеріалів, розрахунковий склад якої наведено в таблиці 3.13, з перевірянням

гранулометричного складу РГС з на відповідність вимогам [80] наведено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Підбір складу суміші нових мінеральних матеріалів та регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії з перевірянням на відповідність вимогам [80], з вмістом нових мінеральних матеріалів, наближеним до максимального

Підібраний склад нових мінеральних матеріалів за фракціями, % за масою		Підібраний зерновий склад нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру (мм), % за масою												
		інше	0,075	0,15	0,3	0,6	1,2	2,5	5	10	15	20	25	40
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		-	-	-	-	-	-	-	0,3	26,1	33,3	5,3	-	-
фр. 5-10	18	-	-	-	-	-	1,2	0,6	14,4	1,8	-	-	-	-
фр. 0-5	9	0,8	0,8	1,3	1,4	1,1	1,5	1,6	0,5	-	-	-	-	-
МП	8	6,5	0,8	0,4	0,1	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Z_i		7,3	1,6	1,7	1,5	1,3	2,7	2,2	15,2	27,9	33,3	5,3	0,0	-
ΣZ_i			7,3	8,9	10,6	12,1	13,4	16,1	18,3	33,5	61,4	94,7	100	
Перевіряння складу РГС на відповідність вимогам [80]														
Δ_n			8,1	2,0	0	0	9,4	11,8	17,1	38,6	76,0	100	100	-
$\frac{\Sigma Z_i \cdot B_{нв}}{100}$			1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	4,9	9,0	13,8	14,6	-
Φ_{pp}			9,0	14,0	20,5	28,0	34,2	44,1	55,8	66,0	69,8	72,5	75,4	-
$\Phi_{PGC} = \frac{\Sigma Z_i \cdot B_{нв}}{100} + \Phi_{pp}$			10,1	15,3	22,0	29,8	36,2	46,5	58,5	70,9	78,8	86,3	90,0	-
Φ_{np}			11,0	14,5	20,5	28,0	36,5	47,0	60,0	75,5	88,5	97,5	100	100
$\Delta_k = \Phi_{np} - \Phi_{PGC} $			0,9	0,8	1,5	1,8	0,3	0,5	1,5	4,6	9,7	11,2	10,0	-
Допустимі відхили від нормованого вмісту зерен менших даного розміру			$\pm 3,0$	$\pm 3,5$	$\pm 4,5$	$\pm 5,0$	$\pm 5,5$	$\pm 6,0$	$\pm 5,0$	$\pm 6,5$	$\pm 4,5$	$\pm 2,5$	0	-

Кінець таблиці 3.14

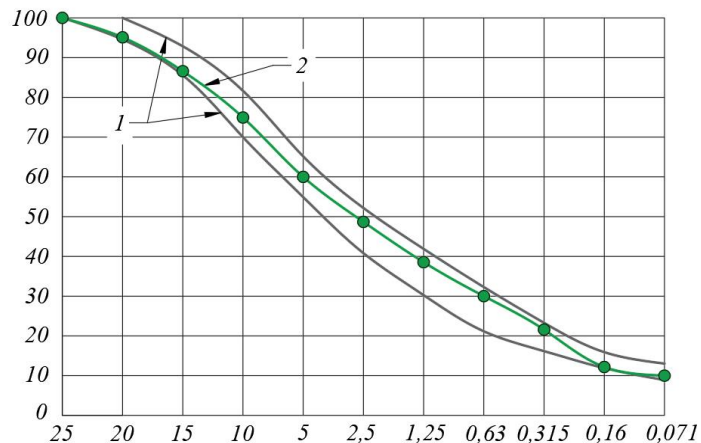
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Відповідність вимогам [44.2]		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Примітка. $\Phi_{РГС}$ – підібраний зерновий склад регенованої суміші за вмістом зерен, менших даного розміру; Z_i – підібраний зерновий склад нових мінеральних матеріалів за частковим залишком на ситі; ΣZ_i – підібраний зерновий склад нових мінеральних матеріалів за вмістом зерен, менших даного розміру; Δ_k – абсолютне значення фактичного відхилення вмісту зерен підбраного складу від нормованих значень.													

Згідно з таблицею 3.14 для коригування зернового складу мінеральної частини старого асфальтобетону з метою отримання регенованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії при вмісті нових мінеральних матеріалів, наближеному до максимального, необхідно ввести суміш нових мінеральних матеріалів складу: щебінь фракції (10-20) мм – 65 %, щебінь фракції (5-10) мм – 18 %, відсів подрібнення гірських порід фракції (0-5) мм – 9 %, мінеральний порошок – 8 % при загальній кількості такої суміші 24,6 %. Результати підбору зернового складу РГС у графічному вигляді наведено на рисунку 3.22.

У даному випадку для досягнення більш плавної форми кривої гранулометричного складу РГС вміст суміші нових мінеральних матеріалів може бути зменшено на декілька відсотків.

Особливості підбору складу мінеральної частини РГС у технологіях гарячої регенерації на дорозі полягають у застосуванні асфальтобетону існуючого покриття виключно у нефракціонованому вигляді. Також при виконанні робіт з ресайклінгу асфальтобетону на дорозі розрахункова кількість нових мінеральних матеріалів, яка забезпечує відповідність гранулометричного складу РГС вимогам [80] для 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 необхідно виконувати з урахуванням проектних вимог за однією з схем: з обмеженням або без обмеження максимальної товщини шару РГА.



1 – граничні криві гранулометричного складу згідно з [10], 2 – крива гранулометричного складу РГС

Рисунок 3.22 – Гранулометричний склад регеноерованої гарячої дрібнозернистої щільної асфальтобетонної суміші тип Б з непереривчастим різновидом гранулометрії за вмісту нових мінеральних матеріалів, наближеного до максимального

Якщо розрахункова кількість нових мінеральних матеріалів є недостатньою для досягнення проектної товщини шару, матеріальний баланс досягається додаванням нової асфальтобетонної суміші відповідного складу, або влаштуванням поверхневого шару нового асфальтобетону (накладного шару) методом «*Remix Plus*».

Для підвищення вмісту нових мінеральних матеріалів, при відповідних попередніх розрахунках за погодженням з Замовником може бути прийняте рішення щодо видалення частини шару старого асфальтобетонного покриття попереднім холодним фрезеруванням.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що основними факторами впливу на фізико-механічні показники РГА є технологічна температура перемішування РГС та вміст регенеруючої добавки.

2. Враховуючи граничні значення параметрів оптимізації, встановлено, що міцність на стиск при 0 °С та при 50 °С повністю задовольняють всі досліджувані області, а водонасичення тільки в області до 3,5 %. Збільшення технологічної температури перемішування призводить до зменшення показника водонасичення.

3. Визначено області раціональних значень прийнятих факторів варіювання, а саме температури перемішування (125 – 135) °С та вмісту добавки (0,26 – 0,28) % від маси регенованого матеріалу. При таких значеннях факторів показник водонасичення зразків РГА становить біля 3,1 %; міцність на стиск при 0 °С – близько 10,5 МПа; міцність на стиск при 50 °С – близько 1,2 МПа.

4. Раціональний діапазон вмісту бітуму в регенованому матеріалі, за якого будуть забезпечені основні фізико-механічні показники регенованого асфальтобетону 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) %.

5. Отримані графічні залежності та математичні моделі, що дозволяють контролювати потрібний час розігрівання покриття в залежності від необхідної температури перемішування суміші. Це дасть змогу не допустити перегріву покриття.

6. Експериментально встановлені залежності часу перемішування РГС при її приготуванні дали змогу встановити мінімальний діапазон часу її перемішування, який складає – (1,25 – 1,30) хв.

7. Отримані експериментальні дані визначення колієстійкості РГА 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.

8. У роботі обґрунтовано розрахунок гранулометричного складу РГС. 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 вимогам [80] для 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 РГА.

Результати досліджень другого розділу викладено у наступних публікаціях [103 – 105].

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Техніко-економічне обґрунтування доцільності застосування технології гарячої регенерації для ремонту асфальтобетонних покриттів

Визначення ефективності альтернативних технологій ремонту здійснено шляхом порівняння приведених витрат на 1000 м² дорожнього покриття, що складаються з вартості ремонтних робіт, собівартості матеріалів, витрат на експлуатаційне утримання протягом всього порівняльного строку (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 [106].

Розрахунок приведених витрат здійснено з урахуванням безризикової норми дисконту E .

Для порівняння витрат за різними технологіями ремонту використано наступну формулу:

$$B_{заг} = \sum_{i=1}^n [(B_{Пс} \times (1+E)^t) \times n] + \sum_{i=1}^m [(B_{Пд_Еу} \times (1+E)^t) \times m] + \sum B_{СЕ}^P \times (1+E)^t, \quad (4.1)$$

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

n – кількість поточних середніх ремонтів, які виконуються на протязі порівняльного строку T ;

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

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

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

E – безризикова норма дисконту у відносних одиницях виміру;

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

t – рік розрахунку.

Витрати на виконання ремонтних робіт та робіт з експлуатаційного утримання визначали за ресурсним методом відповідно до СОУ 42.1-37641918-085:2018 «Автомобільні дороги. Правила визначення вартості робіт з поточного ремонту та експлуатаційного утримання» [107].

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)» [108], ДСТУ Б Д.2.7-1:2012 «Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів» [109], СОУ 42.1-37641918-034:2018 «Дорожні машини та механізми. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин і механізмів» [110], СОУ 42.1-37641918-035:2018 «Автомобільні дороги. Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи» [111]. На роботи з гарячої регенерації дорожнього асфальтобетону на місці методами «*Reshape*» та «*Repave*» відсутні ресурсні елементні кошторисні норми. Враховуючи зазначене 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» [112].

Для нормування потреби трудових та технічних ресурсів при розробленні індивідуальних кошторисних норм використаний розрахунково-дослідний метод [113]. Він базується на використанні даних, одержаних в результаті проведення спеціальних нормативних досліджень (вимірів, фотохронометражу).

Визначення величини норм витрат труда ($H_{втр}$) робітників-будівельників розраховано за формулою [113]:

$$H_{втр} = \frac{П_{вт}}{(100 - (П_{нзр} + П_{г} + П_{мо})) \cdot 60}, \quad (4.2)$$

де $П_{вт}$ – сума проектованих витрат на вимірник процесу, люд.хв;

$П_{нзр}$ – проектовані витрати на підготовчо-заключну роботу, %;

$П_{г}$ – проектовані витрати на відпочинок і особисті потреби, %;

$П_{мо}$ – проектовані 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 ($H_{втр}$, люд.год), визначені на підставі поточного нормативного часу роботи робітників-будівельників і кількісного складу виконавців:

$$H_{чвм} = \frac{H_{втр}}{N_p}, \quad (4.3)$$

$$H_{втр} = H_{чвм} \cdot N_o, \quad (4.4)$$

де $N_{втр}$ – витрати труда машиністів, люд.год;

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

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

Обсяги та вартість окремих видів робіт, які повинні виконуватись при поточному дрібному ремонті та експлуатаційному утриманні 1 км

автомобільної дороги загального користування визначили з урахуванням мінімального нормативу утримання згідно з [114].

При визначенні вартості робіт з поточного дрібного ремонту та експлуатаційного утримання урахували умови експлуатації нежорсткого дорожнього одягу після виконання ремонтних робіт. З урахуванням цього були обрані наступні варіанти виконання робіт з поточного дрібного ремонту та експлуатаційного утримання [106]:

- перший варіант: без врахування робіт з ліквідації вибоїн дорожнього одягу після виконання ремонтних робіт дорожнього одягу;
- другий варіант: включає весь комплекс ремонтних робіт.

При встановленні мінімального значення показника інтегральних витрат знехтували втратами користувачів доріг при виконанні ремонтних робіт, оскільки вони є незначними та суттєво не вплинуть на результати досліджень.

Порівняльний строк (T) визначений з урахуванням міжремонтного строку експлуатації дорожніх одягів та покриттів для автомобільної дороги 3 категорії відповідно до ВБН Г.1-218-050-2001 «Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування» [115] та становить 5 років.

На основі проведеного аналізу досвіду застосування технологій поточного ремонту дорожнього одягу автомобільних доріг в Україні та експертного оцінювання вибрані основні технології поточного середнього ремонту:

1) Фрезерування та влаштування нового шару асфальтобетону. Включає холодне фрезерування асфальтобетонного покриття фрезою на глибину 5 см, приготування асфальтобетонної суміші та перевезення її на об'єкт, влаштування верхнього шару покриття товщиною 5 см із дрібнозернистої асфальтобетонної суміші асфальтоукладачем;

2) Ліквідація вибоїн та влаштування нового шару асфальтобетону.

Включає в себе ліквідацію вибоїн, приготування асфальтобетонної суміші, перевезення її на об'єкт та влаштування верхнього шару покриття товщиною 5 см із дрібнозернистої асфальтобетонної суміші асфальтоукладачем;

3) Фрезерування та влаштування регенованого шару асфальтобетону. Включає в себе холодне фрезерування асфальтобетонного покриття фрезою на глибину 5 см, перевезення зфрезерованої крихти на асфальтобетонний завод, приготування асфальтобетонної суміші із застосуванням регенеруючих добавок та перевезення її на об'єкт, влаштування верхнього шару покриття товщиною 5 см із дрібнозернистої РГС асфальтоукладачем;

4) Технологія гарячої регенерації за методом «Reshape». Включає розігрівання та фрезерування покриття на глибину до 2 см з використанням реміксер, перемішування в змішувачі реміксер зфрезерованого матеріалу, укладання та ущільнення суміші. Поверх регенованого шару укладається шар зносу з литої емульсійно-мінеральної суміші товщиною 10 мм.

5) Технологія гарячої регенерації за методом «Repave».

Включає розігрівання та фрезерування покриття на глибину до 4 см з використанням реміксер, перемішування в змішувачі реміксер зфрезерованого матеріалу з одночасним укладанням шару зносу з асфальтобетонної суміші і ущільненням двох шарів в один прохід.

6) Технологія гарячої регенерації за методом «Remix». Метод включає розігрівання та фрезерування покриття на глибину до 3 см з використанням реміксер, перемішування в змішувачі реміксер

зфрезерованого матеріалу з додаванням нової асфальтобетонної суміші та бітуму (до 1 %), укладанням і ущільненням шару.

7) Технологія гарячої регенерації за методом «Remix Plus». Метод включає розігрівання та фрезерування покриття на глибину до 5 см з використанням реміксера, перемішування в змішувачі реміксера зфрезерованого матеріалу з додаванням бітуму (до 1 %) з одночасним укладанням шару зносу з асфальтобетонної суміші товщиною 3 см і ущільненням двох шарів в один прохід.

8) Технологія влаштування тонкошарового покриття з литих емульсійно-мінеральних сумішей. Ця технологія включає ліквідацію вибоїн асфальтобетонного покриття та влаштування шару зносу з литої емульсійно-мінеральної суміші в два проходи спеціалізованою машиною. Загальна товщина шару становить 3 см.

9) Поверхнева обробка. Ця технологія включає ліквідацію вибоїн асфальтобетонного покриття та влаштування одиночної поверхневої обробки з одним розсипом щебеню спеціалізованою машиною.

З урахуванням положень [114] визначені вартості виконання робіт за кожною з вибраних технологій (рис. 4.1). Кошторисні розрахунки виконані із застосуванням програмного комплексу СМЕТА_8_Online в поточних цінах, станом на 15.04.2020.

Відповідно до [106] були розраховані річні витрати на експлуатаційне утримання та поточний дрібний ремонт (далі – експлуатаційне утримання) автомобільної дороги державного значення III категорії. За першим варіантом (без врахування робіт з ліквідації вибоїн дорожнього одягу) витрати на 1000 м² покриття становлять 31500,00 грн, за другим варіантом – 15011,63 грн.

При калькулюванні витрат враховували також різні строки експлуатаційної придатності дорожнього одягу, відремонтованого за технологіями 1–9. Приклад розрахунку витрат на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання 1000 м² автомобільної дороги III категорії, що відремонтована за технологією 1, наведено в таблиці 4.1. Аналогічно розраховані витрати за технологіями. Загальні витрати на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання за кожним з варіантів, що порівнюються, наведені в таблиці 4.2.

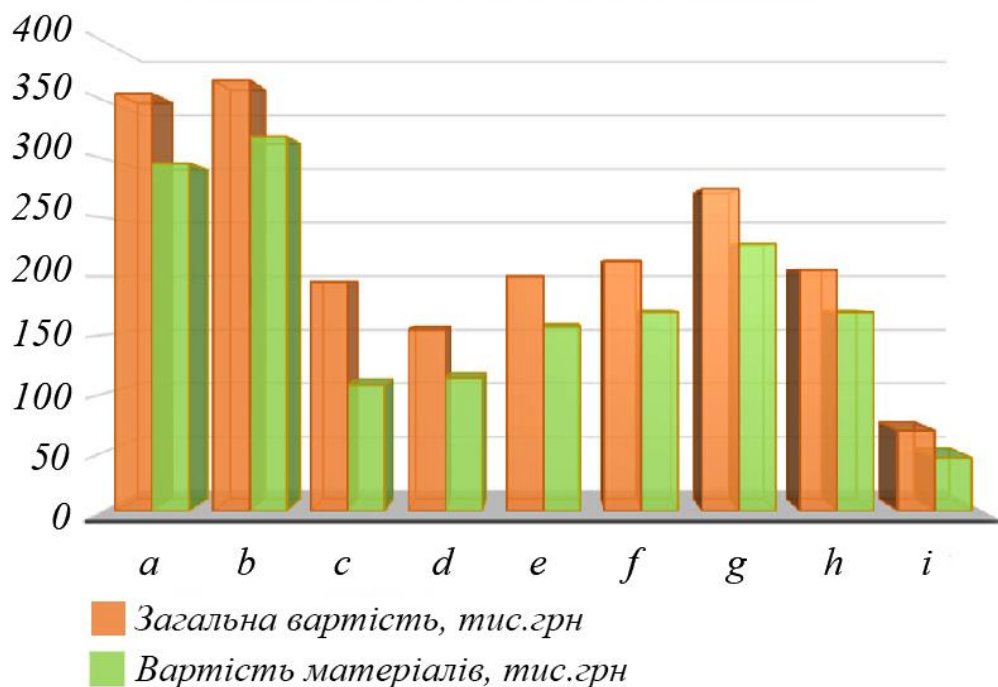


Рисунок 4.1 –Вартість поточного ремонту (тис. грн.) 1000 м² дорожнього покриття за технологіями: a – 1; b – 2; c –3; d –4; e –5; f –6; g – 7; h – 8; i –9

На основі даних таблиці 4.2 побудоване графічне зображення приведених витрат на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання автомобільної дороги, в залежності від строку експлуатації (рис. 4.2).

Таблиця 4.1 – Витрати на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання 1000 м² автомобільної дороги III категорії, що відремонтована за технологією 1

Рік	Коефіцієнт дисконтування	Витрати, тис. грн		Щорічні витрати, тис. грн	Акумуляція витрат, тис. грн
		<i>В_{ПС}</i>	<i>В_{ПО_ey}</i>		
0	1,000	355,361	-	355,361	355,361
1	1,050	-	13,344	13,344	368,705
2	1,103	-	14,011	14,011	382,716
3	1,158	-	14,718	14,718	397,434
4	1,216	-	15,452	15,452	412,886
5	1,276	-	34,048	34,048	446,934
Всього	-	355,361	124,523	446,934	-

Таблиця 4.2 – Витрати на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання 1000 м² автомобільної дороги III категорії, що відремонтована за технологіями 1-9

Рік	Щорічні витрати за технологіями 1-9, тис. грн								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	355,361	367,057	195,068	154,801	200,073	212,995	274,292	205,588	68,781
1	13,344	13,344	13,344	13,344	13,344	13,344	13,344	13,344	28,000
2	14,011	14,011	14,011	29,400	14,011	14,011	14,011	29,400	29,40
3	14,718	14,718	30,884	30,884	30,884	30,884	14,718	30,884	30,884
4	15,452	32,424	32,424	284,877	32,424	32,424	15,452	367,702	144,594
5	34,048	34,048	34,048	16,226	34,048	34,048	34,048	16,226	34,048
Всього	446,934	475,602	319,779	529,532	324,784	337,706	365,865	663,144	335,707

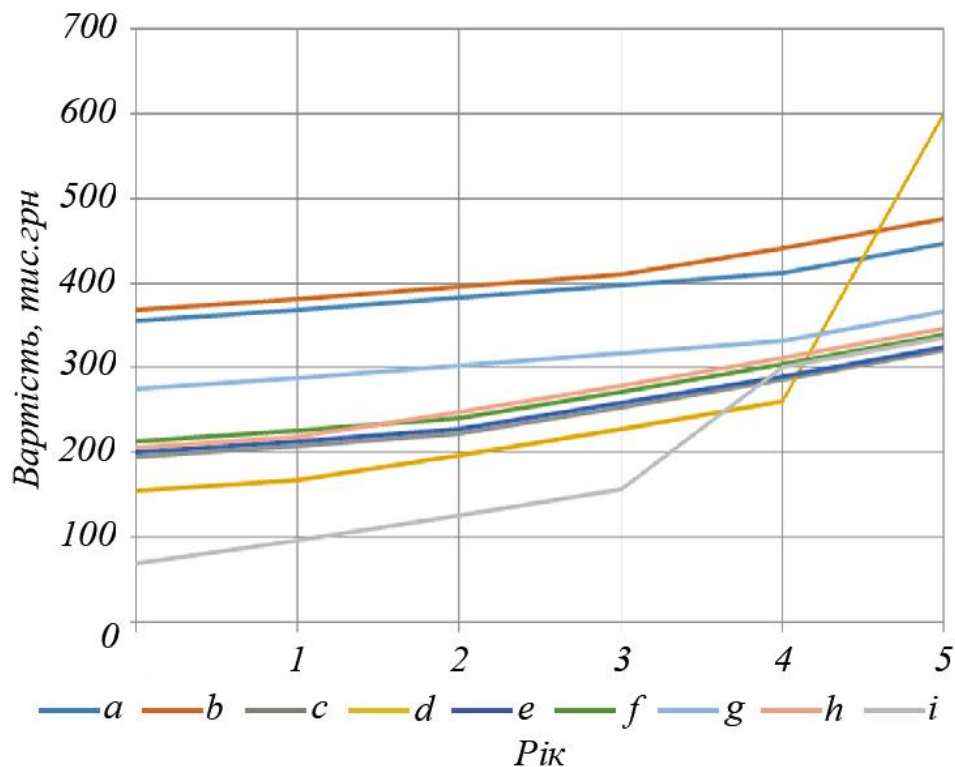


Рисунок 4.2 – Графік щорічних приведених витрат на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання автомобільної дороги, в залежності від технології ремонту: $a - 1$; $b - 2$; $c - 3$; $d - 4$; $e - 5$; $f - 6$; $g - 7$; $h - 8$; $i - 9$

Графіки на рис. 4.1 та рис. 4.2 показують, що при порівнянні лише вартостей ремонту економічно вигідними методами відновлення транспортно-експлуатаційних показників автомобільних доріг є поверхнева обробка та технологія гарячої регенерації за методом «Reshape». Проте, експертний аналіз та вітчизняний досвід застосування таких технологій показують, що автомобільна дорога відремонтована за зазначеними технологіями швидше потребує чергового поточного середнього ремонту, ніж автомобільна дорога відремонтована за альтернативними технологіями. Це в свою чергу відобразилось і на мінімальному значенні показника інтегральних витрат з розрахунку на порівняльний строк 5 років.

Найдорощими методами при оцінці мінімального значення показника інтегральних витрат з розрахунку на порівняльний строк 5 років є «традиційні» технології ремонту з фрезеруванням старого шару дорожнього покриття та влаштуванням нового шару, але разом з тим ці технології є найбільш якісними та довговічними.

Технології гарячої регенерації асфальтобетону та влаштування шарів зносу з литих емульсійно-мінеральних сумішей мають середню вартість ремонту, проте в п'ятирічній перспективі є найбільш економічно вигідні.

Велику частку у розрізі складових витрат при технологіях гарячої регенерації становлять витрати на матеріали, а саме витрати на скраплений газ. За результатами спостережень було встановлено, що витрата газу може змінюватися в діапазоні від 4000 л / 1000 м² до 12000 л / 1000 м².

Температура розігрівання асфальтобетону значно залежить від тривалості розігрівання. Чим довший процес розігрівання, тим вища температура розігрівання покриття на поверхні. Проте, теплова ефективність не може збільшуватись надто високо, оскільки структура бітуму, що знаходиться в асфальтобетоні, порушується при нагріванні і його пластичні характеристики втрачаються. Тому більшим оптимальним режимом розігріву є поступовий розігрів.

Проаналізувавши графіки на рис. 4.1 та математичні моделі параграфу 3.2 встановлено, що зменшення температури розігріву покриття хоча б на (10–20) °C призведе до збільшення продуктивності роботи термічної установки. В такому випадку збільшення продуктивності може складати від 20 % до 25 %, що зменшить витрату газу та, відповідно, собівартість робіт.

З використанням формул (4.2) – (4.4) розраховано змінені норми часу для технологій гарячої регенерації за методом «*Remix*» та «*Reshape*» із застосуванням ЛЕМС, що враховують збільшення продуктивності труда на

25 %. Було проаналізовано два варіанти ремонту, при яких витрати на скраплений газ 4000 л / 1000 м² та 12000 л / 1000 м² та відповідні норми часу роботи машини для гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу (реміксер) і термічної установки для розігріву асфальтобетонного покриття. Кошторисні розрахунки виконані із застосуванням програмного комплексу СМЕТА_8_Online в поточних цінах, станом на 15.04.2020. Результати проведених досліджень наведені у табл. 4.3. та табл. 4.4 та зображено на рис. 4.3 та рис. 4.4.

Таблиця 4.3 – Порівняльні витрати на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання 1000 м² автомобільної дороги III категорії, що відремонтована за методом «*Remix*» з урахуванням зміни складових витрат

Найменування показника	Remix			
	I		II	
Витрати на скраплений газ на 1000 м ² , л	4000	3000	12000	9000
Норма часу роботи реміксерів і термічної установки для розігріву АБ покриття	5,45	4,31	5,45	4,31
Загальні витрати, тис. грн	212,99	195,45	297,41	258,77

Таблиця 4.4 – Порівняльні витрати на поточний середній ремонт та експлуатаційне утримання 1000 м² автомобільної дороги III категорії, що відремонтована за технологією «*Reshape*» + ЛЕМС з урахуванням зміни складових витрат

Найменування показника	Reshape + ЛЕМС			
	I		II	
Витрати на скраплений газ на 1000 м ² , л	4000	3000	12000	9000
Норма часу роботи реміксерів і термічної установки для розігріву АБ покриття	5,45	4,31	5,45	4,31
Загальні витрати, тис. грн	154,80	137,84	239,22	201,16

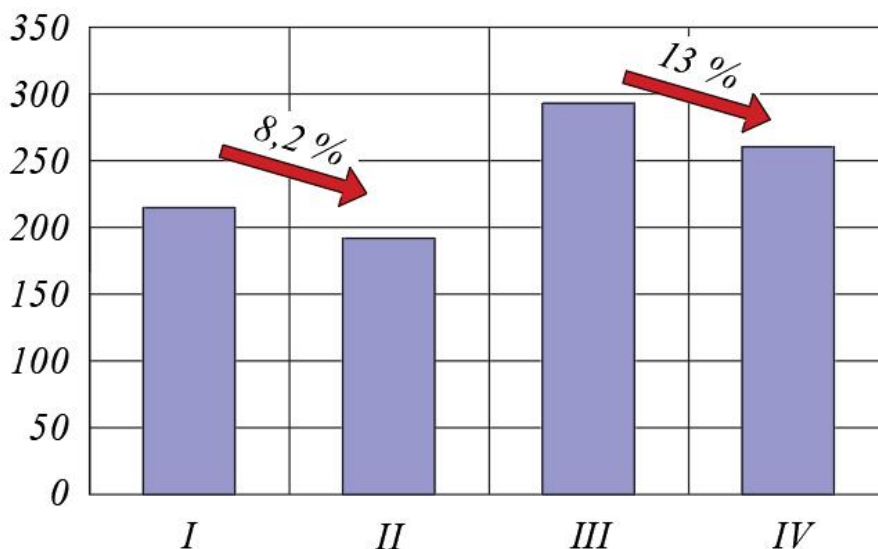


Рисунок 4.3 – Вартість поточного ремонту 1000 м² дорожнього покриття за методом «*Remix*», де I, III – витрати на скраплений газ відповідно – 4000 л та 12000 л при нормі часу роботи машин – 5,75; II, IV – зменшені витрати на скраплений газ та норма часу роботи машин на 25 %

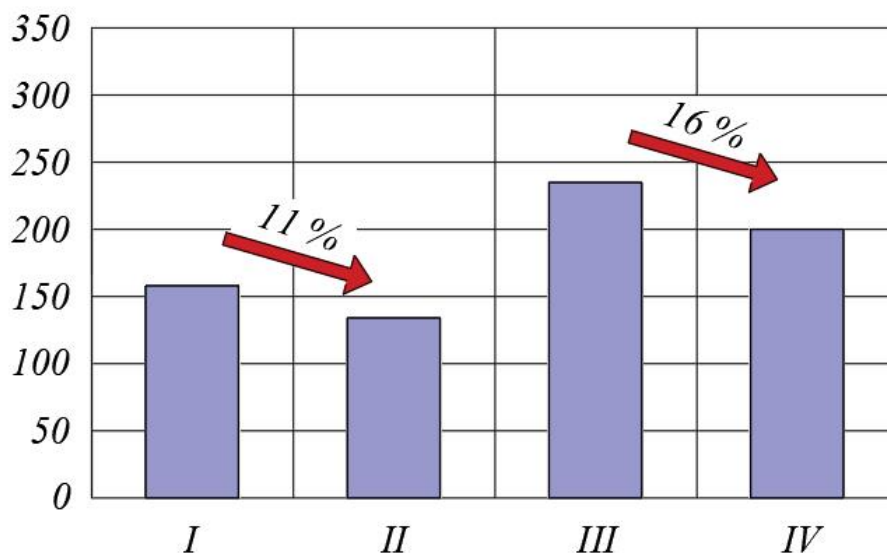


Рисунок 4.4 – Вартість поточного ремонту 1000 м² дорожнього покриття за технологією «*Reshape*» + ЛЕМС, де I, III – витрати на скраплений газ відповідно – 4000 л та 12000 л при нормі часу роботи машин – 5,75; II, IV – зменшені витрати на скраплений газ та норма часу роботи машин на 25 %

4.2 Рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячої регенерації на дорозі

За результатами виконання експериментальних та теоретичних досліджень було розроблено основні положення Рекомендацій, сфера застосування яких поширюється на технології гарячої регенерації на дорозі для влаштування шару дорожнього асфальтобетонного покриття автомобільних доріг загального користування в усіх дорожньо-кліматичних зонах України згідно з [12].

Розроблені Рекомендації встановлюють:

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

4.2.1 Встановлення вимог до матеріалів

РГС та РГА повинні задовольняти стандартні вимоги [80] до гарячих асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів другої марки необхідного виду, групи, типу та різновиду гранулометрії для застосування у запроектованих шарах покриття автомобільної дороги відповідної категорії, у відповідній дорожньо-кліматичній зоні за умовами роботи асфальтобетонного покриття згідно з [12].

Для отримання РГС, при необхідності коригування складу, використовують один або декілька нових матеріалів з переліку: гаряча асфальтобетонна суміш (нова); бітумні в'язучі; крупні заповнювачі; пісок; мінеральний порошок; регенеруюча добавка. Склад та вміст нових матеріалів

визначають за результатами випробувань зразків асфальтобетону існуючого покриття, а також підбору складу РГА.

Бітуми в складі РГА повинні задовольняти вимоги [116]. Для пластифікації вторинного бітуму може бути використаний бітум згідно з ДСТУ 4044⁴, більш пластичні, ніж бітум у складі старого асфальтобетону, у тому числі з додаванням регенеруючої добавки.

Крупний заповнювач має задовольняти вимоги [117, 118]; вимоги до дрібного заповнювача (піску) встановлюють згідно з [119]. Дозволяється використовувати пісок кварцево-залізистий згідно з [120]. Мінеральний порошок повинен задовольняти вимоги [121].

Регенеруючі добавки мають бути призначені для виконання робіт за технологією гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі та характеризуватися температурою спалахнення у відкритому тиглі не нижче ніж 230 °C.

Незалежно від заявлених основних технічних ефектів, забороняється використовувати добавки або модифікатори, здатні підвищувати температуру крихкості бітуму.

Вимоги до нової асфальтобетонної суміші та асфальтобетону накладного шару, а також їх складових, встановлюються з урахуванням вимог [80].

4.2.2 Встановлення вимог до процедури підбору складу регенованого гарячого асфальтобетону

Процедура підбору складу передбачає підбір складу бітуму, у тому числі за вмістом регенеруючої добавки – за необхідності, підбір зернового складу суміші нових мінеральних матеріалів з перевірянням

⁴Рекомендується суміщати суміжні марки бітумів, що потребує визначення марки бітуму в складі старого асфальтобетону.

гранулометричного складу РГС на відповідність нормативним вимогам, а також підбір складу РГА за вмістом бітуму.

У зазначених виробником випадках вміст регенеруючої добавки у бітумі може бути встановлений шляхом інтерполяції з застосуванням, у межах прямолінійності, графічної залежності «відносний вміст добавки – температура розм'якшення бітуму» або «відносний вміст добавки – показник пенетрації бітуму». При цьому рекомендовані межі вмісту добавки обов'язково вказуються виробником.

За відсутності рекомендацій виробника вміст добавки рекомендовано встановлювати (та підтверджувати результатами випробування РГА):

- 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) %.

У випадку пластифікації асфальтобетонних сумішей шляхом додавання бітуму малов'язких марок (БНД 100/150 або інша марка) необхідну кількість доданого бітуму b , у долях одиниці, обчислюють на підставі формули (4.5) або формули (4.6).

$$b \cdot \lg \Pi_{25_2} = \lg \Pi_{25_{mix}} - a \cdot \lg \Pi_{25_1}, \quad (4.5)$$

де $a + b = 1$;

Π_{25_1} - фактичне значення глибини проникнення голки (пенетрації) вторинного бітуму за температури 25 °С;

Π_{25_2} - фактичне значення глибини проникнення голки (пенетрації) доданого бітуму за температури 25 °С

$\Pi_{25_{mix}}$ - потрібне значення глибини проникнення голки (пенетрації) регенованого бітумного в'язучого за температури 25 °С.

Значення $\Pi_{25_{mix}}$ обирають у межах стандартних значень потрібної марки бітуму.

$$b \cdot T_{p_2} = T_{p_{mix}} - a \cdot T_{p_1}, \quad (4.6)$$

де T_{p_1} - фактична температура розм'якшення вторинного бітуму, °С;

T_{p_2} - фактична температура розм'якшення доданого бітуму, °С

$T_{p_{mix}}$ - потрібна температура розм'якшення регенованого бітуму, °С.

Значення $T_{p_{mix}}$ обирають у межах стандартних значень потрібної марки бітуму.

Підбір складу РГС за вмістом бітуму здійснюють згідно з [80].

4.2.3 Методологія вибору найбільш раціональних параметрів технології

При виконанні робіт за будь-яким з методів гарячої регенерації на дорозі підготовчі роботи, поряд з встановленими згідно з [122] та [12], можуть за необхідності включати попереднє холодне фрезерування з видаленням частини асфальтобетонного покриття з метою підвищення вмісту нових мінеральних матеріалів або з метою коригування поперечного профілю при регенерації покриття на величину більше ніж 1,5 %.

На ділянках з розвинутою сіткою тріщин розглядають необхідність доущільнення розташованих нижче незв'язних шарів (шару) основи з попереднім видаленням шару асфальтобетону або інших монолітних шарів (шару).

Також за необхідності виконують роботи з ремонту (герметизації) тріщин на глибині, яка перевищує заплановану глибину гарячої регенерації.

При виконанні робіт без зміни складу старого асфальтобетону до складу комплексу дорожніх машин для гарячої регенерації дозволяється вводити один асфальторозігрівач з двома послідовно розташованими комплектами нагрівальних панелей. У випадку застосування нових мінеральних матеріалів, які додаються до складу РГС шляхом нанесення на поверхню розігрітого асфальтобетонного покриття (методи «*Remix*», «*Remix Plus*»), застосування другого асфальторозігрівача є обов'язковим.

Суміш нових мінеральних матеріалів підібраного складу наносять за допомогою розподілювача на розігріте першим асфальторозігрівачем покриття безпосередньо перед передньою панеллю другого асфальторозігрівача. У даному випадку другий асфальторозігрівач та передня панель нагрівальних елементів реміксеру застосовуються для розігрівання нових мінеральних матеріалів.

При виконанні робіт методом «*Reshape*» робочий процес складається з наступних операцій:

- розігрівання покриття нагрівальними елементами асфальторозігрівача та реміксеру;
- рихлення, перемішування, розрівнювання і попереднє ущільнення шару суміші відповідними робочими органами реміксеру;
- остаточне ущільнення котками.

Для рихлення та перемішування розігрітого асфальтобетону покриття без коригування поперечного профілю застосовують фрезерний барабан, на який за допомогою форсунок дозатора подають регенеруючу добавку.

Для профілювання поверхні шару розпушеного матеріалу застосовують відвал⁵, розташований за фрезерувальним агрегатом. У випадку коригування

⁵Робочий орган на англійських сайтах фірм-виробників дорожніх машин для гарячого ресайклінгу позначається як «*scrapperblade*». При застосуванні методів гарячого ресайклінгу зі змішуванням матеріалів у змішувальному агрегаті відвал виконує роль щита, який зачищає поверхню від залишків фрезерованого матеріалу.

поперечного профілю покриття для перемішування розрихленої суміші застосовують змішувальний агрегат з укладанням шару суміші за допомогою розподільчого шнека.

Таким чином може бути здійснено коригування поперечного профілю покриття зі зміною на величину до 1,5 %. Більше запроектоване значення зміни поперечного профілю потребує попереднього холодного фрезерування поверхні існуючого покриття.

При виконанні робіт методом «*Repave*» робочий процес складається з наступних операцій:

- розігрівання покриття нагрівальними елементами асфальторозігрівача та реміксером;
- рихлення, перемішування суміші реміксером;
- приймання в бункер реміксеру нової гарячої асфальтобетонної суміші та її укладання на шар переформованої суміші;
- попереднє ущільнення гарячого переформованого шару і шару нової суміші (шару зносу) ущільнювальним обладнанням реміксеру;
- остаточне ущільнення котками.

Технологічні операції з переробки матеріалу існуючого покриття без зміни або зі зміною поперечного профілю виконуються, як при роботах за методом «*Reshape*».

При виконанні робіт методом «*Remix*» робочий процес складається з наступних операцій:

- розігрівання покриття нагрівальними елементами першого асфальторозігрівача;
- розподіляння суміші кам'яних матеріалів підібраного зернового складу перед передньою панеллю другого асфальторозігрівача;
- додаткове розігрівання матеріалів нагрівальними елементами

другого асфальторозігрівача та реміксера;

- рихлення, перемішування з додаванням або без додавання бітуму, укладання і попереднє ущільнення РГС реміксером;
- остаточне ущільнення котками.

З урахуванням конкретних умов дозволяється подавати розігріті мінеральні матеріали безпосередньо до змішувального агрегату через систему подачі нової асфальтобетонної суміші реміксера (приймальний бункер, скребковий транспортер). У даному випадку технологічні операції розподілення мінеральних матеріалів по поверхні розігрітого шару та додаткове нагрівання відсутні.

Ущільнення шару РГС рекомендується виконувати послідовно гладковальцевим котком за шість проходів по одному сліду та котком комбінованої дії за чотири проходи по одному сліду; тип та кількість проходів котків уточнюють за результатами пробного ущільнення на контрольній ділянці.

При виконанні робіт методом «*Remix Plus*» робочий процес у частині приготування РГС та укладання шару РГС відбувається аналогічно до описаного для метода «*Remix*», за винятком застосування нових мінеральних матеріалів. При роботах за методом «*Remix Plus*» нові мінеральні матеріали вводять виключно шляхом розподілення по поверхні розігрітого покриття перед передньою панеллю другого асфальторозігрівача.

Додатково (паралельно) виконуються наступні технологічні операції:

- приймання в бункер реміксера нової гарячої асфальтобетонної суміші та її укладання на гарячий попередньо ущільнений шар РГС;
- ущільнення шару нової суміші (накладного шару) ущільнювальним обладнанням реміксера;
- ущільнення пневмокотком і гладковальцевим віброкотком.

Для укладання накладного шару використовують другий розподільчий шнек та другий комплект ущільнювального обладнання в складі реміксер.

Після завершення ущільнення здійснюють опорядження поверхні шару, виправлення дрібних дефектів та місці спряження смуг.

Температура поверхні покриття повинна знаходитися у межах:

- від 130 °C до 150 °C – за першим асфальторозігрівачем ;
- від 150 °C до 180 °C – після другого асфальторозігрівача;
- від 120 °C до 140 °C – перед реміксером.

У разі використання регенеруючої добавки рекомендовано забезпечувати температуру перемішування РГС в межах (125–135) °C.

Температура в шарі за ущільнюючим обладнанням реміксер на глибині від 30 мм до 60 мм повинна бути не менше ніж 105 °C.

Також важливо, щоб укладання асфальтобетонної суміші (регенерованої або нової) відбувалося за принципом «гарячий шар на гарячий шар», тому температура поверхні, на яку укладають асфальтобетонну суміш, повинна становити не менше ніж 105 °C; для дотримання температури використовують нагрівальні елементи, розташовані за змішувальним агрегатом реміксер.

Температуру розігріву покриття регулюють шляхом послідовної зміни:

- відстані між нагрівальними панелями і поверхнею покриття;
- швидкості руху;
- тиску в газовій системі асфальторозігрівачів.

Теплову потужність розігріву регулюють переважно шляхом зміни швидкості руху асфальторозігрівачів на величину від 1,2 м/хв до 2,1 м/хв. При регулюванні відстані нагрівальних панелей від поверхні покриття найменша дозволена відстань становить 50 мм, при цьому горілки пальників асфальторозігрівача рекомендується розташовувати на відстані від поверхні 100 мм.

Найбільша допустима тривалість одноразового безперервного розігрівання поверхні шару асфальтобетонного покриття не повинна перевищувати 10 хв. Загальна тривалість розігрівання за температури повітря 20 °C не повинна перевищувати 30 хв.

Незалежно від методу гарячої регенерації, нагрівання матеріалів до температури вище ніж 180 °C не дозволяється.

4.2.4 Встановлення вимог до контролю якості та приймання робіт

При виконанні робіт методом гарячої регенерації на дорозі здійснюють вхідний, операційний та приймальний контроль. Результати контролю мають бути зареєстровані у виконавчій документації за формами додатка А [123].

На етапі вхідного контролю встановлюють відповідність кожної партії кожного виду нових дорожньо-будівельних матеріалів вимогам нормативних документів. При операційному та прийальному контролі перевіряють якість матеріалів та робіт, геометричні параметри шару, що влаштовується.

Однорідність РГС контролюють на кожній захватці візуально – суміш має бути однорідного кольору, без включень згустків в'язучого, без грудок необробленого мінерального матеріалу. Також не допускається наявність зерен мінерального матеріалу, не оброблених (не повністю оброблених) бітумним в'язучим.

Випробування РГС/РГА здійснюють для матеріалу, отриманого протягом однієї зміни у процесі ресайклінгу асфальтобетонного покриття однакового складу (згідно з проектною документацією на об'єкт) при незмінних технологічних параметрах процесу.

При випробуваннях РГС визначають склад суміші (вміст бітуму і мінеральної частини), гранулометричний склад мінеральної частини – згідно

з [83], а також температуру розм'якшення і показник пенетрації регенованого бітуму згідно з [124, 125]⁶.

При випробуваннях кернів, відібраних згідно з [12], визначають товщину шару асфальтобетонного покриття, водонасичення РГА та зчеплення шарів. При випробуваннях РГА переформованих зразків згідно з [83] визначають границю міцності при стиску за температури 0 °С, 20 °С і 50 °С, та коефіцієнт ущільнення.

4.3 Практичне застосування удосконаленої технології на автомобільних дорогах загального користування

Практичне застосування удосконаленої технології гарячої регенерації на дорозі було здійснено при виконанні робіт на автомобільній дорозі М-01 Київ-Чернігів-Нові Яриловичі на ділянці км 103+010 – км 103+628 (права смуга).

За даними технічної документації на автомобільну дорогу М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі визначено, що на даній ділянці збудована багатошарова конструкція дорожнього одягу, що склалась в результаті стадійного будівництва та капітального ремонту.

В основі земляного полотна залягають четвертинні еолово-делювіальні відклади, представленні пісками дрібними, середньої щільності, насиченими водою, супіском пилюватим твердої та пластичної консистенції, суглинком легким пилюватим твердої, тугопластичної та текучої консистенції, суглинками легкими пилюватими, тугопластичної консистенції. Живлення ґрунтових вод відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів. Можливі сезонні коливання рівня на 0,5-1,0 м. З технічної документації на автомобільну дорогу визначено, що основу дорожнього

⁶Для регенованого бітуму дозволяється визначати один з показників.

одягу складають щебеневі шари з просочуванням або щебеневі шари, влаштовані за способом заклинки. По лівому та правому проїздам встановлено таку конструкцію дорожнього одягу:

- асфальтобетон дрібнозернистий – 9-14 см;
- асфальтобетон крупнозернистий – 7-8 см;
- просочення (щебінь з бітумом) – 13 см;
- щебінь фракцій – 20-25 см.

За даними візуального обстеження визначено, що найбільш характерними дефектами асфальтобетонного покриття (рис. 4.5, 4.6) є:

- повздовжні тріщини по смугам накатів;
- вибоїни;
- поперечні тріщини;
- сітка тріщин;
- колійність.

За даними візуального та інструментального обстеження визначено, що ділянка знаходиться в незадовільному стані і терміново потребують ремонту.



Рисунок 4.5 – Характерні дефекти старого покриття – поперечні тріщини



Рисунок 4.6 – Характерні деформації старого покриття – колія

Як показало обстеження, основа не втратила несної здатності, тому був виконаний ремонт лише дорожнього покриття із застосуванням технології гарячої регенерації методом «*Reshape*» з нанесенням захисного шару ЛЕМС.

Після виконання робіт проводився моніторинг за станом покриття. В процесі польового обстеження дослідної ділянки на автомобільній дорозі М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (на м. Гомель) були проведені заміри рівності поперечного профілю (колійності) – таблиця 4.5, статичного модуля пружності асфальтобетонного покриття, та відбір кернів.

Таблиця 4.5 – Рівність поперечного профілю проїзної частини М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі, км 103+010 – км103+628, права смуга

Ділянки, км	Відстань від кромки проїзної частини, м	Глибина колії, мм				
		1	2	3	4	5
Старе покриття						
102+920	0,75	9,5	14,0	8,5	2,0	12,0
102+980	0,75	12,5	16,0	17,0	0,0	0,0

Кінець табл. 4.5

Ділянки, км	Відстань від кромки проїзної частини, м	Глибина колії, мм				
		1	2	3	4	5
Нове покриття						
103+600	0,75	1,5	1,5	1,0	1,4	3,0
103+160	0,75	0,0	0,8	1,9	2,0	2,0
103+170	0,75	1,8	1,7	1,8	1,5	4,0
103+180	0,75	1,2	2,9	0,0	0,0	1,0
103+190	0,75	6,0	0,0	1,0	1,5	1,8
103+290	0,75	11,0	5,0	0,0	0,0	1,0
103+390	0,75	3,5	3,0	0,0	5,0	4,0

Вимірювання величини коефіцієнту зчеплення проводились в ясну погоду за температури 10°C. Згідно з кореляцією одержаних вимірів, вказаних у табл. 1.26, значення коефіцієнта зчеплення становить $K_{зч} = 0,4$, що відповідає вимогам [12].

Для аналізу експлуатаційного стану автомобільних доріг визначався модуль пружності.

На ділянці км 103+010 – км 103+628, права смуга, середнє значення статичного модуля пружності становило 495 МПа. За результатами проведених замірів на даній ділянці визначено, що показники модуля пружності після проведеної регенерації асфальтобетонного покриття вищі, ніж на старому покритті.

На дослідній ділянці автомобільної дороги М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі (на м. Гомель) (км 103+010 – км 103+628), були відібрані керни (рис. 4.7 – 4.9) та проведені лабораторні випробування зразків та матеріалів.



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд керну № 2, відібраного з дорожнього одягу автомобільної дороги М-01, км 103+250



Рисунок 4.8 – Загальний вигляд керну № 4 відібраного з дорожнього одягу автомобільної дороги М-01, км 103+500



Рисунок 4.9 – Загальний вигляд керну № 5, відібраного з дорожнього одягу автомобільної дороги М-01, км 103+600

Результати лабораторних випробувань наведені в таблицях 4.6-4.12.

Таблиця 4.6 – Показники фізичних властивостей матеріалу кернів

№ керна	Ділянка , км	Середня густина ущільненого матеріалу, г/см ³	Водонасичення, %
2	103+250 (права смуга)	2,42	1,1
4	103+500 (права смуга)	2,52	0,8
5	103+600 (права смуга)	2,51	0,8

Водонасичення асфальтобетону відібраних кернів відповідає вимогам [80]. Значення густини зразків свідчить, що РГА є щільним.

Також були визначені наступні показники переформованих зразків:

- середня густина – 2,46 г/см³;
- водонасичення – 1,73 %;
- середнє значення границі міцності на стиск за температури 50 °С – 1,53 МПа;
- середнє значення границі міцності на стиск за температури 0 °С – 9,3 МПа.

Таблиця 4.7 – Результати визначення складу РГА

Фактичні/ нормативні дані	Вміст за масою, % мінеральних зерен, менших даного розміру, мм										Кіль- кість в'яжу- чого, %
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	
103+250 Керн №4	100	97,8	90,3	69,9	49,6	37,2	29,8	22,1	15,3	10,1	6,04
103+500 Керн №5	100	96,6	89,8	66,8	48,7	36,6	29,4	22,0	14,4	8,3	6,1
Вимоги [80] до АСГ.Др.Щ.В	100	100- 95	90- 82	75-65	64- 51	52- 37	40- 25	29-16	20-11	16-9	6,0-7,5
Відповідність вимогам [80]	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

За визначеними показниками переформовані зразки РГА відповідають вимогам [80].

Таким чином, проведені дослідження на дослідній ділянці автомобільної дороги М-01 Київ-Чернігів-Нові Яриловичі з лабораторними дослідженнями матеріалу регенованого шару асфальтобетону показали, що гаряча регенерація асфальтобетонних покриттів з нанесенням захисного шару ЛЕМС дозволяє підвищувати міцність дорожнього одягу, забезпечує високу рівність та шорсткість поверхні покриття. Було встановлено, що на дослідній ділянці об'єкта М-01 після виконання робіт за технологією гарячої регенерації модуль пружності підвищився більше ніж в 1,5 рази. За аналізом це відбувається за рахунок відновлення монолітності верхнього шару асфальтобетону.

Упродовж останніх років, технологію гарячої регенерації на дорозі було також впроваджено на автомобільних дорогах загального користування державного значення М-06 Київ – Чоп; Р-67 Київ – Ніжин – Прилуки – Пирятин, Н-10 Стрий – Івано-Франківськ – Чернівці – Мамалига, Н-09 Мукачево – Рахів – Богородчани – Івано-Франківськ – Рогатин – Бібрка – Львів, а також на Південному підході до м. Чернігів.

На Південному підході до м. Чернігів поточний ремонт із застосуванням технології гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі був виконаний у 2014 році. Було застосовано два методи:

- метод «*Remix*» без улаштування шару ЛЕМС на ділянці км 0+000 – км 2+000;
- метод «*Reshape*» із улаштуванням шару ЛЕМС на ділянці км 9+958 – км 12+805.

Метод «*Remix*» виконували із додаванням нової гарячої асфальтобетонної суміші за витрати 75 кг/м².

Результати обстеження (візуальне обстеження, інструментальні вимірювання) дослідної ділянки, виконані у 2016 році, засвідчили добрий стан покриття. На переважній протяжності глибина колії варіювалась у межах від 0 до (3 – 4) мм, що вказує на збереженість структурної цілісності дорожнього одягу.

Наступний проєкт був реалізований у 2014 році на автомобільній дорозі Р-67 Київ – Ніжин – Прилуки – Пирятин на ділянці км 28+500 – км 30+000. Дослідна ділянка знаходиться на частині Чернігівської області, що швидко розвивається, та належить до І дорожньо-кліматичної зони. Станом на весняний період 2018 року, покриття дорожнього одягу на дослідній ділянці Р-67 знаходилося в доброму стані. Ділянка характеризувалася 1-м рівнем ураження; найбільш поширеним типом дефектів покриття були поздовжні та поперечні тріщини.

На переважній протяжності глибина колії варіювалась у межах від 2 мм до 4 мм за максимального значення 5 мм, що вказує на збереженість структурної цілісності дорожнього одягу. Результати вимірювання коефіцієнта зчеплення підтвердили забезпечення зчеплення колеса автомобіля з поверхнею покриття зі значеннями коефіцієнта зчеплення, вищими за мінімально необхідні нормативні значення.

Регенерацію асфальтобетонного покриття на дослідній ділянці автомобільної дороги загального користування державного значення М-06 Київ – Чоп виконували з застосуванням методу «*Remix*» з улаштуванням шару ЛЕМС.

У 2016 році було виконано моніторинг дослідних ділянок на локації км 702+424 – 707+424. Дослідження матеріалу регенованого шару асфальтобетону здійснювали випробуванням кернів, відібраних на км 705+024 (правий проїзд) та км 707+200 (лівий проїзд). Результати лабораторних досліджень показали, що РГА на дослідній ділянці відповідає стандартним вимогам до гарячого щільного дрібнозернистого асфальтобетону тип В.

У 2015 році було реалізовано два проєкти з застосуванням технології гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі на Закарпатті. На дослідній ділянці автомобільної дороги Н-09 Мукачєво – Рахів – Богородчани – Івано-Франківськ – Рогатин – Бібрка – Львів роботи виконували з застосуванням методу «*Remix*» з улаштуванням поверхневої обробки. Регенерацію шару асфальтобетонного покриття виконували на глибину 60 мм із додаванням нової асфальтобетонної суміші. У 2016 році було виконано моніторинг дослідних ділянок км 21+000 – км 22+000, км 32+500 – км 34+000. Дослідження матеріалу регенованого шару асфальтобетону здійснювали випробуванням кернів, відібраних на 21+250 (правий проїзд) та км 33+700 (лівий проїзд), три керни на кожній локації. Результати лабораторних досліджень показали, що РГА на дослідній ділянці відповідає стандартним вимогам до гарячого щільного дрібнозернистого асфальтобетону тип В.

Не зважаючи на те, що окремі дослідні ділянки (зокрема ділянки на автомобільній дорозі Н-09) характеризувалися відносно високою неоднорідністю за станом старого асфальтобетонного покриття внаслідок чисельних ремонтів, застосування технології гарячої регенерації на дорозі було визнано ефективним.

Висновки до розділу 4

Проведення дослідження впливу температури розігріву асфальтобетону на вартість технології гарячої регенерації показало, що зменшення температури розігріву газу на 10 °С призведе до економії витрат газу, що зменшить собіварість робіт. Так при методі «*Remix*» за рахунок збільшення продуктивності загальні витрати можуть зменшуватись в діапазоні від 8,2 % до 13 %, при методі «*Reshape*» – від 11% до 16 %.

Встановлено, що при порівнянні лише вартостей ремонту економічно вигідними методами відновлення транспортно-експлуатаційних показників автомобільних доріг є поверхнева обробка та технологія гарячої регенерації за методом «*Reshape*».

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.

За результатами лабораторних досліджень РГС та РГА на розглянутому об'єкті відповідають вимогам [80] до гарячих щільних дрібнозернистих асфальтобетонних сумішей та асфальтобетонів тип Б з непереривчастим типом гранулометрії для застосування в дорожньо-кліматичних зонах України А-1 – А-7 за показниками міцності при стисканні за температури 20 °С та 50 °С, а також водонасичення.

Таким чином, за результатами аналізу закордонного та вітчизняного досвіду застосування технологій гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі можуть бути надані наступні висновки:

- технологія гарячої регенерації асфальтобетону на дорозі є ефективним інструментом для ліквідації дефектів асфальтобетонного покриття на глибину до (50-60) мм, які не пов'язані з втратою несучої здатності дорожнього одягу: колійність, температурні тріщини, поздовжні

тріщини по смугам накату, вибоїні, викришування матеріалів асфальтобетону; за наявності тріщин, глибина яких перевищує глибину гарячої регенерації покриття, необхідно виконати ремонт розшитих тріщин на відповідній глибині;

- на ділянках з розвинутою сіткою тріщин при відповідній конструкції дорожнього одягу рекомендується повне видалення асфальтобетонних шарів холодним фрезеруванням та додаткове ущільнювання розташованого нижче шару; частину видаленого асфальтобетону компенсують укладанням нової асфальтобетонної суміші у поверхневий шар;

- дефекти старого покриття, які пов'язані з невідповідністю складу асфальтобетону нормативним вимогам та/або з надлишковим вмістом бітуму, потребують обов'язкового коригування складу старого асфальтобетону.

Результати досліджень першого розділу викладено у наступних публікаціях [122, 126 – 132].

ЗАГАЛЬНІ 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) °С 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, Товариство з обмеженою відповідальністю «АБЗ-1», Товариство з обмеженою відповідальністю «Сучасна транспортна інфраструктура».

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» Національного транспортного університету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року станом на 30.05.2018 р. № 430-2018-р / Верховна Рада України. Київ: Парлам. вид-во, 2018. (Закони України). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p#n13>
2. Програма розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 станом на 22.12.2020 р. № 382-2018-п / Верховна Рада України. Київ: Парлам. вид-во, 2020. (Закони України). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/382-2018-p#Text>
3. ДСТУ 8747:2017. Автомобільні дороги. Види та переліки робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання. – Чинний від 2020.01.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2017. – 15 с.
4. ДСТУ Б А.1.1-100:2013. Автомобільні дороги. Терміни та визначення понять. – Чинний від 2014.04.01. – Київ: Мінрегіон України, 2014. – 43 с.
5. Ілляш С.І., Головка С.К., Свистун А.Я. Відновлення асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі, *Дороги і мости*. 2014 (друк 2015). Вип. 14. С. 43-47.
6. Всесвітня дорожня асоціація. Технічний комітет С7/8 «Дорожні покриття». Рециклювання дорожніх одягів. Частина 3. Посібник з гарячого рециклювання асфальтобетону зі старих покриттів на заводі [Текст] / Пер. з рос. В. Жданюка. Під заг. ред. В. Жданюка і Д. Сибільського. Х.: Вид-во ХНАДУ, 2006. 52 с.
7. Dinh, B. H., Park, D-W., Le, T. H. M. Effect of rejuvenators on the crack healing performance of recycled asphalt pavement by induction heating //

Construction and Building Materials, 2018. Volume 164. P. 246-254.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817325989>

8. Бируля А.К. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1964. 167 с.

9. Расчет и испытание нежестких дорожных одежд: учеб.-метод. пособие / Н. Н. Иванов, Н. А. Пузаков, В. И. Барздо, Ю. М. Яковлев. М.: Высш. шк., 1971. 99 с.

10. Иванов Н.Н., Коганзон М.С., Коновалов С.В. Основы новой методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом повторности воздействия нагрузок. М.: Высш. шк., 1969. 51 с.

11. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Под. ред. Н. Н. Иванова. М.: Транспорт, 1973. 328 с.

12. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Проектування. Будівництво. – Чинні від 2016.04.01. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. 91 с.

13. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. – Чинні від 2019.06.01. – Київ: Міністерство інфраструктури України, 2019. 60 с.

14. ДСТУ 8954:2019. Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу. – Чинний від 2021.01.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. 36 с.

15. Посібник дорожніх «хвороб» // CoST Україна, USAID. К.: 2019. 198 с.

16. Kandhal, P. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments // P. Kandhal, R. Mallick. US Department of Transportation, Federal Highway Administration. Research, Development, and Technology, 1997. Publ. № FHWA-SA-98-042. URL: http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pub_listing.cfm?TitleStart=P&areas=Recycling

17. Nosetti, A., Pérez-Madrigal, D., Pérez-Jiménez, F., Adriana H. Martínez. Effect of the recycling process and binder type on bituminous mixtures with 100% reclaimed asphalt pavement // *Construction and Building Materials*, 2018. Volume 167. P. 440-448. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.042>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818302678>
18. Liu, Y., Su, P., Li, M., You, Z., Zhao, M. Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials // *Journal of traffic and transportation engineering (english edition)*, 2020. 7 (5). P. 573 – 599. URL: DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>
19. Dude, A. Asphalt Mix Design Methods Manual Series № 2. // *Arten Dude. Asphalt Institute*, 2014. URL: https://www.academia.edu/39782610/Design_Methods_Aspphalt_Mix_7th_Edition_MS_2_Aspphalt_Mix_Design_Methods_7th_Edition
20. Головка С.К. Відновлення несучої здатності нежорстких дорожніх одягів за методами холодного та гарячого ресайклінгу // *Автомобільні дороги*. 2011. № 5. С. 44–46.
21. Stroup-Gardiner, M. Recycling and Reclamation of Asphalt Pavements Using In-Place Methods / M. Stroup-Gardiner et. al. // *NCHRP Synthesis 421, Transportation Research Board, Washington, D.C.* 2011. 82 p. URL: <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/165876.aspx>
22. Pradyumna, T. F., Abhishek Mittal, A., Dr. P. K. Jain. Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction // *2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG)*, in *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 104 (2013). P. 1149 – 1157. DOI: <https://doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.211>
23. Basic Asphalt Recycling Manual // *US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Asphalt Recycling and Reclaiming Association*, 2001. 277 p. URL: <https://cdrecycling.org/site/assets/files/1081/1-124-barm1.pdf>

24. Albritton, G.E. Hot In-Place Asphalt Recycling Demonstration Project / G.E. Albritton, R.L. Battey, J.F. Portera // Final Evaluation of Construction and Pavement Performance for State Study № 130, Mississippi State Department of Transportation, 1999. 24p. URL: <http://www.mdot.ms.gov/documents/research>

25. Bruns, T. The Old Canyon Road. High-elevation Colorado road gets the hot in-place treatment // Roads & Bridges. February 2020. P. 14-19. URL: <https://www.roadsbridges.com/high-elevation-colorado-road-gets-hot-place-treatment?fbclid=IwAR2ErFIwtxx4WEUAkv2dqpmmumRS4l76vmMUy-yFEuC6PmsTwHQbtIfwDG3Q>

26. Anderson, K.V. Long-Term Performance of a Hot In-Place Recycling Project – Final Report / K.V. Anderson et. al. // Washington State Department of Transportation Research Report WA-RD 738, 2016. 99 p. URL: <https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/738.2.pdf>

27. Diekmann, M. Remixer 4500: Rehabilitation of B-9 Using the Remix-Plus Process, Germany – Job Report Hot Recycling // A Wirtgen Group Company. Job Reports and References. 2004. 24 p. URL: https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o4464v77_W_jobreport_Remixer4500B9_0116_EN.pdf

28. Luson Yu Yong Tan. Remixer 4500: Different hot in place recycling applications in China – Job Report Hot Recycling // A Wirtgen Group Company. Job Reports and References. 2005. 16 p. URL: https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o4466v77_W_jobreport_Remixer4500China_0116_EN.pdf

29. Звіт про НДР «Провести моніторинг технології «гарячий» ресайклінг при виконанні робіт на автомобільних дорогах загального користування та підготувати пропозиції щодо відновлення асфальтобетонного покриття за даною технологією» Звіт І етап, Київ, ДП «Дорцентр», № держреєстрації 0115U001625, 2015. 42 с.

30. Ілляш С.І. Технологічні та вартісні аспекти впровадження гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі // Автошляховик України. 2014. №6. С. 40-43.

31. Савенко В.Я., Ілляш С.І., Терещенко Т.А. Класифікація технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону методами “in-place” // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2019. Вип. 107. С. 46-55.
32. Ілляш С.І., Головка С.К., Свистун А.Я. Відновлення асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу асфальтобетону на дорозі. *Дороги і мости*. 2014. Вип. 14. С. 43-47.
33. Ілляш С.І. Особливості технології гарячого ресайклінгу 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.
34. Савенко В.Я., Ілляш С.І. Аналіз результатів моніторингу ділянок автомобільних доріг, відновлених за технологією гарячого ресайклінгу асфальтобетонного покриття. LXXII Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів НТУ. Київ, 2016. С. 123.
35. Золотарёв В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Х.: Вища школа, 1997. 116 с.
36. Золотарёв В. А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Часть I. Дорожные битумные вяжущие. Х: ХНАДУ, 2014. 180 с.
37. Пантелеев Ф. Н., Волков В. Г. Дорожно-строительные материалы (2-е изд., испр. и доп.). М.: Автотрансиздат, 1958. 431 с.
38. Радовский Б. С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. К.: ПолиграфКонсалтинг, 2003. 240 с.
39. Гезенцвей Л. Б. Асфальтовый бетон. М.: Издательство литературы по строительству, 1964. 448 с.
40. Руденский А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М.: Транспорт, 1992. 253 с.

41. Бахрах Г. С. Ремонт дорожных одежд методом холодной регенерации (достижения и проблемы). *Новости в дорожном деле: научно-технический информационный сборник*, ФГУП «Информавтодор». 2005. Вып. 1. С. 1-17.

42. Бахрах Г. С. Методы испытания асфальтогранулобетона и технические требования к нему: Сб. науч. тр. / ГП Росдорнии. М., 2000. Вып. 10. С. 115 - 122.

43. Бахрах Г. С. Регенерация покрытий и дорожных одежд нежесткого типа // Наука и техника в дорожной отрасли. 1998. № 3. С. 18 – 21.

44. Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С. Вплив нових полімерних матеріалів серії Бутонал NS 104 на фізико-механічні властивості асфальтобетону. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науково-технічний збірник*. 2011. Вип. 81. С. 55-68.

45. Радовский Б. С. Опыт применения технологии холодной регенерации дорожных покрытий в США // Каталог-справочник Дорожная Техника. 2005. С. 176-186.

46. Головкин С. К. Раціональні способи повторного використання асфальтобетону при реконструкції автомобільних доріг // Дис. ... канд. техн. наук. – К., 1999. – 210 с.

47. Головкин С. К. Дослідження фізико-механічних властивостей асфальтобетонів, що містять повторно використаний асфальтобетон // К.: Автошляховик, 1998. № 3. С. 30 – 32.

48. Головкин С. К. Визначення розрахункових характеристик асфальтобетонів, що містять повторно використовуваний асфальтобетон. *Автодорожній комплекс України в сучасних умовах: проблеми і шляхи розвитку: збірник наукових праць*. Київ, 1998. С.176-179.

49. Гамеляк І. П., Ренейська С. В., Палешов О. С. Удосконалення технології гарячого ресайклінгу асфальтобетонних покриттів нежорстких дорожніх та аеродромних покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науково-технічний збірник*. 2016. Вип. 98. С. 29-41

50. Dony, A., Colin, D., Bruneau, D., Drouadaine, I., Navaro, J. Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent / Construction and Building Materials, 2013. Volume 41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.031>
51. Рыбьев И. А. Асфальтовые бетоны. М.: Высшая школа, 1969. 399 с.
52. Рыбьев И. А. Основные принципы регулирования свойств строительных материалов с конгломератным типом структуры – асфальтобетона и других // Конференция по вопросам технологии асфальтового бетона. – Харьков, 1963. – С. 7-10.
53. Золотарёв В. А. Закономерности деформирования и разрушения битумов и асфальтобетонов как основа улучшения и регулирования их свойств: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / ВЗИСИ. – М., - 1983. – 39 с.
54. Терещенко Т. А. Шляхи розвитку технологій гарячого ресайклінгу дорожнього асфальтобетону // Автошляховик України. 2014. № 2. С. 42-48. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2014_2_13
55. Flores, G., Gallego, J., Giuliani, F., Autelitano, F. Aging of asphalt binder in hot pavement rehabilitation // Construction and Building Materials, 2018. Volume 187. P. 214 – 219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.216>
56. Cox, B. C. Case Study of High-Traffic In-Place Recycling on U.S. Highway 49: Multiyear Performance Assessment // Journ. Of Transportation Engineering, 2016, Volume 142. № 12. 05016008. 12 p. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000900>
57. Navaro, J., Bruneau, D., Drouadaine, I., Colin, J., Dony, A., Cournet, J. Observation and evaluation of the degree of blending of reclaimed asphalt concretes using microscopy image analysis // Construction and Building Materials, 2012. Volume 37. P. 135–143 URL: https://www.researchgate.net/publication/257389286_Observation_and_evaluation

_of_the_degree_of_blending_of_reclaimed_asphalt_concretes_using_microscopy_image_analysis

58. Сюньи Г. К., Усманов К. Х., Файнберг Э. С. Регенерированный дорожный асфальтобетон. М.: Транспорт, 1984. 118 с.

59. Золотарёв В. А. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Часть II. Дорожные асфальтобетоны // В. А. Золотарёв. – Харьков: ХНАДУ, 2016. 204 с.

60. Дорожный асфальтобетон / Л. Б. Гезенцевей, Н. Н. Иванов, И. В. Королёв, А. М. Богуславский, Н. В. Горелышев / Под ред. Л. Б. Гезенцева. М.: Транспорт, 1976. 336 с.

61. Xuelian Li, Xinchao Lv, Yuhao Zhou, Zhanping You, Yuliang Chen, Zhijing Cui, Aboelkasim Diab. Homogeneity evaluation of hot in-place recycling asphalt mixture using digital image processing technique [Текст] // Journal of Cleaner Production, 2020. Volume 258. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620305710#>

62. Ma, Y., Polaczyk, P., Park, H., Jiang, X., Hu, W., Huang, B. Performance evaluation of temperature effect on hot in-place recycling asphalt mixtures // Journal of Cleaner Production, 2020. Volume 277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124093>

63. Liu, Y., Wang, H., Tighe, S., Zhao, G., You, Z. Effect of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures // Construction and Building Materials, Vol. 226, 2019, P. 288-298 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.277>

64. Han, D., Zhao, Y., Pan, Y., Liu, G., Yang, T. Heating process monitoring and evaluation of hot in-place recycling of asphalt pavement using infrared thermal imaging // Automation in construction, 2020. Volume 111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103055>

65. В.Н. Шестаков, А.Н. Шестаков, Методы теории теплопроводности в транспортном строительстве. Учебное пособие. Омск, 2011. 75 с.

66. Effects of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures [Текст] / Yang Liu, Hainian Wang, Susan L. Tighe, Guangyuan Zhao, Zhanping You// Construction and Building Materials, 2019. Volume 226. P. 288-298. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819319506#ab005>
67. Liu, Y., Wang, H., Tighe, S., Pickel, D., You, Z. Study on impact of variables to pavement preheating operation in HIR by using FEM, Construction and Building Materials, Vol. 243, 2020 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118304>
68. Slavinska, O. Development of a model of the weight of motor roads parameters as part of the information and management system of monetary evaluation [Текст] / Slavinska, O., Stozhka, V., Kharchenko, A., Bubela, A., Kvatadze, A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Volume 1, Issue 3-97. P. 46–59. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156519> <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/156519/159962>
69. Slavinska, O. Development of a mathematical model of evaluation of road-andtransport assets as a component of information-and-management system [Текст] / Slavinska, O., Savenko, V., Kharchenko, A., Bubela, A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. Volume 6, Issue 4-90. P. 45–57. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118798>
<http://journals.uran.ua/eejet/article/view/118798>
70. Нечаєв, В.П. Теорія планування експерименту: навч. посіб.// В.П. Нечаєв, Т.М. Берідзе, В.В. Кононенко, Н.В. Рябушенко, О.М. Брадул – Київ: Кондор, 2005.
71. Грабовецкий Б. Є. Основы економічного прогнозування: Навч. посібник. Вінниця: ВФ ТАНГ, 2000. 209 с.
72. Коробов В. Б. Сравнительный анализ методов определения весовых коэффициентов «влияющих факторов». Методология, методы, математические модели. М.: 2005. №20. С 54-73.

73. Новосад В. П., Селіверстов Р. Г. Методологія експертного оцінювання. К.: НАДУ, 2008. 48 с.
74. Трасковецька Л. М., Боровик Л. В., Боровик О. В. Автоматизація математичних методів експертних оцінок: збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. 2013. Вип. 2. С. 373-384.
75. Донець Л. І., Шепеленко О. В., Баранцева С. М., Сергєєва О. В., Веремейчик О. Ф. Обґрунтування господарських рішень та оцінювання ризиків: Навч. Посібник. К.: Центр учбової літератури, 2012. 472 с.
76. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
77. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. 416 с.
78. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика/ Пер. с немец. Л. Н. Большова. Под ред. Н. В. Смирнова. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. 435 с.
79. Гайдышев И. Анализ и обработка данных. Специальный справочник. СПб: Питер, 2001. 752 с.
80. ДСТУ Б В.2.7-119:2011. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. – Чинний від 2012.10.01. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012. – 39 с.
81. 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.
82. 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.

83. ДСТУ Б В.2.7-319:2016. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. – Чинний від 2017.04.01. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. – 75 с.

84. Полный факторный эксперимент: Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Моделирование и оптимизация технологии полимерных материалов» для студентов очной и заочной форм обучения специальности 240502.65. Саратов, СГТУ, 2009. - 20 с.

85. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. М.: Металлургия, 1968. 155 с.

86. Планирование эксперимента в технологии дорожного строительства. Методические указания для студентов дорожно-строительного факультета (специальность АД и ГД). Омск: Сибирский автомобильно-дорожный институт им. В.В. Куйбышева, 1978.

87. Волков М. И., Борщ И. М., Грушко И. М., Королев И. В. Дорожно-строительные материалы (5-е изд., испр. и доп.). М.: Транспорт, 1975. 528 с.

88. Брайд Й. Нелинейное оценивание параметров/ Пер. С англ. В. С. Дуженко, Е. С. Фоминой. Под ред. В. Г. Горского. М.: Статистика, 1979. 349 с.

89. Бродский В. З. Введение в факторное планирование эксперимента. М.: Наука, 1976. 224 с.

90. Грушко И. М., Сиденко В. М. Основы научных исследований (3-е изд., испр. и доп.). Х.: Вища школа, 1983. 224 с.

91. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.

92. Шипицын В. В. Обоснование технологии ремонта асфальтобетонных покрытий методом холодного ресайклинга с применением медленнотвердеющих минеральных вяжущих и разжиженного битума:

автореферат дис. кандидата технических наук: 05.23.11 / Сиб. автомобил.-дорож. акад. (СибАДИ). Омск, 2006. 20 с.

93. Гончаренко В.В. Многокомпонентное каменноугольное вяжущее с широким интервалом пластичности // Дис. ... канд. техн. наук. – Макеевка, 2001. – 127 с.

94. В. З. Аладьев. Основы программирования в Maple. Таллинн, 2006. 301 с.

95. AASHTO T 324, 2019 Edition, 2019 – Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures. 14 p.

96. ДСТУ EN 12697-22:2018 Бітумомінеральні суміші. Методи випробування гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 22. Колійність (EN 12697-22:2003+A1:2007, IDT). – Чинний від 2019.07.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019. – 21 с.

97. ДСТУ EN 13108-20:2018 Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 20. Методи типових випробувань (EN 13108-20:2016, IDT). – Чинний від 2019.10.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019. – 29 с.

98. ДСТУ EN 13108-8:2018 Бітумомінеральні суміші. Технічні умови. Частина 8. Регенований асфальтобетон (EN 13108-8:2016, IDT). – Чинний від 2019.07.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019. – 10 с.

99. Методические рекомендации по испытанию уплотненных асфальтобетонных смесей прокатыванием нагруженного колеса по гамбургскому методу/ разраб. Рабочей группой секции № 4 «Стандартизация, повышение качества и внедрение новых технологий, техники и материалов» Научно-технического совета Федерального дорожного агентства. М.: ФГБУ «Информавтодор», 2018. 20 с.

100. Tsai, B.-W., Coleri, E., Harvey, J. T., Monismith, C. L. Evaluation of AASHTO T 324 Hamburg-Wheel Track Device test // *Construction and Building Materials*, 2016. Volume 114. P. 248-260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.171>
101. Javilla, B., Mo, L., Benan, F. H., Wu, S.S. Multi-stress loading effect on rutting performance of asphalt mixtures based on wheel tracking testing // *Construction and Building Materials*, 2017. Volume 148. P. 1 – 9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.182>
102. Р В 2.3-218-02071168-781:2011 Рекомендації щодо визначення товщини конструктивних шарів існуючого дорожнього одягу [Текст]. – Рекомендовано Науковою радою Укравтодору (Офіційний документ державного агентства автомобільних доріг України)
103. 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.
104. Нагайчук В.М., Ілляш С.І., Терещенко Т.А. Особливості гарячого ресайклінгу на дорозі зі зміною гранулометричного складу асфальтобетонної суміші. *Автошляховик України*. 2018. № 4. С. 20-27.
105. 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.
106. МР В.2.3-03450778-847:2014. Методичні рекомендації з техніко-економічного порівняння конструкцій дорожнього одягу різного типу. [Текст]. – Рекомендовано Науковою радою Укравтодору (Офіційний документ державного агентства автомобільних доріг України)
107. СОУ 42.1-37641918-085:2018. Автомобільні дороги. Правила визначення вартості робіт з поточного ремонту та експлуатаційного

утримання. [Текст]. – Чинний від 2019.01.01. – Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2018. 45 с.

108. ДСТУ Б Д.2.2-27:2016. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Автомобільні дороги (Збірник 27). [Текст]. – Чинний від 2017.01.01. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 86 с.

109. ДСТУ Б Д.2.7-1:2012 «Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів. [Текст]. – Чинний від 2017.04.01. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 75 с.

110. СОУ 42.1-37641918-034:2018. Дорожні машини та механізми. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин і механізмів. [Текст]. – Чинний від 2018.01.04. – Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2018. 42 с.

111. СОУ 42.1-37641918-035:2018. Автомобільні дороги. Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. [Текст]. – Чинний від 2018.04.01. – Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2018. 361 с.

112. ДСТУ-Н Б Д.1.1-6:2013. Настанова щодо розроблення ресурсних елементних кошторисних норм на будівельні роботи. [Текст]. – Чинний від 2014.01.01. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 45 с.

113. МР В.2.3.2-218-03449261-468:2005. Методичні рекомендації з проектування і перевірки розрахунково-аналітичним та розрахунково-дослідницьким методом технічно обґрунтованих норм часу на механізовані будівельні і ремонтно-будівельні роботи в дорожньому господарстві. [Текст]. – Рекомендовано Науковою радою Укравтодору (Офіційний документ державного агентства автомобільних доріг України)

114. Методика визначення обсягу фінансування будівництва, реконструкції, ремонту та утримання автомобільних доріг, затверджена

наказом Міністерства інфраструктури України, Міністерства фінансів України від 21 вересня 2012 року № 573/1019, зареєстрована в Міністерстві Юстиції України 16 жовтня 2012 року за № 1743/22046. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1734-12/print>

115. ВБН Г.1-218-050-2001. Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування. [Текст]. – Чинні від 2002.01.01. – Київ: Українська державна корпорація по будівництву, ремонту та утриманню автомобільних доріг, 2001. 7 с.

116. ДСТУ 4044:2019 Бітуми нафтові дорожні в'язкі. Технічні умови. [Текст]. – Чинний від 2020.05.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2020. 15 с.

117. ДСТУ Б В.2.7-34-2001. Будівельні матеріали. Щебінь для будівельних робіт із скельних гірських порід та відходів сухого магнітного збагачення залізистих кварцитів гірничо-збагачувальних комбінатів і шахт України. Технічні умови [Текст]. – Чинний від 2002.04.01. – Київ: Держбуд України, 2001. 36 с.

118. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови [Текст]. – Чинний від 1999-01-01. - К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1999. 39 с.

119. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови [Текст]. – Чинний від 1996-01-01. - К.: Держкоммістобудування України, 1996. 44 с.

120. ДСТУ Б В.2.7-33-2001. Пісок кварцево-залізистий і тонкодисперсна фракція для будівельних робіт з відходів гірничо-збагачувальних комбінатів України. Технічні умови [Текст]. – Чинний від 2002-04-01. - К.: Держбуд України, 2001. 39 с.

121. ДСТУ Б В.2.7-121:2014 Порошок мінеральний для асфальтобетонних сумішей. Технічні умови [Текст]. – Чинний від 2015-01-01. – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 31 с.

122. Р В.3.2-03450778-837:2014 Рекомендації з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі [Текст]. – Рекомендовано Науковою радою Укравтодору; протокол від 03.12.2014 № 2. 28 с.

123. СОУ 42.1-37641918-087:2019 Автомобільні дороги. Інженерно-технічний супровід будівництва об'єктів дорожнього господарства. [Текст]. – Чинний від 2019.04.01. – Київ: Державне агентство автомобільних доріг України, 2019. 141 с.

124. ДСТУ EN 1426:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення глибини проникності голки (пенетрації) (EN 1426:2015, IDT) [Текст]. – Чинний від 2019.05.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. 14 с.

125. ДСТУ EN 1427:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення температури розм'якшеності за методом кільця і кулі (EN 1427:2015, IDT) [Текст]. – Чинний від 2019.06.01. – Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»), 2019. 14 с.

126. Nagaychuk V., Illiash S., Tereshchenko T. Experience on implementation of Hot in-place recycling of asphalt concrete in Ukraine // Автошляховик України, 2018. № 4. С. 28-36. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2018-4-256-28-36>

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

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

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

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

130. ТТК 37641918/03450779-174:2014. Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі методом «Ремікс». Київ, 2014. 21 с.

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

132. Р В.2.3-37641918-899:2018. Рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі без зміни та зі зміною складу асфальтобетону. [Текст]. – Рекомендовано Науковою радою Укравтодору (Офіційний документ державного агентства автомобільних доріг України) Київ, 2014. 38 с.

ДОДАТОК А
РОЗРАХУНОК РЕСУРСНИХ КОШТОРИСНИХ НОРМ

Назва норми: **Регенерація конструктивних шарів дорожнього одягу за технологією гарячої регенерації на дорозі⁷**

Склад робіт: 1. Очищення асфальтобетонного покриття. 2. Регенерація асфальтобетонного шару дорожнього одягу: розігрівання покриття, розпушення покриття на глибину до 6 см, перемішування в змішувачі реміксера розпушеного матеріалу, укладання, розрівнювання, попереднє ущільнення суміші та опорядження поверхні покриття. 4. Ущільнення асфальтобетонної суміші котками.

Вимірник: 1000 м²

Відновлення асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг методом Remix, при ширині укладання 3,5 м

Шифр ресурсу	Найменування ресурсу	Одиниця виміру	Показник
1	2	3	4
1	Витрати труда робітників-будівельників	люд.год	27,54
2	Середній розряд робіт		3,7
3	Витрати труда машиністів	люд.год	31,43
	М а ш и н и і м е х а н і з м и		
212-2219	Машина для гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу	маш.год	5,29
212-2220	Термічна установка для розігріву асфальтобетонного покриття	маш.год	5,29
212-0101	Автогудронатори, місткість 3500 л	маш.год	0,47
212-0907	Котки дорожні самохідні вібраційні гладковальцеві, маса 13 т	маш.год	1,43
212-1601	Машини поливально-мийні, місткість 6000 л	маш.год	0,06
215-3102	Котки дорожні самохідні гладкі, маса 10 т	маш.год	2,55
	М а т е р і а л и		
111-1556	Бітуми нафтові дорожні в'язкі БНД 70/100, БНД 100/150	т	3,0
1546-0067	Пропан-бутанова суміш	т	П

⁷ У додатку наведено фрагмент розрахованих і затверджених ресурсних кошторисних норм. Ресурсні елементні кошторисні норми увійшли до ДСТУ Б Д.2.2-27:2016 «Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Автомобільні дороги (Збірник 27)».

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА РОЗРАХУНОК 1

до ресурсної елементної кошторисної норми на відновлення асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг з використанням машини реміксер WIRTGEN RP/RC 4500 у складі із термічною установкою WIRTGEN HM 4500

1. ВСТУПНА ЧАСТИНА

Метод спостереження: фотооблік графічно-змішаний з точністю до 1 хв.
Метеорологічні умови: ясно, t = 20 °С...22 °С.

2. ВСТАНОВЛЕННЯ НОРМАЛІ ПРОЦЕСУ

Нормаль проектується на підставі вивчення технічної документації на процес та результатів технічного нормування.

2.1 Машини і механізми:

- машина для гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу Реміксер Wirtgen RP/RC 4500;
- термічна установка для розігріву асфальтобетонного покриття Wirtgen HM 4500;

Норма часу на відновлення асфальтобетонних покриттів розраховувалась на підставі нормативних спостережень, проведених способом змішаного фотообліку. Спостереження виконувались безпосередньо в процесі роботи.

2.2 Результати роботи машин і механізмів при відновленні асфальтобетонних покриттів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

№	Найменування елементу нормованого процесу	Тривалість, хв.	Витрати праці робітників-будівельників, люд.-хв	Кількість виконаної продукції	Кількість виконавців, чол.
1	2	3	4	5	6
1	Заправлення машин газом: реміксер Wirtgen RP/RC 4500; термічна установка HM 4500.	78 (78) (78)	-	1 раз	- (4) (1)
3	Відновлення асфальтобетонних покриттів автомобільних при ширині укладання 3,5 м методом Remix: реміксер Wirtgen RP/RC 4500; термічна установка HM 4500.	54 (54) (54)	324	233 м ²	6 (4) (1)

3. ПРОЕКТУВАННЯ ВИТРАТ ТРУДА Й ЧАСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИН І МЕХАНІЗМІВ

Таблиця 2

№	Найменування елемента	Головний вимірник процесу	Вимірник елемента	Витрати праці й час використання машин, люд.-хв (маш.-хв)	Обсяг виконаної продукції	Кількість продукції, що доводиться на 60 люд.-хв $(\frac{кол.6}{кол.5} \cdot 60 \text{ хв})$	Витрати праці й часу використання машин на вимірник елемента, люд.-хв $(\frac{60 \text{ хв}}{зр.7})$	Коефіцієнт переходу на головний вимірник процесу	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Заправлення машин газом: реміксер Wirtgen RP/RC 4500; термічна установка НМ 4500.	1000 м ²	1 раз	78	1	0,77	78	1	
3	Відновлення асфальтобетонних покриттів автомобільних при ширині укладання 3,5 м методом Remix: реміксер Wirtgen RP/RC 4500; термічна установка НМ 4500.	1000 м ²	1000 м ²	324	0,233	0,0432	1388,89	1	

3.1 Проектування витрат на підготовчо-заключну роботу

Витрати робочого часу на підготовчо-заключну роботу, що включаються в норми витрат праці сумарно враховують витрати робочого часу на підготовчо-заключну роботу «на зміну» і «на завдання», як правило, виражаються у відсотках до нормованих витрат часу й визначаються по нормативах Мінрегіону України.

Величину витрат на ПЗР прийнято відповідно до нормативів на аналогічні види робіт у розмірі 6 %.

Час перерв, пов'язаних із щозмінним технічним доглядом за машиною врахований при виконанні хронометражних спостережень.

3.2 Проектування витрат на відпочинок і особисті потреби

Витрати на відпочинок і особисті потреби робітників ураховують міру праці при виконанні конкретного будівельно-монтажного процесу й оцінюються за ступенем сумарного впливу виробничих факторів умов праці, викликаних технологією й організацією даного процесу. Як правило, виражаються у відсотках до нормованих витрат часу й визначаються по нормативах Мінрегіону України.

Величину витрат на відпочинок і особисті потреби приймаємо відповідно до діючих нормативів на аналогічні види робіт у розмірі 10 %.

4 РОЗРАХУНОК ПОВНОЇ ВЕЛИЧИНИ НОРМИ

4.1 Заправлення машин газом

Реміксер Wirtgen RP/RC 4500 – $H_{ЧВМ} = 1,55 \text{ маш.год}$

Ланка, що обслуговує реміксер Wirtgen RP/RC 4500 – $H_{ВТМ} = 6,2 \text{ люд.год}$

Термічна установка НМ 4500 – $H_{ЧВМ} = 1,55 \text{ маш.год}$

Машиніст термічної установки НМ 4500 – $H_{ВТМ} = 1,55 \text{ люд.год}$

4.2 Відновлення асфальтобетонних покриттів автомобільних при ширині укладання 3,5 м методом Remix

Робітники-будівельники – $H_{ВТМ} = 27,56 \text{ люд.год}$

Реміксер Wirtgen RP/RC 4500 – $H_{ЧВМ} = 4,59 \text{ маш.год}$

Ланка, що обслуговує реміксер Wirtgen RP/RC 4500 – $H_{ВТМ} = 18,36 \text{ люд.год}$

Термічна установка НМ 4500 – $H_{ЧВМ} = 4,59 \text{ маш.год}$

Машиніст термічної установки НМ 4500 – $H_{ВТМ} = 4,59 \text{ люд.год}$

Зведена калькуляція

витрат труда робітників та часу використання машин, механізмів і механізованого інструменту

Найменування процесу: Відновлення асфальтобетонних покриттів автомобільних доріг методом Remix при ширині укладання 3,5 м

Вимірник: 1000 м²

I. Витрати труда робітників										
№	Обґрунтування норм	Назва технологічної операції	Одиниця виміру технологічної операції	Обсяг робіт	Кількісний та кваліфікаційний склад ланки робітників		Витрати труда робітників на одиницю виміру, люд.-год	Час експлуатації машин на одиницю виміру, маш.год	Витрати труда робітників на обсяг, люд.год	Час експлуатації машин на обсяг, маш.год
					розряд	кількість				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	СОУ 42.1-37641918-097:2017 п. 5.2 Таблиця 5.2 № 1	Очищення слабозабрудненого асфальтобетонного покриття від пилу, сухого сміття та бруду: машини поливально-мийні.	1000 м ²	1	-	-	-	0,05	-	0,05

Продовження зведеної калькуляції

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	СОУ 42.1-37641918-098:2017 п. 9.7 Таблиця 9.8	Наповнення цистерни автогудронатора бітумом: автогудронатор, місткість 3500 л.	1 т	3,0	-	-	-	0,14	-	0,42
3	Розрахунок 1	Заправлення машин газом: Машина для гарячої регенерації термічна установка	1 раз	0,45	-	-	-	1,55 1,55	-	0,70 0,70
4	Розрахунок 1	Регенерація асфальто-бетонного шару дорожнього одягу: Розігрівання покриття, розпушення покриття на глибину до 6 см, перемішування в змішувачі реміксерів зфрезерованого матеріалу, укладання,	1000 м ²	1	5 4 3	1 2 3	4,59 9,18 13,77		4,59 9,18 13,77	

Продовження зведеної калькуляції

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		розрівнювання, попереднє ущільнення суміші та опорядження поверхні покриття, зарівнювання дрібних дефектів та місць спряження смуг: Машина для гарячої регенерації термічна установка						4,59 4,59		4,59 4,59
5	СОУ 42.1- 37641918- 098:2017 п. 5.20 Таблиця 5.27 № 2	Ущільнення асфальтобетонної суміші котком за 6 проходів по одному сліду: Котки дорожні самохідні вібраційні гладковальцеві, маса 13 т	1000 м ²	1	-	-	-	2,28	-	2,28

Продовження зведеної калькуляції

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	СОУ 42.1-37641918-098:2017 п. 5.20 Таблиця 5.27 № 3	Остаточне ущільнення асфальтобетонної суміші котком за 4 проходи по одному сліду: Котки дорожні самохідні гладкі, маса 10 т	1000 м ²	1	-	-	-	1,28	-	1,28
		Всього витрати труда робітників-будівельників							27,540	

II. Середній розряд робіт

$P_c = 3 + \frac{1,296 - 1,186}{1,339 - 1,186} = 3,72 \approx 3,7$	Розряди робітників	Міжрозрядні коефіцієнти	Витрати труда робітників за розрядами, люд.-год	Добуток гр.2·гр.3 (Кс)	Середній міжрозрядний коефіцієнт	Середній розряд робіт
	1	2	3	4	5	6
	3	1,186	13,770	16,331		
	4	1,339	9,180	12,292		
	5	1,542	4,590	7,078		
	Разом:		27,540	35,701	1,296	3,7

Кінець зведеної калькуляції

III. Зведення потреби в машинах, механізмах і механізованому інструменті (з урахуванням непередбачених витрат)							
№	Обґрунтування	Машини та механізми		Коефіцієнт непередбачених витрат	Час експлуатації машин, маш.год		Витрати труда машиністів, люд.год
		Найменування	Кількість		відповідно до калькуляції	який приймається	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	212-2201.24	Машина для гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу	1	1,00	5,29	5,29	21,16
2	270-0240.4	Термічна установка для розігріву асфальтобетонного покриття	1	1,00	5,29	5,29	5,29
3	212-0908.6	Котки дорожні самохідні вібраційні гладковальцеві, маса 13 т	1	1,12	1,28	1,43	1,43
4	215-3102	Котки дорожні самохідні гладкі, маса 10 т	1	1,12	2,28	2,55	2,55
5	212-1601	Машини поливально-мийні, місткість 6000 л	1	1,12	0,05	0,06	0,06
6	212-0101	Автогудронатори, місткість 3500 л	1	1,12	0,42	0,47	0,94
		Разом:					31,43

**Ресурсні кошторисні норми
експлуатації машин та механізмів**

Шифр машин та механізмів	Найменування машин та механізмів	Середній розряд ланки робітників	Витрати труда машиністів	Енергоносії				Мастильні матеріали	Гідравлічна рідина (вода)	Мазут	Витрати ресурсів на 1 маш.год експлуатації	
				Бензин	Дизельне паливо	Електроенергія	Стиснене повітря				ремонті та технічному обслуговуванні	перебазуванні
			люд.год	кг	кг	кВт/год	м³	кг	кг, м³	кг	люд.год	люд.год
212-2201.24	Машина для гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу Реміксер Wirtgen RP\RC 4500	7,1	4	-	14,43	-	-	0,91	2,23	-	1,03	0,46
270-0240.4	Термічна установка для розігріву асфальтобетонного покриття Wirtgen HM 4500	6,8	1	-	2,89	-	-	0,18	0,21	-	0,23	0,12

**Розрахунок ресурсної кошторисної норми експлуатації
машини для гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу Реміксер
Wirtgen RP\RC 4500**

Визначення середнього розряду ланки робітників, зайнятих на керуванні і обслуговуванні приведено в розрахунку 1.

Розрахунок 1
***Середній розряд ланки робітників, зайнятих на керуванні, технічному
обслуговуванні та ремонті***

1.Склад ланки робітників, зайнятих на керуванні, технічному обслуговуванні та ремонті:	
Машиніст машини з гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу	8розряд - 1
Помічник машиніста	7 розряд - 3
Слюсар-гідравлік	6 розряд - 1
Слюсар-моторист	6 розряд - 1
Електрослюсар будівельний	6 розряд - 1
Машиніст газодувних машин(стосовно) (слюсар з газового обладнання)	5 розряд - 1
Електрогазозварник	6 розряд - 1
Налагоджувальник будівельної машини	6 розряд - 1

**Визначення середнього розряду ланки робітників, зайнятих на керуванні,
технічному обслуговуванні та ремонті**

Середній розряд робітників, зайнятих на керуванні, технічному обслуговуванні та ремонті визначається за формулою:

$$P_C = P_H + \frac{K_C - K_H}{K_B - K_H},$$

де P_C – середній розряд ланки робітників, зайнятих на керуванні, технічному обслуговуванні та ремонті;

P_H – розряд, який відповідає нижчому міжрозрядному коефіцієнту по відношенню до середнього міжрозрядного коефіцієнта;

K_C – середній міжрозрядний коефіцієнт;

K_H , K_B – вищий та нижчий міжрозрядні коефіцієнти по відношенню до середнього міжрозрядного коефіцієнта.

Розподіл трудомісткості робітників, зайнятих на керуванні, ремонті, технічному обслуговуванні та перебазуванні машини

Професія	Розряд	Кількість	Трудомісткість (BT_i) люд.год				
			Керування	ТО	Ремонт	Перебаз	Всього
Машиніст	8	1	1,00			0,46	1,460
	7			0,0412	0,0661		0,107
Слюсар-моторист	6	1		0,0412	0,0661		0,107
Слюсар-гідравлік	6	1		0,0412	0,0661		0,107
Електрослюсар	6	1		0,0412	0,0661		0,107
Машиніст газодувних машин(стосовно) (слюсар з газового обладнання)	5	1		0,0412	0,0661		0,107
Електрогазозварник	6	1			0,0661		0,066
Налагоджувальник буд. машин	6	1		0,0412	0,0661		0,107
Всього			4,00	0,371	0,661	0,46	5,49

Професії і розряди робітників прийняті згідно Довідника кваліфікаційних характеристик професій робітників, випуск 64 розд. 1,2,3,4.

Розряди робітників	Міжрозрядні коефіцієнти	Витрати праці робітників за розрядами BT_i , люд.год	Добуток гр.2·гр.3 $\sum(BT_i \cdot K_i)$	Середній міжрозрядний коефіцієнт (K_C) $\frac{\sum_{гр.4}}{\sum_{гр.3}}$	Середній розряд робіт
1	2	3	4	5	6
5	1,542	0,107	0,165		
6	1,797	0,817	1,468		
7	2,075	3,107	6,448		
8	2,394	1,460	3,495		
Разом:		5,491	11,576	2,108	7,1

Відповідно до наведеного повного розрахунку середнього розряду ланки робітників, зайнятих на керуванні, технічному обслуговуванні та ремонті, $P_C = 7,1$.

Розрахунок 2

витрат дизельного палива

Витрати дизельного палива визначаються за формулою:

$$q = q_o \cdot N_E \cdot K_{II} \cdot K_{IIZ} \cdot K_p \cdot 0,001,$$

де q_o – питомі витрати, 212 г/кВт-год;

N_E – потужність двигуна, 180 кВт;

$K_{II} = 0,36$ – коефіцієнт внутрішньозмінного використання (згідно з СОУ 42.1-37641918-094:2017 «Дорожні машини та механізми. Норми витрат паливно-мастильних матеріалів»);

$$K_{II} = K_{ДВ} \cdot K_{ДН},$$

$K_{ДВ}$ – коефіцієнт використання двигуна в часі – 0,60 (згідно з СОУ 42.1-37641918-094:2017);

$K_{ДН}$ – коефіцієнт використання двигуна по потужності – 0,60 (згідно з СОУ 42.1-37641918-094:2017);

$K_{ПЗ} = 1,03$ – коефіцієнт, що враховує витрату палива на запуск і регулювання роботи двигуна, а також щозмінне ТО машини на початку зміни;

$K_p = 1,02$ – коефіцієнт приведення витрати палива до середньорічного;

0,001- перевідний коефіцієнт грамів у кілограми.

Розрахунок 3

витрат мастильних матеріалів

Оскільки, в інструкції з експлуатації та в існуючій нормативній базі, відсутні дані про витрати мастильних матеріалів даної машини, то для машин та установок з дизельним двигуном пропонується застосовувати коефіцієнти 0,044, 0,004, 0,015 («Методичні рекомендації по розробці ресурсних елементних кошторисних норм», розроблені Українським державним науково-дослідним центром ціноутворення в будівництві «Цінобуд» і схвалені рішенням Науково-технічної ради Держбуду України від 12.04.2002) до норми витрат дизельного палива відповідно на моторні, пластичні та трансмісійні мастила.

Норма витрат дизельного пального згідно розрахунку 2 складає 14,43 кг/маш.год, тому використовуючи відповідні коефіцієнти знаходимо витрати мастильних матеріалів:

$14,43 \times 0,044 = 0,63$ кг/маш.год – витрати моторного мастила;

$14,43 \times 0,004 = 0,06$ кг/маш.год – витрати пластичного мастила;

$14,43 \times 0,015 = 0,22$ кг/маш.год – витрати трансмісійного мастила.

$0,63 + 0,06 + 0,22 = 0,91$ кг/маш.год – витрати мастильних матеріалів/

Розрахунок 4

визначення витрат гідравлічної рідини

Якщо періодичність заміни гідравлічних рідин інструкцією з експлуатації машини даної типорозмірної групи встановлена в мото-год, витрати (Γ) визначаються за формулою:

$$\Gamma = \frac{O \cdot D_{\Gamma} \cdot K_{\Gamma} \cdot P_{\Gamma}}{T},$$

де O – середньозважений показник місткості (ємності) гідравлічної системи машин даної типорозмірної групи, л, встановлюється за паспортними даними машини, $O = 1300$ л;

D_r – щільність гідравлічної рідини - 0,87 кг/л; Коефіцієнт використовують за необхідністю перерахування літрів в кг.

K_d – коефіцієнт доливання гідравлічної рідини, що заповнюють систематичні її витоки при роботі машини.

Для імпортованих машин показник (K_d) приймається по рекомендаціях виготовлювачів чи на основі вимірів обсягів фактичних витоків гідравлічної рідини;

При відсутності необхідних даних показник (K_d) приймається рівним до 1,5.

P_r – періодичність заміни гідравлічної рідини;

T – річний режим роботи машини, маш.год.

$$G = \frac{1300 \cdot 0,87 \cdot 1,5 \cdot 1,0}{760} = 2,23 \text{ кг / маш.год}$$

Розрахунок 5

витрат на ремонт та технічне обслуговування

Витрати праці на ремонт, діагностування і технічне обслуговування машин визначаються за формулою:

$$B_{TP} = \frac{TP_{TO-1} \cdot N_{TO-1} + TP_{TO-2} \cdot N_{TO-2} + TP_{PP} + TP_K}{Ц_P} \cdot K_{II} + \frac{TP_{CO} \cdot N_{CO}}{T},$$

де TP_{TO-1} , TP_{TO-2} , TP_{PP} , TP_K – трудомісткість відповідно технічного обслуговування ТО-1, ТО-2, поточного -П ремонту, капітального ремонту;

N_{TO-1} , N_{TO-2} , N_{PP} – кількість відповідно технічного обслуговування ТО-1, ТО-2, поточного ремонту в повному ремонтному циклі;

$Ц_P$ – повний ремонтний цикл, мото-год;

K_{II} – коефіцієнт внутрішньозмінного використання будівельних машин.

Враховуючи високу конструктивну складність машини з гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу типу Реміксер Wirtgen RP/RC 4500, наявність збільшеної кількості приводів робочих органів і систем керування, точок змащення, а також важкий режим її роботи, трудомісткість виконання робіт з технічного обслуговування, діагностування і ремонту багаторазово перевищує аналогічні показники широко використовуваної будівельної техніки.

У зв'язку з відсутністю у діючій нормативній базі (СОУ 42.1-37641918-041:2015 Дорожні машини та механізми. Правила технічної експлуатації) показників періодичності і трудомісткості проведення технічних обслуговувань і ремонтів машини з гарячої регенерації конструктивних шарів дорожнього одягу типу Реміксер Wirtgen RP\RC 4500, визначаємо її аналоги, тобто автономні машини і механізми, для яких є необхідні показники та порівнюємо їх конструктивні особливості. Найближчий по конструктивним особливостям ремонтний цикл асфальтоукладальника та циклу для машини для холодного фрезерування. Приймаємо його для машини з гарячої регенерації конструктивних шарів

дорожнього одягу типу Реміксер Wirtgen RP/RC 4500 (стосовно) згідно з СОУ 42.1-37641918-041:2015 (асфальтоукладачі, табл. Д.25, с.59 та машини для холодного фрезерування табл. Д.34, с.68).

Асфальтоукладач

Склад ремонтного циклу

Найменування видів ремонту та технічного обслуговування	Періодичність, маш.год.	Кількість у ремонтному циклі	Трудовістість одного ТО і ремонту, люд.год.
ТО -1	50	96	4
ТО-2	250	18	12
ПР	1000	5	380
СО	2 рази на рік	-	16
КР	6000	1	600

$$B_{TP} = \frac{4 \cdot 96 + 12 \cdot 18 + 380 \cdot 5 + 600}{6000} \cdot 0,36 + \frac{2 \cdot 16}{760} = 0,23 \text{ люд.год. / маш.год.}$$

Машини для холодного фрезерування покриттів

Склад ремонтного циклу

Найменування видів ремонту та технічного обслуговування	Періодичність, маш.год	Кількість у ремонтному циклі	Трудовістість одного ТО і ремонту, люд.год
ТО-1	50	16	13,6
ТО-2	250	3	50
П	1000	1	1420
СО	2 рази на рік	-	61

$$B_{TP} = \frac{13,6 \cdot 16 + 50 \cdot 3 + 1420}{1000} \cdot 0,36 + \frac{61 \cdot 2}{760} = 0,80 \text{ люд.год / маш.год}$$

$$\sum B_{TP} = 0,23 + 0,8 = 1,03 \text{ люд.год / маш.год}$$

Розрахунок 6***витрат на перебазування***

Витрати труда робітників, які зайняті на перебазуванні машини, на 1 маш.год експлуатації ($BT_{\text{ПЕР}}$), визначають за формулою:

$$BT_{\text{ПЕР}} = \frac{T_{\text{ПЕР}} \cdot T_M}{T} \cdot N_M,$$

$T_{\text{ПЕР}}$ - середня тривалість перебазування машини;

$T_{\text{ПЕР}} = 2,9 \cdot 8 \cdot 2 = 46,4 \text{ год.}$ – середня тривалість перебазування машини; 8 год. – тривалість зміни;

N_M - кількісний склад ланки робочих, які зайняті на монтажі, демонтажі машини
 $N_M = 2$;

T – річне нормативне напрацювання машини, згідно СОУ 42.1-37641918-064:2019,
 $T = 760 \text{ маш.год.}$;

T_M - тривалість монтажу, демонтажу, навантаження та розвантаження (в результаті хронометражних спостережень визначено, що $T_M = 41,5 \text{ люд.год.}$).

$$BT_{\text{ПЕР}} = \frac{46,4 + 41,5}{760} \cdot 4 = 0,46 \text{ люд.год / маш.год}$$

За аналогічним алгоритмом розраховано ресурсну кошторисну норму експлуатації термічної установки для розігріву асфальтобетонного покриття.

ДОДАТОК Б
РОЗРОБЛЕНІ ГАЛУЗЕВІ НОРМАТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ
ДОКУМЕНТИ

**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)**

Державне підприємство
«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
(ДП «ДерждорНДІ»)

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою Укравтодору
Протокол від "03" 12 2014 р. № 2

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою
ДП «ДерждорНДІ»
Протокол від "20" 11 2014 р. № 4

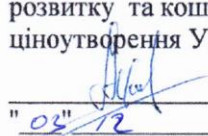
ТИПОВА ТЕХНОЛОГІЧНА КАРТА

на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного
покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі методом «Ремікс»

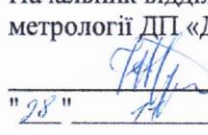
ТТК 37641918/03450779-174:2014

ПОГОДЖЕНО

Начальник Відділу інноваційного
розвитку та кошторисного
ціноутворення Укравтодору

 А.О. Цинка
"03" 12 2014 р.

Начальник відділу стандартизації та
метрології ДП «ДерждорНДІ»

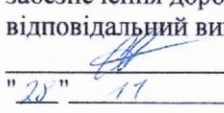
 М.М. Стулій
"28" 11 2014 р.

РОЗРОБЛЕНО

Директор ДП «ДерждорНДІ»
 В.М. Нагайчук
"28" 11 2014 р.

Заступник директора з наукової роботи
А.О. Безуглий
"28" 11 2014 р.

Завідувач відділу нормативно-
технологічного забезпечення дорожніх
робіт, науковий керівник
С.І. Ілляш
"28" 11 2014 р.

Мол. науковий співробітник відділу
нормативно-технологічного
забезпечення дорожніх робіт,
відповідальний виконавець
 А.Я. Свистун
"28" 11 2014 р.

**Київ
2014**



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)
 Державне підприємство
 «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
 (ДП «ДерждорНДІ»)

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою Укравтодору
 Протокол від "03" 12 2014 р. № 2

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою
 ДП «ДерждорНДІ»
 Протокол від "24" 11 2014 р. № 8

ТИПОВА ТЕХНОЛОГІЧНА КАРТА
на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного
покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі методом
«Ремікс плюс»

ТТК 37641918/03450778-183:2014

ПОГОДЖЕНО

Начальник Відділу інноваційного
 розвитку та кошторисного
 ціноутворення Укравтодору

А.О. Цинка
 "03" 12 2014 р.

Начальник Управління
 експлуатаційного утримання доріг та
 безпеки руху

О.В. Федоренко
 "03" 12 2014 р.

Директор Департаменту розвитку доріг

С.Ю. Цепелєв
 "03" 12 2014 р.

Начальник відділу стандартизації та
 метрології ДП «ДерждорНДІ»

М.М. Стулій
 "28" 11 2014 р.

РОЗРОБЛЕНО

Директор ДП «ДерждорНДІ»

В.М. Нагайчук
 "28" 11 2014 р.

Заступник директора з наукової роботи

А.О. Безуглий
 "28" 11 2014 р.

Завідувач відділу нормативно-
 технологічного забезпечення дорожніх
 робіт, науковий керівник

С.І. Ілляш
 "28" 11 2014 р.

Мол. науковий співробітник відділу
 нормативно-технологічного
 забезпечення дорожніх робіт,
 відповідальний виконавець

А.Я. Свистун
 "28" 11 2014 р.

Київ
2014



**ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)
Державне підприємство
«Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна»
(ДП «ДерждорНДІ»)**

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою Укравтодору
Протокол від "03" 12 2014 р. № 2

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою
ДП «ДерждорНДІ»
Протокол від "20" 11 2014 р. № 7

**РЕКОМЕНДАЦІЇ
З ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ШАРІВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО
ПОКРИТТЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ГАРЯЧОГО РЕСАЙКЛІНГУ НА
ДОРОЗІ**

Р В.3.2-03450778-837:2014

ПОГОДЖЕНО

Начальник Відділу інноваційного
розвитку та кошторисного
ціноутворення Укравтодору

_____ А.О. Цинка
" 03 " 12 2014 р.

Начальник відділу стандартизації та
метрології ДП «ДерждорНДІ»

_____ М.М. Стулій
" 28 " 11 2014 р.

РОЗРОБЛЕНО

Директор ДП «ДерждорНДІ»
_____ В.М. Нагайчук
" 28 " 11 2014 р.

Заступник директора з наукової
роботи

_____ А.О. Безуглий
" 28 " 11 2014 р.

Завідувач відділу нормативно-
технологічного забезпечення дорожніх
робіт, науковий керівник

_____ С.І. Ілляш
" 28 " 11 2014 р.

Завідувач відділу конструкцій
дорожнього одягу

_____ С.К. Головка
" 28 " 11 2014 р.

Мол. науковий співробітник відділу
нормативно-технологічного
забезпечення дорожніх робіт,
відповідальний виконавець

_____ А.Я. Свистун
" 28 " 11 2014 р.

**Київ
2014**

**УКРАВТОДОР
ФОНД**
Галузевих будівельних норм
та нормативних документів
КОНТРОЛЬНИЙ ПРИМІРНИК

ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ УКРАЇНИ
(УКРАВТОДОР)

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний
інститут імені М.П. Шульгіна»
(ДП «ДерждорНДІ»)

РЕКОМЕНДОВАНО

Науковою радою Державного агентства
автомобільних доріг України

(Укравтодор)

Протокол від «12» 12 2018 р. № 2

РЕКОМЕНДОВАНО

Науково-технічною радою

ДП «ДерждорНДІ»

Протокол від «29» 11 2018 р. № 11

РЕКОМЕНДАЦІЇ

З РЕГЕНЕРАЦІЇ ШАРІВ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ ГАРЯЧОГО РЕСАЙКЛІНГУ НА ДОРОЗІ БЕЗ ЗМІНИ ТА ЗІ ЗМІНОЮ СКЛАДУ АСФАЛЬТОБЕТОНУ

P B.2.3-37641918-899:2018

ПОГОДЖЕНО

Завідувач Сектору інноваційного розвитку Укравтодору

« 12 » 12 А. О. Цинка
2018 г.

Директор Департаменту розвитку
мережі доріг /Укравтодору

С.Ю. Цепелев
« 12 » 12 2018 г.

РОЗРОБЛЕНО

В.о. директора ДП «ДерждорНДІ»

« 29 » 11 А.О. Безуглий
2018 р.

Завідувач відділу нормативно-технологічного забезпечення дорожніх робіт науковий керівник

« 29 » 11 С.І. Ілляш
2018 р.

Київ
2018

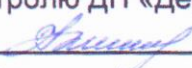
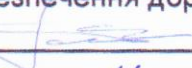
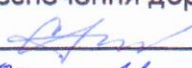
Продовження титульного аркуша на наступній сторінці

Продовження титульного аркуша Р В.2.3-37641918-899:2018

ПОГОДЖЕНО

Начальник відділу стандартизації
та метрології ДП «ДерждорНДІ»
_____ М.М. Стулій
« 29 » _____ 11 2018 р.

РОЗРОБЛЕНО

Головний науковий співробітник
відділу науково-організаційної
роботи, комунікації та внутрішнього
контролю ДП «ДерждорНДІ»
_____ В.М. Нагайчук
« 29 » _____ 11 2018 р.Провідний науковий співробітник
відділу нормативно-технологічного
забезпечення дорожніх робіт
_____ Т.А. Терещенко
« 29 » _____ 11 2018 р.Провідний науковий співробітник
відділу нормативно-технологічного
забезпечення дорожніх робіт
_____ С.К. Головко
« 29 » _____ 11 2018 р.

ДОДАТОК В
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК



ДОВІДКА

про впровадження результатів науково-дослідної роботи

Результати дисертаційної роботи Ілляша С.І. за темою «Удосконалення технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття» впроваджено 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».

Проректор з навчальної роботи НТУ

професор



О.К.Гришук

Декан факультету

транспортного будівництва НТУ,

професор

О.С.Славінська

**Товариство з обмеженою відповідальністю
«СУЧАСНА ТРАНСПОРТНА ІНФРАСТРУКТУРА»
(ТОВ «СТІ»)**

Юр. адреса: 03194, м. Київ, б-р Кольцова, буд. 14/І групи 301-302, приміщення 1, факт. адреса: 03179, м. Київ,
пр. Перемоги, буд. 131, прим. 134, тел.: +38 (044) 299-0661, e-mail: cti.kyiv@gmail.com

вих. № 1090/1 від 21.07.2020 р.

Довідка
про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи
Ілляша Сергія Івановича

Результати дисертаційних досліджень Ілляша С.І., що викладені в наукових публікаціях, отримали впровадження в діяльності ТОВ «СТІ» при виконанні робіт з розігріву асфальтобетонного покриття розігрівачами інфрачервоного випромінювання.

Директор



В.В. ГОНЧАРЕНКО



Д О В І Д К А

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача кафедри
транспортного будівництва та управління майном Національного
транспортного університету
Ілляша Сергія Івановича

Даною довідкою підтверджується, що результати дисертаційної роботи Ілляша С.І. було впроваджено в Державному агентстві автомобільних доріг України (Укравтодор) при виконанні науково-дослідних робіт згідно з договорами № 64-14 від 30 квітня 2014 року «Провести дослідження та розробити рекомендації і типову технологічну карту з відновлення зношеного шару асфальтобетонного покриття за технологією «гарячий» ресайклінг» (№ державної реєстрації 0114U003596) та № 49-17 від 21 серпня 2017 року «Провести дослідження технології гарячий ресайклінг на дорозі та підготувати пропозиції щодо її застосування для різних типів та видів асфальтобетонів» (№ державної реєстрації 0117U001940). В результаті виконання робіт були розроблені:

Р В.3.2-03450778-837:2014 «Рекомендації з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі»

Р В.2.3-37641918-899:2018 «Рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі без зміни або зі зміною складу асфальтобетону»;

ТТК 37641918/03450778-174:2014 «Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі методом Ремікс»;

ТТК 37641918/03450778-183:2014 «Типова технологічна карта на виконання робіт з відновлення зношених шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі методом «Ремікс плюс».

Начальник відділу
інноваційного розвитку



Олександр ТИМОЩУК

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «АБЗ-1»

вул. Борщагівська, буд. 145, офіс 5, м. Київ, 03056

тел. (044) 290-46-60, e-mail: abzavod1@gmail.com

Платник ПДВ на загальних підставах

Код ЄДРПОУ 41190464

Вих. № 446 від 11.08.2020р.

Довідка про впровадження
наукових розробок дисертаційної роботи
Ілляша Сергія Івановича

Наукові розробки та практичні рекомендації дисертаційних досліджень Ілляша С.І. щодо застосування технологій гарячого ресайклінгу асфальтобетону були використані в діяльності ТОВ «АБЗ-1» при встановленні технологічних режимів приготування регенерованого асфальтобетону.

Директор



В.М. Мірошніченко



УКРАВТОДОР

СЛУЖБА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ У ЧЕРНІГІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

вул. Київська, 17, м. Чернігів, 14005
 Тел.(0462) 674-355, факс (0462) 674-355
 E-mail: chernigivroad@ukr.net
 Код ЄДРПОУ 25901106

29.09.2020 № 01-06/2565/05

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження дисертаційних розробок

Ілляша Сергія Івановича

Результати досліджень дисертаційної роботи Ілляша С.І., а саме рекомендації з регенерації шарів асфальтобетонного покриття за технологією гарячого ресайклінгу на дорозі отримали практичне використання при ремонті міжнародної автомобільної дороги державного значення М-01 Київ – Чернігів – Нові Яриловичі, в Чернігівській області.

Заступник начальника

Юрій МАРТИНОВ

ДОДАТОК Г
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

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. *Автошляховик 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. *Автошляховик 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. *Автодорекспо*. Київ, 2014.
11. Головка С.К., Ілляш С.І. Досвід впровадження технологій холодного та гарячої регенерації нежорстких дорожніх одягів. *Автодорекспо*, 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.