Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Національний транспортний університет
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ОНИЩЕНКО АРТУР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 625.7/.8

ДИСЕРТАЦІЯ

НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

Науковий консультант –
Мозговий Володимир Васильович
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність усіх примірників дисертації
Засвідчую
Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02
_____ В. І. Каськів

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Онищенко А.М. Наукові основи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2017.

У дисертаційній роботі наведені наукові основи вирішення наукової та практичної проблеми стосовно підвищення довговічності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини за рахунок забезпечення його стійкості до утворення колії.

На основі критичного аналізу результатів існуючих теоретичних, практичних і експериментальних досліджень з прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів, установлено, що:

- недостатньо вивчено причини та види утворення колії на покритті;

- існуючі математичні моделі і методи з прогнозування утворення колії на покритті не в повній мірі враховують комплексну дію впливових факторів, а також не мають єдиної наукової та методологічної основи;

- відсутні методи розрахунку глибини колії на асфальтобетонному покритті залізобетонних автодорожніх мостів;

- існуючі лабораторні і стендові методи експериментальних дослідження є недосконалими та не повністю враховують вплив конструктивних, технологічних, експлуатаційних факторів на утворення колії покриття;

- недостатньо вивчено комплексну оцінку стійкості асфальтобетону до утворення колії при комбінованому застосуванні різних практичних заходів, що регулюють склад асфальтобетону, технологію його виготовлення та влаштування, параметри конструкції дорожнього покриття з різними видами основ та характеру зчеплення між шарами в залежності, від параметрів транспортного та кліматичного факторів, що не дозволило отримати достатньо ефективних

практичних методів з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття на залізобетонних автодорожніх мостах до утворення колії з урахуванням внутрішніх і зовнішніх факторів.

Систематизація інформації про фактори, що впливають на утворення колії дозволила запропонувати схему причин її утворення та класифікацію їх видів на асфальтобетонному покритті залізобетонних автодорожніх мостів.

Дисертаційна робота побудована на запропонованій автором науковій *ідеї*: утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, головним чином, відбувається від дії вертикального циклічного навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах за рахунок накопичення залишкових пластичних деформацій в конструкції мостового полотна, що опирається на жорстку залізобетонну основу з урахуванням комплексного впливу внутрішніх (структурних, конструктивних технологічних) та зовнішніх (кліматичних, транспортних, експлуатаційних) факторів.

Для досягнення основного наукового результату та встановленої наукової ідеї висунуто *робочу гіпотезу*:

- закономірності накопичення залишкових вертикальних деформацій від дії зовнішніх факторів для прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів можуть базуватись на застосуванні феноменологічної моделі незалежно від виду прояву внутрішніх факторів. Використовуючи такий підхід математична модель може бути отримана на основі застосування положень теорії пружнопластичності при вирішенні задач утворення колії від дії пневматичного колеса, з урахуванням термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону та на основі експериментально встановлених параметрів цієї моделі в умовах, що відображають особливості роботи покриття при певному виду прояву внутрішніх факторів.

У дослідженнях розглянуто комплексну дію основних факторів: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; висока температура асфальтобетону від впливу сонячної радіації та впливу взаємодії пневматичних

коліс з покриттям при їх коченні; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантажень.

Розроблено метод розрахунку утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах від дії циклічних навантажень транспортних засобів при високих температурах. Даний метод базується на розробленій математичній моделі, що базується на застосуванні феноменологічної моделі, що основується на положеннях фундаментальних законів деформованого твердого тіла, зокрема, теорії пружності, пластичності, теорії термов'язкопружності. Це дозволило розробити аналітичні залежності для розрахунку вертикальних залишкових деформацій від повторної дії пневматичних коліс транспортних засобів. Уточнено метод прогнозування температурного режиму асфальтобетону з урахуванням теплового впливу взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні.

Удосконалені аналітичні залежності для показників термов’язкопружних властивостей асфальтобетону з урахуванням властивостей бітумного в’яжучого (пенетрації, температури розм’якшення та індексу пенетрації). Запропоновано аналітичні залежності, які описують термов’язкопружнопластичні властивості асфальтобетону. Формалізовані параметри режиму транспортного навантаження (час дії ti та кількість навантажень Ni).

У роботі запропоновано принципи конструювання асфальтобетонного покриття на залізобетонних автодорожніх мостах. Запропоновано умову граничного стану, що враховує значення допустимої глибини колії з точки зору безпеки руху та сумарної глибини колії, накопиченої за розрахунковий строк служби покриття. Удосконалено існуючі методи лабораторної оцінки стійкості асфальтобетону до утворення колії з використанням інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій.

Розроблено методи та проведено експериментальні лабораторні та стендові дослідження впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних, експлуатаційних факторів з утворення колії на покритті. Експериментально встановлено: параметри термов’язкопружнопластичних властивостей

асфальтобетону; характеристики колієутворення; температуру асфальтобетонного покриття в смузі накату; міцність зчеплення між асфальтобетоном та основою при зсуві. Запропоновано умову граничного стану колії для досліджуваних в лабораторії асфальтобетонів, який становить 5 мм. Встановлено, що при випробувані асфальтобетонів типів А, Б, В, Г (з максимальним розміром щебеню від 5 мм до 20 мм) та щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20), а також литий асфальтобетон (ЛА-10, ЛА-15) мінімальне значення глибини колії відповідає ЩМА-20. Доведено, що модифікація бітуму полімерами дозволяє зменшити глибину колії до 50% в асфальтобетонному покритті за абсолютним значенням при порівнянні однакових типів і видів асфальтобетонів. Не зважаючи на модифікацію бітуму мінімальна глибина колії спостерігається в ЩМА-20 при порівнянні між собою всіх досліджуваних асфальтобетонів.

Запропоновано експериментальний метод визначення міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляційним матеріалом і бетонною основою при зсуві. Експериментально встановлені параметри міцності зчеплення між шарами та покриттям і жорсткою основою для комбінації різних складів асфальтобетонів та гідроізоляційних матеріалів.

Наведено результати чисельного аналізу впливу різних факторі на утворення колії в асфальтобетонному покритті на основі, яких були встановлені основні закономірності залежності колії від рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних та експлуатаційних параметрів з метою розробки ефективних методів підвищення стійкості покриття до утворення колії. Отримано прогнозну поліноміальну модель оцінки величини коліє утворення залежно від найбільш впливових факторів, що дозволяє проаналізувати зміну глибини колії при зміні значень вхідних параметрів та визначити раціональну комбінацію значень вхідних параметрів, які забезпечать мінімальне значення утворення колії.

Результати дисертаційних досліджень є обґрунтованими та достовірними і підтверджуються:

- встановленою експериментальною оцінкою достовірності результатів теоретичних положень (відхилення знаходиться в межах 10 - 25 %);

- достатнім обсягом експериментальних досліджень і повторних вимірювань у дослідах, які задовольняють заданій точності та надійності;

- адекватністю розроблених математичних моделей і даних експериментальних досліджень;

- задовільним рівнем збіжності результатів теоретичних і експериментальних досліджень;

- результатами натурного моделювання інтенсивності утворення колії в асфальтобетонному покритті на кільцевому стенді ДП «Дорожній контроль якості»; результатами натурного спостереження стану покриття на автодорожніх мостах України.

Розроблено практичні методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах. Зокрема розроблено метод проектування асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності, розроблено вимоги до матеріалів покриття та параметрів його конструкції. Розроблені і впровадженні в практику підприємств та організацій дорожньої галузі України рецепти матеріалів, конструкцій покриття, технології його влаштування. За рахунок застосування практичних методів очікується строк служби асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах у порівнянні з існуючим терміном в 1,5 -1,8 рази. Результати досліджень знайшли застосування при розробці 18 нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту, експлуатації асфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах.

Економічний ефект від впровадження наукових результатів досліджень досягається підвищення у 1,7 – 2,3 разів розрахункового строку служби покриття і зменшення витрат у 1,2 рази на їх поточні ремонти та експлуатаційне утримання покриття.

Ключові слова: автодорожній міст, асфальтобетон, бітум, добавка полімерна, колія, покриття, стійкість, структура, температура, термов’язкопружність.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Онищенко А. М, Кузьмінець М. П., Редченко В. П., Тарнопольський Д. Й., Аксьонов С. Ю. Теоретичні та експериментальні дослідження Південного мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві: монографія. К. : НТУ, 2014. 341 с.

2. Онищенко А. М., Кузьмінець М. П., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В. Теоретичні та практичні дослідження ресурсу асфальтобетонного покриття на залізобетонних транспортних спорудах : монографія. К. : НТУ, 2015. 323. с.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

3. Mozgoviy V., Onishchenko A., Kyrienko O., Olhovyi B. Scientific bases of providing of road coverage wholeness on bridges // Zespolone konstrukcje mostowe. 2009. P. 423-436.

4. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колейности / В. В. Мозговой, А. Н. Онищенко, О. В. Прудкий и др. // Дорожная техника. 2010. С.114-128.

5. Онищенко А. Н. Колеестойкость асфальтобетонного покрытия на цементнобетонных основаних // Журнал современных строительных технологий «Красная линия». 2011. Вып. Дороги. № 52. С. 38-41.

6. Онищенко А. М. Методи оцінки колієстійкості асфальтобетону // Slovak international scientific journal : construction and architecture. Slovakia. 2016. № 2 (2). P. 16-26. ISSN 5782-5319.

7. Онищенко А. М. Проектування зернового складу асфальтобетону підвищеної колієстійкості з оптимізацією за показником розрахункового строку служби. *International scientific and practical conference "World science"*. 2017. № 4(20), Vol.2. P. 32-35. ISSN 2413-1032. Видання входить до наукометричних баз даних: Index Copernicus, eLIBRARY.

8. Онищенко А. Н. Влияние различных факторов на интенсивность образования остаточных деформаций виде колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов (часть 1) // Мир дорог. 2013. № 3. С. 2-4.

9. Онищенко А. Н. Влияние различных факторов на интенсивность образования остаточных деформаций виде колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов (часть 2) // Мир дорог. 2013. № 4. С. 28-29.

10. Онищенко А. Н. Причины образования колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов и способы повышения колеестойкости // Дорожная техника. 2013. С. 134-144.

11. Onishchenko A., Kuzminets M., Aksenov S. Analysis of modified bitumen difference polymers // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Motrol. Commission of motorization and energetic in agriculture. Lublin – Rzeszow, 2014. № 8. P. 101-106.

12. Онищенко А. М. Метод розрахунку міцності зчеплення асфальтобетонного покриття з проїзною частиною мосту при зсуві від дії екстреного гальмування транспортного засобу // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. С. 12-19.

13. Мозговой В. В., Онищенко А. Н., Гаркуша Н. В., Белан О. О. Анализ напряжено-деформированного состояния и устойчивости к колееобразованию асфальтобетонного покрытия, испытанного на кольцевом стенде // Мир дорог. 2016. С. 28-32.

Статті у фахових виданнях:

14. Онищенко А. М. Досвід застосування полімерів в дорожньому будівництві // Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2007. № 4. С. 146-153.

15. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А.М. Теоретичні основи термо - реологічної поведінки полімерасфальтобетонів на основі латексів Butonal // Автошляховик України. 2007. - №6. С. 37-40.

16. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А. М. Експериментальні дослідження термо-реологічної поведінки

полімерасфальтобетонів на основі латексів Butonal // Автошляховик України. 2008. № 1. С. 36-39.

17. Випробування конструкцій дорожнього одягу на кільцевому стенді – успіхи, проблеми, перспективи (частина 2) / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Прудкий О. В., Куцман О. М. та ін. // Автошляховик України. 2010. № 4. С. 24-31.

18. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С., Невінгловський В. Ф. Експериментальна оцінка колієстійкості асфальтобетону за допомогою лабораторних установок // Автошляховик України. 2010. № 13. С. 93-100.

19. Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С., Гаркуша М. В. Методика забезпечення колієстійкості асфальтобетонного покриття на цементобетонній основі // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2011. Вип. 1(87). С. 17-25.

20. Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю. Дослідження колійності асфальтобетонів різних типів та видів на бітумному в'яжучому «Полігум» // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. № 46. С. 272-278.

21. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю. Сучасні аспекти підвищення колієстійкості нежорсткого дорожнього одягу // Автошляховик України. 2012. № 5. С. 25-30.

22. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Білан О. О. Експериментальний аналіз впливу мікроволокон на підвищення тріщиностійкості та коліє стійкості асфальтобетонного покриття випробуваного на кільцевому стенді // Автомобільні дорого і дорожнє будівництво. 2013. Вип. 88. С. 89-100.

23. Онищенко А. М. Метод визначення функції зсувостійкості асфальтобетонного покриття на штучних спорудах // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту : Серія «Транспортні системи і технологія». К. : ДЕТУТ, 2013. Вип. 24. С. 52-59.

24. Онищенко А. Н. Выбор гранулометрического состава асфальтобетона повышенной колеестойкости экспериментальным методом для автодорожных

мостов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 56. С. 161-170.

25. Онищенко А. М. Експериментальний метод випробування інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону у вигляді колії // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту : Серія «Транспортні системи і технологія». К. : ДЕТУТ, 2014. Вип. 25. С. 56-62.

26. Онищенко А. М. Оцінка надійності при прогнозуванні величини колії в асфальтобетонному покритті на транспортних спорудах // Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2015. Вип. 15, Частина 1 : Серія «Технічні науки». С. 119-128.

27. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Ольховий Б.Ю., Опрощенко І.О., Куцман О.М., Баран С.А., Різніченко О.С. Оцінка довговічності асфальтобетонного покриття шляхом випробування асфальтобетону на стійкість до накопичення залишкових деформацій // Вісник Національного транспортного університету. 2016. Вип. 34, С.283-293.

28. Онищенко А. М. Теорія колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 96. С. 163-191.

29. Онищенко А. М. Аналіз результатів колійності в литому асфальтобетоні «гусасфальт» // Будівельні матеріали та вироби. 2010. № 1(91). С.72-74.

30. Онищенко А. М. Методологія розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 97. С. 158-182.

31. Онищенко А. М. Практичні методи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до колії на транспортних спорудах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 101. С. 166-182.

32. Онищенко А. М. Математична модель розрахунку колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. Вип. 66. С. 177-183.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

33. Мозговой В. В., Піскунов В. Г., Онищенко А. М, Прудкий О. В., Куцман О. М. Уточнена методика визначення модулів пружності дорожньо-будівельних матеріалів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 33. С. 137-142.

34. Методика оцінки ефективності зчеплення гідроізоляційних матеріалів з асфальтобетонним покриттям на мостах / Мозговой В. В., Онищенко А.М., Жуков О. О., Лаптєва Н. С. та ін. // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 34. С. 67-73.

35. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С. Управління якістю по забезпеченню зсувостійкості та колієстійкості асфальтобетонного покриття на мостах // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2010. Вип. 38. С. 88-97.

36. Mozgoviy V. V., Nevinglovsky V. F., Onishchenko A. M. Investigation of Modified with a Polumer Latex Butonal NS 104 the Bitumen Preparation Parameters Influence on the Paving Bitumen Properties. *Chaina / Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies 2010* Xi'an China (14–16 october 2010). Chan' an University, China, 2010. P. 1-9.

37. Онищенко А. Н. Методика определения колеестойкости асфальтобетонных покритий на бетонних и железобетонных основаних в лаборатории. *Новые дороги Росии* : сб. трудов Международной конференции. Саратов, 2011. С. 91-97.

38. Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю., Раделицька Н. В. Дослідження впливу полімерних матеріалів на підвищення колієстійкості асфальтобетону. *LXVIII Наук. конф. проф.-викл. складу, аспірантів, студ. та співр. відокремл. структ. підрозд. ун-ту* : тези доп. К. : НТУ, 2012. С.148.

39. Онищенко А .М. Існуючі способи підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг. *Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства,*

эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов : мат. Межд. науч.-практ. конф. (01–04 ноября 2012, г. Харьков). Харьков, 2012. С. 193-198.

40. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Підвищення коліємтійкості асфальтобетонного покриття на мостах за рахунок конструктивних матеріалознавчих та технологічних заходів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2012. Вип. 45. С. 144-149.

41. Onishchenko A., Aksenov S., Garkusha M., Nevynhlovskyy V. Experimental metod of determination of rutting firmness of asphalt pavements on bridgers. *Transbaltica 2013* : The 8th International Conference. (Vilnius, May 9-10, 2013). Vilnius, Lithuania, 2013. P. 148-152.

42. Онищенко А. М. Проблема колієутворення на асфальтобетонному покритті штучних споруд автомобільних доріг та шляхи її вирішення. *LXIX Наук. конф. проф.-викл. складу, аспірантів, студ. та співр. відокремл. структ. підрозд. ун-ту* : тези доп. К. : НТУ, 2013. С.26.

43. Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Методика визначення втрати міцності зчеплення гідроізоляційного матеріалу між асфальтобетоном і цементобетонною основою при зсуві після впливу водомороз них факторів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2013. № 50. С. 103-106.

44.Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Лапченко А. С. Методика розрахунку коліємтійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням укріплення основи // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 93. С. 67-78.

45. Онищенко А. М. Математична модель температурного впливу на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів від дії коліс транспортних засобів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 94. С. 168-190.

46. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Різніченко О. С., Гаташ Я. С., Куртєв В. С. Аналіз результатів визначення функції релаксації асфальтобетонів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 95. С. 47-61.

Свідоцтва та патенти:

47. Свідоцтво серія № 36218. Методика конструювання дорожнього одягу з покриттям підвищеної довговічності із щебенево-мастикового асфальтобетону / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Баран С. А., Куцман О. М., Лаптєва Н. С. Дата реєстрації 21.12.2010 р.

48. Свідоцтво серія № 41995 Науковий твір. Конструювання дорожнього одягу на мостах з асфальтобетонним покриттям підвищеної зсувостійкості / Онищенко А. М., Куцман О. М., Лаптєва Н. С., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С., Гаркуша М. В. Дата реєстрації 30.01.2012 р.

49. Свідоцтво серія № 62286. Практичні рекомендації по підвищенню довговічності асфальтобетонного покриття на транспортних спорудах / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С. Дата реєстрації 28.10.2015 р.

50. Патент України на корисну модель № 40965. Прес для виготовлення і контролю зразків асфальтобетону / Онищенко А. М, Жуков О. О., Мозговий В. В., Радовський Б. С. Дата реєстрації 27.04.2009 р.

51. Патент України на корисну модель № 47604. Асфальтобетонна суміш / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

52. Патент України на корисну модель № 47616. В`яжуче «Полігум» / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

53. Патент України на корисну модель № 47625. Прилад для випробування зразків асфальтобетону НТУ-ЗЧ-1 / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Козлов П. В., Резник Ю. Л., Куцман О.М. та ін. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

54. Патент України на корисну модель UA 91290 «Стабілізуюча добавка для асфальтобетонної суміші» 25.06. 2014 р. (Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф., Волинська І.М.).

55. Патент України на корисну модель № 91289. Спосіб отримання стабілізуючої добавки для асфальтобетонної суміші / Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Волинська І. М. Дата реєстрації 25.06.2014 р.

SUMMARY

Onishchenko A. N. Scientific foundations for increasing resistance of asphalt-concrete pavement to rut formation on road bridges. – Qualification scientific paper as a manuscript.

Thesis for a Doctorate Degree in Technical Sciences, speciality 05.22.11 – automobile roads and airfields. (192 – Construction and civil engineering.) – National Transport University. – Kyiv, 2017.

The thesis provides scientific foundations of the solution for a scientific and practical problem concerning the increase of durability of asphalt-concrete pavement on road bridges with a reinforced concrete plate of carriage-way by providing resistance to formation of ruts.

Based on the critical analysis of the results of existing theoretical, practical and experimental studies on predicting rut formation on asphalt-concrete pavement of road bridges, it has been established that:

- causes and types of rut formation on road pavement are not sufficiently studied;

- existing mathematical models and methods for predicting of rut formation on road pavement do not fully take into account the complex effect of influence factors, and also do not have a unified scientific and methodological basis;

- there are no methods for calculating rut depth on asphalt-concrete pavement of reinforced concrete road bridges;

- existing laboratory and panel-spalling test methods of experimental research are imperfect and do not fully take into account the influence of constructive, technological, operational factors on rut formation of the road coating;

- the complex assessment of resistance of asphalt-concrete to rut formation is not sufficiently studied in the combined application of various practical measures regulating composition of asphalt-concrete, technology of its manufacturing and installation, parameters of the pavement design with different types of foundations and the nature of adhesion between layers depending on the parameters of transport and climatic factors that did not allow obtaining sufficiently effective practical methods for improving

stability of the asphalt-concrete pavement on reinforced concrete road bridges to the rut formation, taking into account internal and external factors.

The systematization of information on the factors influencing rut formation allowed to propose a scheme of reasons for its formation and classification of their types on the asphalt-concrete pavement of reinforced concrete road bridges.

The dissertation is based on the scientific idea proposed by the author: rut formation in asphalt-concrete pavement on road bridges results mainly from the impact of the vertical cyclic loading of pneumatic wheels of vehicles at high summer temperatures due to accumulation of residual plastic deformations in the construction of a bridge road-bed based on a rigid reinforced concrete basis, taking into account the complex influence of internal (structural, constructive, technological) and external (climatic, transport, operational) factors.

To achieve the main scientific result and the established scientific idea, the working hypothesis is put forward:

- the patterns of accumulation of residual vertical strain from the influence of external factors for predicting the rut formation in asphalt-concrete pavement of road bridges can be based on the application of the phenomenological model, regardless of the type of manifestation of internal factors. Using this approach, the mathematical model can be obtained on the basis of the application of the provisions of elastoplasticity theory in solving the problems of rut formation from the impact of the pneumatic wheel, taking into account thermoviscoelastoplastic properties of asphalt-concrete, and on the basis of experimentally established parameters of this model under the conditions reflecting the features of pavement function with a particular kind of internal factors manifestation.

The study considers the complex effect of the main factors: thermo-visco-elastic-plastic properties of asphalt-concrete; high temperature of asphalt-concrete from the influence of solar radiation and the influence of pneumatic wheels interaction with the pavement while rolling; vertical pressure on pneumatic wheels when driving vehicles; intensity of applying vertical loads; load time.

The thesis has developed the method of calculating rut formation in asphalt-concrete pavement on road bridges from the impact of cyclic loads of vehicles at high temperatures. This method is based on a developed mathematical model based on the application of a phenomenological model based on the provisions of the fundamental laws of a deformed solid body, in particular, theory of elasticity, plasticity, theory of thermoviscoelasticity. This allowed development of analytical dependencies for the calculation of vertical residual strain from the reaction of pneumatic wheels of vehicles. The thesis has specified the method of prediction of the temperature regime of asphalt-concrete, taking into account thermal influence of pneumatic wheels interaction with the pavement during their rolling. The paper has improved analytical dependencies for the indicators of thermoviscoelastic properties of asphalt-concrete considering the properties of bituminous binders (penetration, softening temperature and penetration index). The thesis offers analytical dependencies, which describe thermoviscoelastic properties of asphalt concrete, and formalizes parameters of the mode of transport loading (time of impact t_i and amount of load N_i).

The paper proposes principles of construction of asphalt-concrete pavement on reinforced concrete road bridges. We suggest the boundary condition, which takes into account permissible depth of the rut in terms of traffic safety and total depth of the rut accumulated over estimated lifetime of the pavement service. The paper has improved existing methods of laboratory assessment of the stability of asphalt-concrete to rut formation with the use of integral stability index to the accumulation of residual strain.

The thesis has developed methods and conducted experimental laboratory and benchmark tests of the influence of prescribed-structural, constructive, technological, operational factors on rut formation of the road pavement. The paper experimentally established: parameters of thermoviscoelastic properties of asphalt-concrete; characteristics of rutting; temperature of the asphalt-concrete pavement in the runway; adhesion strength between asphalt-concrete and base under shear. The dissertation has proposed the criterion of the rut boundary state in the investigated asphaltic concretes, which is 5 mm.

It has been established that during testing of A, B, V, G asphalt-concrete types (with a maximum size of crushed stone from 5 to 20 mm) and macadam-mastic asphalt-concrete types 10, 15, 20 (SMA-10, SMA -15, SMA -20), as well as the cast asphalt-concrete types 10, 15 (LA-10, LA-15), the minimum value of the rut depth corresponds to the macadam-mastic asphalt-concrete type 20 (SMA -20). It has been proved that the modification of bitumen by polymers allows to reduce the rut depth to 50% in asphalt-concrete pavement in absolute value when comparing identical types of asphaltic concretes. Regardless of the modification of bitumen, the minimum rut depth is observed in the macadam-mastic asphalt-concrete type 20 (SMA -20) when comparing each of the investigated asphaltic concretes.

We have proposed an experimental method of determining strength of the grip between asphalt-concrete pavement, waterproofing material and the concrete base under shear. We also experimentally established parameters of adhesion strength between layers and pavement and a rigid foundation for a combination of different compositions of asphaltic concretes and waterproofing materials.

The thesis has shown results of the numerical analysis of the influence of various factors on rut formation in asphalt-concrete pavement, on the basis of which principal regularities of rut dependence from recipe-structural, constructive, technological and operational parameters were established with the aim of developing effective methods of increasing pavement stability to rut formation.

The paper obtained a predictive polynomial model of estimation of the rutting value depending on the most influential factors, which allows to analyze the change of the rut depth when values of input parameters are changed and to determine rational combination of values of input parameters which will provide the minimum value of the rut formation.

The results of the dissertation research are substantiated, reliable and confirmed by:

- the established experimental evaluation of reliability of the results of theoretical provisions, which is within 3-18%;

- the sufficient volume of experimental studies and repeated measurements in experiments that satisfy the given accuracy and reliability;

- the adequacy of developed mathematical models and data of experimental researches;

- the satisfactory level of convergence of theoretical and experimental research results;

- the results of full-scale simulation of intensity of the rut formation in asphalt-concrete pavement on the annular stand of the State Enterprise "Road quality control"; the results of full-scale observation of the coating condition on road bridges in Ukraine.

We have developed practical methods for increasing stability of asphalt-concrete pavement to the rut formation on road bridges. In particular, we have developed a method of designing asphalt-concrete pavement of increased durability, requirements for pavement materials and parameters of its design. The recipes of materials, pavement designs and technologies of its installation have been developed and introduced into the practice of enterprises and organizations of the road-building industry of Ukraine. Due to the application of practical methods, the service life of asphalt-concrete pavement on road bridges is expected to be 1.5-1.8 times longer compared to the existing terms.

The research results have been used in the development of 18 normative documents for the design, construction, reconstruction, repair, operation of asphalt-concrete pavements on road bridges.

The economic effect from the implementation of scientific research results is achieved by 1.7-2.3 times increasing calculated lifetime of pavement service and 1.2 times reducing costs of ongoing repairs and pavement maintenance.

Key words: road bridge, asphalt-concrete, bitumen, polymeric additive, rut, pavement, resistance, structure, temperature, thermoviscoelasticity.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Онищенко А. М, Кузьмінець М. П., Редченко В. П., Тарнопольський Д. Й., Аксьонов С. Ю. Теоретичні та експериментальні дослідження Південного мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві: монографія. К. : НТУ, 2014. 341 с.

2. Онищенко А. М., Кузьмінець М. П., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В. Теоретичні та практичні дослідження ресурсу асфальтобетонного покриття на залізобетонних транспортних спорудах : монографія. К. : НТУ, 2015. 323. с.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

3. Mozgoviy V., Onishchenko A., Kyrienko O., Olhovyi B. Scientific bases of providing of road coverage wholeness on bridges // Zespolone konstrukcje mostowe. 2009. P. 423-436.

4. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колейности / В. В. Мозговой, А. Н. Онищенко, О. В. Прудкий и др. // Дорожная техника. 2010. С.114-128.

5. Онищенко А. Н. Колеестойкость асфальтобетонного покрытия на цементнобетонных основаних // Журнал современных строительных технологий «Красная линия». 2011. Вып. Дороги. № 52. С. 38-41.

6. Онищенко А. М. Методи оцінки колієстійкості асфальтобетону // Slovak international scientific journal : construction and architecture. Slovakia. 2016. № 2 (2). P. 16-26. ISSN 5782-5319.

7. Онищенко А. М. Проектування зернового складу асфальтобетону підвищеної колієстійкості з оптимізацією за показником розрахункового строку служби. *International scientific and practical conference "World science"*. 2017. № 4(20), Vol.2. P. 32-35. ISSN 2413-1032. Видання входить до наукометричних баз даних: Index Copernicus, eLIBRARY.

8. Онищенко А. Н. Влияние различных факторов на интенсивность образования остаточных деформаций виде колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов (часть 1) // Мир дорог. 2013. № 3. С. 2-4.

9. Онищенко А. Н. Влияние различных факторов на интенсивность образования остаточных деформаций виде колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов (часть 2) // Мир дорог. 2013. № 4. С. 28-29.

10. Онищенко А. Н. Причины образования колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов и способы повышения колеестойкости // Дорожная техника. 2013. С. 134-144.

11. Onishchenko A., Kuzminets M., Aksenov S. Analysis of modified bitumen difference polymers // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Motrol. Commission of motorization and energetic in agriculture. Lublin – Rzeszow, 2014. № 8. P. 101-106.

12. Онищенко А. М. Метод розрахунку міцності зчеплення асфальтобетонного покриття з проїзною частиною мосту при зсуві від дії екстреного гальмування транспортного засобу // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. С. 12-19.

13. Мозговой В. В., Онищенко А. Н., Гаркуша Н. В., Белан О. О. Анализ напряжено-деформированного состояния и устойчивости к колееобразованию асфальтобетонного покрытия, испытанного на кольцевом стенде // Мир дорог. 2016. С. 28-32.

Статті у фахових виданнях:

14. Онищенко А. М. Досвід застосування полімерів в дорожньому будівництві // Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2007. № 4. С. 146-153.

15. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А.М. Теоретичні основи термо - реологічної поведінки полімерасфальтобетонів на основі латексів Butonal // Автошляховик України. 2007. - №6. С. 37-40.

16. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А. М. Експериментальні дослідження термо-реологічної поведінки

полімерасфальтобетонів на основі латексів Butonal // Автошляховик України. 2008. № 1. С. 36-39.

17. Випробування конструкцій дорожнього одягу на кільцевому стенді – успіхи, проблеми, перспективи (частина 2) / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Прудкий О. В., Куцман О. М. та ін. // Автошляховик України. 2010. № 4. С. 24-31.

18. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С., Невінгловський В. Ф. Експериментальна оцінка колієстійкості асфальтобетону за допомогою лабораторних установок // Автошляховик України. 2010. № 13. С. 93-100.

19. Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С., Гаркуша М. В. Методика забезпечення колієстійкості асфальтобетонного покриття на цементобетонній основі // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2011. Вип. 1(87). С. 17-25.

20. Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю. Дослідження колійності асфальтобетонів різних типів та видів на бітумному в'яжучому «Полігум» // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. № 46. С. 272-278.

21. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю. Сучасні аспекти підвищення колієстійкості нежорсткого дорожнього одягу // Автошляховик України. 2012. № 5. С. 25-30.

22. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Білан О. О. Експериментальний аналіз впливу мікроволокон на підвищення тріщиностійкості та коліє стійкості асфальтобетонного покриття випробуваного на кільцевому стенді // Автомобільні дорого і дорожнє будівництво. 2013. Вип. 88. С. 89-100.

23. Онищенко А. М. Метод визначення функції зсувостійкості асфальтобетонного покриття на штучних спорудах // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту : Серія «Транспортні системи і технологія». К. : ДЕТУТ, 2013. Вип. 24. С. 52-59.

24. Онищенко А. Н. Выбор гранулометрического состава асфальтобетона повышенной колеестойкости экспериментальным методом для автодорожных

мостов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 56. С. 161-170.

25. Онищенко А. М. Експериментальний метод випробування інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону у вигляді колії // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту : Серія «Транспортні системи і технологія». К. : ДЕТУТ, 2014. Вип. 25. С. 56-62.

26. Онищенко А. М. Оцінка надійності при прогнозуванні величини колії в асфальтобетонному покритті на транспортних спорудах // Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2015. Вип. 15, Частина 1 : Серія «Технічні науки». С. 119-128.

27. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Ольховий Б.Ю., Опрощенко І.О., Куцман О.М., Баран С.А., Різніченко О.С. Оцінка довговічності асфальтобетонного покриття шляхом випробування асфальтобетону на стійкість до накопичення залишкових деформацій // Вісник Національного транспортного університету. 2016. Вип. 34, С.283-293.

28. Онищенко А. М. Теорія колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 96. С. 163-191.

29. Онищенко А. М. Аналіз результатів колійності в литому асфальтобетоні «гусасфальт» // Будівельні матеріали та вироби. 2010. № 1(91). С.72-74.

30. Онищенко А. М. Методологія розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 97. С. 158-182.

31. Онищенко А. М. Практичні методи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до колії на транспортних спорудах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 101. С. 166-182.

32. Онищенко А. М. Математична модель розрахунку колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. Вип. 66. С. 177-183.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

33. Мозговой В. В., Піскунов В. Г., Онищенко А. М, Прудкий О. В., Куцман О. М. Уточнена методика визначення модулів пружності дорожньо-будівельних матеріалів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 33. С. 137-142.

34. Методика оцінки ефективності зчеплення гідроізоляційних матеріалів з асфальтобетонним покриттям на мостах / Мозговой В. В., Онищенко А.М., Жуков О. О., Лаптєва Н. С. та ін. // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 34. С. 67-73.

35. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С. Управління якістю по забезпеченню зсувостійкості та колієстійкості асфальтобетонного покриття на мостах // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2010. Вип. 38. С. 88-97.

36. Mozgoviy V. V., Nevinglovsky V. F., Onishchenko A. M. Investigation of Modified with a Polumer Latex Butonal NS 104 the Bitumen Preparation Parameters Influence on the Paving Bitumen Properties. *Chaina / Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies 2010* Xi'an China (14–16 october 2010). Chan' an University, China, 2010. P. 1-9.

37. Онищенко А. Н. Методика определения колеестойкости асфальтобетонных покритий на бетонних и железобетонных основаних в лаборатории. *Новые дороги Росии* : сб. трудов Международной конференции. Саратов, 2011. С. 91-97.

38. Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю., Раделицька Н. В. Дослідження впливу полімерних матеріалів на підвищення колієстійкості асфальтобетону. *LXVIII Наук. конф. проф.-викл. складу, аспірантів, студ. та співр. відокремл. структ. підрозд. ун-ту* : тези доп. К. : НТУ, 2012. С.148.

39. Онищенко А .М. Існуючі способи підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг. *Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства,*

эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов : мат. Межд. науч.-практ. конф. (01–04 ноября 2012, г. Харьков). Харьков, 2012. С. 193-198.

40. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Підвищення коліємтійкості асфальтобетонного покриття на мостах за рахунок конструктивних матеріалознавчих та технологічних заходів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2012. Вип. 45. С. 144-149.

41. Onishchenko A., Aksenov S., Garkusha M., Nevynhlovskyy V. Experimental metod of determination of rutting firmness of asphalt pavements on bridgers. *Transbaltica 2013* : The 8th International Conference. (Vilnius, May 9-10, 2013). Vilnius, Lithuania, 2013. P. 148-152.

42. Онищенко А. М. Проблема колієутворення на асфальтобетонному покритті штучних споруд автомобільних доріг та шляхи її вирішення. *LXIX Наук. конф. проф.-викл. складу, аспірантів, студ. та співр. відокремл. структ. підрозд. ун-ту* : тези доп. К. : НТУ, 2013. С.26.

43. Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Методика визначення втрати міцності зчеплення гідроізоляційного матеріалу між асфальтобетоном і цементобетонною основою при зсуві після впливу водомороз них факторів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2013. № 50. С. 103-106.

44.Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Лапченко А. С. Методика розрахунку коліємтійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням укріплення основи // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 93. С. 67-78.

45. Онищенко А. М. Математична модель температурного впливу на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів від дії коліс транспортних засобів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 94. С. 168-190.

46. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Різніченко О. С., Гаташ Я. С., Куртєв В. С. Аналіз результатів визначення функції релаксації асфальтобетонів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 95. С. 47-61.

Свідоцтва та патенти:

47. Свідоцтво серія № 36218. Методика конструювання дорожнього одягу з покриттям підвищеної довговічності із щебенево-мастикового асфальтобетону / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Баран С. А., Куцман О. М., Лаптєва Н. С. Дата реєстрації 21.12.2010 р.

48. Свідоцтво серія № 41995 Науковий твір. Конструювання дорожнього одягу на мостах з асфальтобетонним покриттям підвищеної зсувостійкості / Онищенко А. М., Куцман О. М., Лаптєва Н. С., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С., Гаркуша М. В. Дата реєстрації 30.01.2012 р.

49. Свідоцтво серія № 62286. Практичні рекомендації по підвищенню довговічності асфальтобетонного покриття на транспортних спорудах / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С. Дата реєстрації 28.10.2015 р.

50. Патент України на корисну модель № 40965. Прес для виготовлення і контролю зразків асфальтобетону / Онищенко А. М, Жуков О. О., Мозговий В. В., Радовський Б. С. Дата реєстрації 27.04.2009 р.

51. Патент України на корисну модель № 47604. Асфальтобетонна суміш / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

52. Патент України на корисну модель № 47616. В`яжуче «Полігум» / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

53. Патент України на корисну модель № 47625. Прилад для випробування зразків асфальтобетону НТУ-ЗЧ-1 / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Козлов П. В., Резник Ю. Л., Куцман О.М. та ін. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

54. Патент України на корисну модель UA 91290 «Стабілізуюча добавка для асфальтобетонної суміші» 25.06. 2014 р. (Онищенко А.М., Невінгловський В.Ф., Волинська І.М.).

55. Патент України на корисну модель UA 91290. Стабілізуюча добавка для асфальтобетонної суміші / Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Волинська І. М. Дата реєстрації 25.06. 2014 р.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ……..... 30

ВСТУП…….. 34

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМА СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ. СТАН СПРАВ……. 47

1.1 Основні передумови дослідження ……. 47

1.2 Сучасні уявлення щодо причин виникнення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах з урахуванням різних транспортно-експлуатаційних факторів….. 59

1.3 Критерії і методи оцінки стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії……. 62

1.4 Способи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії……...……... 76

1.5 Аналіз досліджень температурного режиму покриття……. 87

1.6 Висновки по розділу. Мета і задачі досліджень…… 90

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ З ПРОГНОЗУВАННЯ УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ…….….. 94

2.1 Причини, що впливають на утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів …….. 94

2.2 Теоретичні передумови розрахунку колії в асфальтобетонному покритті на залізобетонних автодорожніх мостах ……..…… 100

2.3 Концептуальні положення з прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах..... 107

2.4 Метод визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні…… 109

2.5 Модель навантаження від дії пневматичних коліс транспортних засобів…… 124

2.6 Математична модель прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини ……... 134
2.7 Висновки по розділу……. 157
РОЗДІЛ 3. МЕТОД РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТІ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ ПЛИТОЮ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ…….. 159
3.1 Постановка проблеми оцінки стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії…… 159
3.1.1 Загальні підходи до вирішення задачі з розрахунку глибини колії в асфальтобетонному покритті …….. 161
3.1.2 Принципи розрахунку асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах ……..... 163
3.2 Розрахунок зміни температури в асфальтобетонному покритті від інтенсивності руху транспортних засобів ……. 166
3.3 Розрахунок фактичної сумарної кількості прикладення навантажен від дії транспортних засобів ……..…… 167
3.4 Умова граничного стану показника стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії …….. 172
3.5 Розрахунок глибини колії в асфальтобетонному покритті…….. 173
3.6 Висновок по розділу……. 179
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ КОЛІЇ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ ……..……..…. 181
4.1 Натурні дослідження асфальтобетонного покриття автодорожніх мостів……. 181
4.1.1 Визначення глибини колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів …… 181
4.1.2 Дослідження зміни добової літньої температури в покритті..... 182

4.2 Об’єкти експериментальних досліджень…… 186
4.3 Методи визначення властивостей об’єктів досліджень…… 187
4.3.1 Метод приготування бітуму модифікованого полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки ……..... 187
4.3.2 Визначення стандартних фізико-механічних властивостей асфальтобетону …… 189
4.3.3 Визначення функції деформації та релаксації асфальтобетону… 189
4.3.4 Визначення міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям і бетонною основою ……..... 201
4.3.5 Визначення глибини колії в асфальтобетоні ……. 207
4.3.6 Визначення коефіцієнту бокового деформування асфальтобетону……. 215
4.3.7 Визначення функції коліємкості асфальтобетону…….. 217
4.3.8 Визначення параметрів поперечного профілю асфальтобетонного покриття та загальної глибини колії …… 220
4.4 Результати експериментальних досліджень асфальтобетону….. 227
4.5 Висновки до розділу…….. 258
РОЗДІЛ 5. ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ УТВОРЕННЯ КОЛІЇ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ……. 262
5.1 Оцінка впливу основних факторів на зміну глибини колії в асфальтобетонному покритті …….. 262
5.2 Вплив різних факторів на пропорційну глибину колієутворення 271
5.3 Вплив різних в’яжучих на глибину утворення колії асфальтобетонів різних типів……... 274
5.4 Аналіз впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті при чисельному моделюванні…. 277
5.5 Висновки по розділу……. 281
РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ З ПІДВИЩЕННЯ

СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ ПЛИТОЮ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ…….. 283
6.1 Матеріалознавчі способи …… 285
6.1.1 Вимоги до бітуму нафтового дорожнього та бітуму модифікованого полімером…….. 285
6.1.2 Вимоги до зернових (гранулометричний) складів асфальтобетонної суміші…….. 289
6.1.3 Вимоги до властивостей асфальтобетонної суміші та асфальтобетону…….. 291
6.1.4 Проектування складу асфальтобетону підвищеної коліємкості……. 292
6.2 Конструктивні способи ……..……. 304
6.2.1 Основні положення по визначенню і вибору конструкції асфальтобетонного покриття…… 305
6.2.2 Проектування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах підвищеної довговічності…… 306
6.3 Технологічні способи …….…… 321
6.4 Практичне застосування результатів наукових досліджень……. 331
6.5 Шляхи подальшого розвитку наукових досліджень ……. 336
6.6 Висновки по розділу…….. 338
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ…….…….. 340
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……. 344
ДОДАТКИ (окремий том)

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЗАГАЛЬНА ГЛИБИНА КОЛІЇ **(**$h_{заг}$ $(\sum N_{сф})$**)** – це сума складових заглиблення поверхні покриття на залізобетонному автодорожньому мосту, яка складається з розрахункової глибини колії, (абразійного) зносу та внаслідок доущільнення та висоти гребенів випору від інтенсивності і дії навантаження транспортних засобів та високої температури, що вимірюється лінійкою від нижньої точки поперечного профілю до нижньої грані триметрової рейки, яка встановлена на гребені випору і повністю перекриває колію в міліметрах.

ГЛИБИНА УТВОРЕННЯ КОЛІЇ ($h_р$) – це відстань від нижньої точки поперечного профілю до лінії початкової поверхні асфальтобетонного покриття мосту в міліметрах

ВИСОТА ВИПОРУ КОЛІЇ ($h_в$) – відстань від лінії початкової поверхні до верхньої точки гребеню випору в міліметрах. Визначається вимірюванням відстані між лінією початкової поверхні і точкою на початковій поверхні при встановленні між верхньої точкою гребеню і непошкодженою поверхнею на відстані 0,5 м праворуч від гребеню

ВИПОР – це підняття поверхні покриття у вигляді гребеню на краю смуги накату під дією руху транспортного засобу

КОЛІЯ З ВИПОРОМ – це підняття поверхні покриття за рахунок накопичення залишкових деформацій у верхньому шарі покриття з утворенням гребням випору на краю смуги накату під дією руху транспортного засобу

КОЛІЯ – це поглиблення в поздовжньому напрямку на асфальтобетонному покритті проїзної частини мостового полотна залізобетонного автодорожнього мосту, що утворюються на смузі накату під дією транспортних засобів

МОСТОВЕ ПОЛОТНО – це сукупність всіх елементів, розміщених на залізобетонній прогоновій будові, призначених для забезпечення нормальних умов безпеки руху транспортних засобів і пішоходів, а також для відводу води з поверхні покриття автодорожнього мосту та в примиканні з підходами

ЗАЛИШКОВА ДЕФОРМАЦІЯ – це колія на поверхні асфальтобетонного покриття чи зразка, що виникає під дією навантаження при проходах випробувального колеса

СТІЙКІСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ – спроможність матеріалу асфальтобетонного покриття на залізобетонному автодорожньому мосту чинити опір утворенню колії під дією вертикального навантаження та інтенсивності руху транспортного засобів при високих температурах

ВИСОКІ ТЕМПЕРАТУРИ – це температури асфальтобетонного покриття, які прогріваються понад 50 ^{o}C. Такі температури суттєво впливають на інтенсивність утворення колії

СЕРЕДНЯ ТЕМПЕРАТУРА – це температури асфальтобетонного покриття, яка прогрівається в межах від +30 ^{o}C до +40 ^{o}C. При таких температурах колія з'являється за рахунок доущільнення, зносу від тертя пневматичних шин та повільного накопичення залишкових деформацій.

НИЗЬКІ ТЕМПЕРАТУРИ – це температури асфальтобетонного покриття, які прогрівається до +30 ^{o}C. При таких температурах колія з'являється за рахунок зносу від тертя пневматичних шин

ІНТЕГРАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ ДО УТВОРЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ (S_w) – визначає кількісно стійкість асфальтобетону до виникнення колії на поверхні покриття чи зразка під дією заданої кількості проходів (транспортних засобів) випробувального колеса з (існуючим навантаженням) заданим навантаженням

КЛАСИЧНА КОЛІЯ – це широко розповсюджене поглиблення, що з'являється в полосі накату на проїзній частині всіх автодорожніх мостах за рахунок доущільнення та зносу у верхньому шарі покриття

КОЛІЯ КОНСТРУКТИВНА – це поглиблення в поздовжньому напрямку на покритті проїзній частині мостового полотна, що утворюється на смузі накату за рахунок недостатнього зчеплення між шарами та асфальтобетонним покриттям, гідроізоляцією та проковзування по ній з випорами або без них.

СТРУКТУРНО-КОНСТРУКТИВНА КОЛІЯ – це поглиблення в поздовжньому напрямку на покритті проїзній частині мостового полотна, що утворюється а смузі накату за рахунок накопичення залишкових деформацій у верхньому та нижньому шарі покриття за рахунок недостатнього зчеплення між верхнім та нижнім шаром асфальтобетону при умові міцного зчеплення нижнього шару з гідроізоляцією з випорами або без них

КОЕФІЦІЕНТ БОКОВОГО ДЕФОРМУВАННЯ ($К_к$) – це відношення глибини колії в асфальтобетонному зразку плиті (обрізаному в здовж зразка плити по 0,5 мм) до глибини колії в асфальтобетонному зразку плиті (необрізаному)

КОЕФІЦІЄНТ ПРОПОРЦІЙНОЇ ГЛИБИНИ КОЛІЇ ($К_{PRD}$) – це відношення деформації асфальтобетону в точці, після 10000 циклів та різниці початковий вимір до товщини зразка

ФУНКЦІЯ КОЛІЄСТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНУ – описується у вигляді степеневої залежності, як кількість проходів колеса до граничного значення інтегрального показник стійкості до накопичення залишкових деформацій в асфальтобетонному зразку S_w при відповідній дії напруження σ

ЕЛАСТИЧНИЙ ПРОШАРОК – це гідроізоляція: наплавна, розпилювальна, оклеювальна, мастикова бітумно-полімерна або іншого виду, яка має товщину понад 5 мм

НОВІ ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ – це будівельні матеріали, які вперше та/або без масового застосування використовуються в будівництві об’єктів дорожньої галузі, що в своїй складовій мають інноваційні технології

МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ПРИ ЗСУВІ – це міцність зчеплення при зсуві на контакті асфальтобетонного покриття, еластичного прошарку і плити проїзної частини мосту від дії вертикального і горизонтального зусилля при літній температурі

ОЦІНКА ЗЧЕПЛЕННЯ МІЖ АСФАЛЬТОБЕТОННИМИ ШАРАМИ – це перевірка умови міцності на зчеплення між асфальтобетонними шарами

ГРАНИЧНЕ ДОТИЧНЕ НАПРУЖЕННЯ – це напруження на межі між асфальтобетонними шарами, що витримує двохшарова асфальтобетонна

конструкція при дії зсувних зусиль при гальмуванні розрахункового транспортного засобу

ВНУТРІШНІ ФАКТОРИ – складаються з структурних, конструктивний та технологічних

ЗОВНІШНІ ФАКТОРИ – складаються з кліматичних, транспортних та експлуатаційних

РІВЕНЬ НЕ ВІДПОВІДНОСТІ ВИМОГАМ – може бути велика, середня та мала.

ВСТУП

Актуальність теми. Автодорожні мости є невід'ємною складовою мережі автомобільних доріг транспортної інфраструктури України. Транспортно-експлуатаційний стан переважної більшості автодорожніх мостів не відповідає сучасним вимогам дорожнього руху і потребує поліпшення з урахуванням соціально-економічних потреб держави. На автомобільних дорогах України загального користування експлуатується близько 16100 автодорожніх мостів. Переважна більшість автодорожніх мостів має залізобетонну плиту проїзної частини з асфальтобетонним покриттям. Останніми роками, у зв’язку зі зростанням параметрів транспортних навантажень та аномально високими літніми температурами, значного розповсюдження набули дефекти на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів у вигляді колії. Утворення колії призводить як до зменшення довговічності самого покриття, так і до погіршення безпеки дорожнього руху, в результаті прояву ефекту аквапланування, підвищення слизькості покриття (особливо у зимовий період) та погіршення умов маневрування транспортних засобів під час руху, що у свою чергу не дозволяє повною мірою забезпечити комфортне та безпечне перевезення пасажирів і вантажів, а також впливає на зниження пропускної здатності мостів та автомобільних доріг в цілому.

Ремонт дефектів асфальтобетонного покриття у вигляді колії є складним, трудомістким та фінансово витратним процесом, що супроводжується значними матеріальними та енергетичними затратами. Окрім того, виконання ремонтних робіт по усуненню колії не завжди призводить до бажаного результату. Як відомо, на практиці широко використовують типові конструкції одягу їздового полотна для автодорожніх мостів, які не завжди забезпечують необхідну стійкість до утворення колії, а методи їх розрахунку є недосконалими. Існуючі методики запобігання утворенню колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах не достатньо враховують комплексний вплив термореологічних

властивостей асфальтобетону та фактичних режимів навантаження великоваговими транспортними засобами за різних температурних умов.

Відсутність науково обґрунтованих теоретичних, експериментальних та практичних методів з прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини призводить до зменшення довговічності такого покриття та зниження рівня безпеки дорожнього руху, а також до значних економічних збитків.

Тому, розробка наукових основ підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Тема дисертації відповідає напрямам і завданням державних науково-технічних програм: «Транспортна стратегія України на період до 2020 року» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 20.10.2010р. № 2174-р), «Концепція Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування на 2013-2018 роки» (Розпорядження Кабінету міністрів України від 03.09.2012р. № 719-р).

Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались кафедрою дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Національного транспортного університету та планами науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт Державного агентства автомобільних доріг України «Укравтодор», в рамках виконання господарсько-договірних науково-дослідних робіт: «Дослідити вплив конструкційних і технологічних факторів та матеріалів на коліємтійкість асфальтобетонного покриття при випробуванні на кільцевому стенді від дії великовантажних транспортних засобів» (державний реєстраційний № 0111U003963), «Провести стендові дослідження та розробити рекомендації з застосування асфальтобетону, армованого мікроволокнами» (державний реєстраційний № 0109U008351), «Розробити стандарт організації України на метод визначення розрахункових модулів пружності дорожньо-будівельних матеріалів (згідно з ВБН В.2.3-218-186-2004)» (державний реєстраційний

№ 0109U007696), «Розробити рекомендації з підвищення зсувостійкості асфальтобетонного покриття на бетонних та залізобетонних основах» (державний реєстраційний № 0111U005559), «Провести дослідження та розробити методику розрахунку асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів на довговічність» (державний реєстраційний № 0114U00645), «Провести моніторинг, дослідити утворення тріщин і залишкових деформацій в асфальтобетонних покриттях мостів та розробити альбом типових конструкцій мостового полотна» (державний реєстраційний № 0114U001880), «Розробка методики проектування дорожнього покриття підвищеної довговічності із щебенево-мастикового асфальтобетону» (державний реєстраційний № 0109U002153), «Забезпечення зсувостійкості асфальтобетонного покриття на мостах» (державний реєстраційний № 0109U002153), «Розробка технології будівництва довговічних асфальтобетонних шарів із теплого асфальтобетону, виготовленого з використанням твердих вуглеводнів» (державний реєстраційний № 0112U000140), «Розроблення вимог до асфальтобетону, направлених на розширення будівельного сезону при будівництві автомобільних доріг» (державний реєстраційний № 0113U000301), «Підвищення тріщиностійкості та колієстійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг і вулиць за рахунок застосування інноваційних технологій» (державний реєстраційний № 0114U005141), «Підвищення довговічності асфальтобетонного покриття на мостах за рахунок застосування полімерних модифікаторів» (державний реєстраційний № 0113U000301).

Мета і задачі досліджень

Мета роботи полягає в розробленні наукових основ підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини при дії вертикальних навантажень від пневматичних коліс транспортних засобів за високих літніх температур.

Для досягнення поставленої мети в дисертації визначені завдання:

- провести аналіз: умов роботи асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах, існуючих теоретичних та експериментальних методів прогнозування утворення колії;

- розробити математичну модель прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини від дії вертикальних навантажень пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах та розробити метод розрахунку стійкості покриття до утворення колії;

- удосконалити метод визначення температури асфальтобетонного покриття в смузі накату на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, з урахуванням впливу взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні;

- розробити методи та провести експериментальні лабораторні та стендові дослідження впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних і кліматичних, транспортних та експлуатаційних факторів на стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії.

- експериментально встановити: параметри термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону; характеристики утворення колії; температуру асфальтобетонного покриття в смузі накату; міцність зчеплення між асфальтобетоном та залізобетонною основою при зсуві;

- встановити закономірності впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини;

- розробити практичні методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини та оцінити їх техніко-економічну ефективність.

Дисертаційна робота побудована на запропонованій автором науковій *ідеї*: утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, головним чином, відбувається від дії вертикального циклічного навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах за

рахунок накопичення залишкових пластичних деформацій в конструкції мостового полотна, що опирається на жорстку залізобетонну основу з урахуванням комплексного впливу внутрішніх (структурних, конструктивних технологічних) та зовнішніх (кліматичних, транспортних, експлуатаційних) факторів.

Для досягнення основного наукового результату та встановленої наукової ідеї висунуто *робочу гіпотезу*: закономірності накопичення залишкових вертикальних деформацій від дії зовнішніх факторів для прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів можуть базуватись на застосуванні феноменологічної моделі незалежно від виду прояву внутрішніх факторів. Використовуючи такий підхід математична модель може бути отримана на основі застосування положень теорії пружнопластичності при вирішенні задач утворення колії від дії пневматичного колеса, з урахуванням термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону та на основі експериментально встановлених параметрів цієї моделі в умовах, що відображають особливості роботи покриття при певному виду прояву внутрішніх факторів.

Об'єкт дослідження – явище утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини від інтенсивності дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів та зміни температурних умов.

Предмет дослідження – закономірності утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини від дії вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів за високих літніх температур.

Методи дослідження: аналітично-експериментальні з використанням положень теорії пружнопластичності і термов'язкопружності та експериментальних методів дослідження утворення колії в асфальтобетонному покритті на жорсткій основі, чисельного моделювання, математичної статистики, регресійного аналізу, планування багатофакторних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів. Основний науковий результат дисертаційного дослідження полягає в розробленні наукових основ з прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини з урахуванням комплексної дії впливових факторів. Елементами наукової новизни є:

уперше:

- розроблена класифікація причин утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, що дозволило більш повно врахувати внутрішні (рецептурно-структурні, конструктивні, технологічні) і зовнішні (кліматичні, транспортні, експлуатаційні) фактори при розробці математичної моделі та методу прогнозування утворення колії;

- розроблений метод розрахунку стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах, що дозволяє врахувати комплексну дію факторів і причин з урахуванням термов'язкопружнопластичних властивостей матеріалу;

- визначена закономірність утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини від впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних та кліматичних, транспортних, експлуатаційних факторів, що дозволяє здійснювати кількісну оцінку глибини колії;

- розроблено регресійну залежність для прогнозування показника стійкості асфальтобетону до утворення колії в залежності від кількості прикладань навантажень, їх величини, температури та характеристик матеріалу, що дозволяє направлено регулювати внутрішні параметри з урахування заданих зовнішніх факторів;

удосконалено:

- критерій міцності зчеплення при зсуві між асфальтобетонним покриттям і жорсткою залізобетонною основою автодорожнього мосту, що дає можливість оцінити якість гідроізоляційних матеріалів;

- метод оцінки довговічності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, з урахуванням впливу водоморозних факторів та параметрів навантаження на порушення суцільності асфальтобетону, що дає можливість підвищувати стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії без утворення дефектів у вигляді тріщин;

- математичну модель прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті, що відображає термов'язкопружнопластичні властивості матеріалу, вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів та параметрів циклічного навантаження;

- метод визначення температури в смузі накату асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, що дозволяє врахувати додаткове нагрівання покриття за рахунок його взаємодії із пневматичними колесами транспортних засобів;

- метод дослідження асфальтобетону на утворення колії в лабораторних умовах, що дозволяє оцінювати зміну утворення колії в залежності від швидкості кочення колеса та його середнього тиску на поверхню;

отримали подальший розвиток:

- методи визначення термов'язкопружньопластичних показників властивостей асфальтобетону, що необхідні для здійснення розрахунків з прогнозування утворення колії на покритті;

- метод визначення рецептурно-структурних параметрів асфальтобетону підвищеної стійкості до утворення колії, з метою обґрунтованого вибору складу асфальтобетону.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків, рекомендацій підтверджено: використанням фундаментальних законів деформованого твердого тіла, зокрема теорій пружності, пластичності, термов'язкопружності; логічністю вибору методів та методик дослідження, коректним використанням сучасних програмних комплексів; відповідним обсягом експериментальних досліджень і повторних вимірювань у дослідах, які задовольняють заданій точності та надійності; задовільним рівнем збіжності

результатів теоретичних і експериментальних досліджень; результатами натурного моделювання інтенсивності утворення колії в асфальтобетонному покритті на кільцевому стенді ДП «Дорожній контроль якості»; результатами натурного спостереження стану асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини.

Практичне значення отриманих результатів. У результаті проведених досліджень розроблено методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини із застосуванням рецептурно-структурних, конструктивних і технологічних способів на всіх етапах життєвого циклу покриття: проектування складу асфальтобетонних сумішей та контролю якості їх складових; проектування конструкції асфальтобетонного покриття; технології приготування асфальтобетонних сумішей та влаштування покриття; утримання та експлуатація покриття.

Розроблено методи та методики:

- проектування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини підвищеної стійкості до утворення колії;

- експериментального визначення параметрів математичної моделі з прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини;

- підбору складу асфальтобетону підвищеної стійкості до утворення колії;

- експериментального визначення міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляційним матеріалом і залізобетонною основою при зсуві;

- лабораторної оцінки стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових пластичних деформацій;

- експериментальних випробувань для оцінки стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на бетонній основі кільцевого стенду;

- контролювання процесу модифікації полімерами бітуму нафтового дорожнього з використанням лабораторної лопатевої мішалки;

- оцінки експлуатаційної стійкості асфальтобетону до утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини;

- техніко-економічної оцінки ефективності заходів з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії.

Розроблено вимоги та нормативи:

- вимоги до матеріалів асфальтобетонного покриття та параметрів його конструкції;

- типові конструкції асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності для застосування на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, з урахуванням різних категорій автомобільних доріг та кліматичних умов;

- нормативно-технічні документи: СОУ 45.02-00018112-020:2009 Будівельні матеріали. Асфальтобетон дорожній. Метод випробування на стійкість до накопичення залишкових деформацій», СОУ 45.2-00018112-046:2009 «Асфальтобетон дорожній. Методика оцінки зчеплення між асфальтобетонними шарами при зсуві», СОУ 45.2-00018112-062:2010 «Конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг. Методи випробування на кільцевому стенді», СОУ 45.2-00018112-059:2010 «Дорожньо-будівельні матеріали. Методи визначення розрахункових модулів пружності», ГБН В.2.3-218-547:2010 «Влаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу при низьких температурах», ДСТУ Б В.2.7-119:2011 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови», Р. В.2.3-218-02070915-797:2011 «Рекомендації з підвищення зсувостійкості асфальтобетонного покриття на бетонних та залізобетонних основах», Р. В.2.3-218-21476215-795:2011 «Рекомендації щодо підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття», Р. В.2.3-218-21476215-222:2011 «Рекомендації щодо застосування асфальтобетонних сумішей, армованих мікроволокнами», СОУ 42.1-37641918-100:2013 «Будівельні матеріали. Бітуми дорожні модифіковані з використанням лабораторної лопатевої мішалки. Методи

контролювання процесу модифікації», ТУ У В.2.7-17.1-3149000135-001:2014 «Добавки стабілізуючі АРОН для щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішей. Технічні умови», АД2.4-37641918-003:2015 «Альбом типових конструкцій дорожнього одягу мостового полотна», М 02070915-750:2016 «Методика проектування асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів», якими поповнено Фонд галузевих будівельних норм та нормативних документів Державного агентства автомобільних доріг України;

- рекомендації щодо будівництва, реконструкції та капітального ремонту асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах України, а саме: міст на вході в Гавань Подільського мостового переходу через р. Дніпро, м. Київ; залізнично-автомобільний мостовий перехід через р. Дніпро, м. Київ; розв'язка на примиканні пр. Науки до Столичного шосе, м. Київ; естакада на Труханів острів Подільського мостового переходу через р. Дніпро, м. Київ; будівництво транспортної розв'язки біля станції метро «Дніпро» – конструкція на проїзній частині монолітної естакади, м. Київ; реконструкція транспортної розв'язки на перетині бульвару Дружби народів та Наддніпрянського шосе в Печерському районі, м. Київ; реконструкція транспортної розв'язки на поштовій площі в Подільському районі, м. Київ; капітальний ремонт мосту «Метро» через Русанівську протоку р. Дніпро у Дніпровському районі, м. Київ; естакада на вул. Набережно-Рибальська, м. Київ; конструкція дорожнього одягу на естакадній частині Південного мостового переходу через р. Дніпро, м. Київ; міст на автомобільній дорозі Н-15 Запоріжжя – Донецьк, км 210+212; міст на автомобільній дорозі Н-15 Запоріжжя – Донецьк, км 214+500 – км 217+000; естакада в м. Донецьк по вул. Байдукова; міст на автомобільній дорозі «Обхід м. Донецьк», км 0+000 – км 2+200; на автомобільній дорозі М-03 Київ – Харків – Довжанський: шляхопровід на км 45+000, міст через р. Трубіж на км 70+000, міст через р. Недра на км 75+000; естакада в м. Одеса; міст Лозова, Харківська область; розробка вимог та рекомендацій до гідроізоляційних матеріалів.

Результати наукових досліджень впроваджено в навчальний процес Національного транспортного університету при підготовці:

- фахівців за напрямом «Будівництво та цивільна інженерія» з фахового спрямування (спеціалізації) «Автомобільні дороги і аеродроми», «Мости і транспортні тунелі», «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів». В лекційних курсах з дисциплін «Асфальтобетон», «Органічні в'яжучі», «Будівельне матеріалознавство», «Інноваційні технології виготовлення матеріалів», «Технології і матеріали для особливих умов» запропоновані методи та методики по визначенню глибини колії в асфальтобетоні для проведення лабораторних занять, курсового і дипломного проектування, виконання магістерських науково-дослідних робіт;

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

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійно виконаним науковим дослідженням. Наукові результати, що містяться в роботі, отримані автором особисто, в тому числі розроблено, досліджено та практично апробовано методи з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини на території України. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, викладених у даній дисертаційній роботі, полягає в тому, що: проведено аналіз умов роботи асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, проаналізовано існуючі теоретичні та експериментальні методи прогнозування утворення колії [4, 5, 82, 219]; розроблено математичну модель і метод прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини від дії вертикальних навантажень пневматичних коліс транспортних засобів при високих температурах [5, 219, 298, 313, 320, 340, 341, 343, 353, 374, 409, 410, 412- 418, 421, 423 426, 427]; удосконалено метод визначення температури в смузі накату асфальтобетонного покриття з урахуванням впливу взаємодії пневматичних коліс транспортних засобів з покриттям при їх коченні [298]; розроблено методи та проведено

експериментальні лабораторні та стендові дослідження впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів з утворення колії на покритті [341, 343, 409-419, 424, 423, 425, 430-435, 438, 454, 457, 460, 465]; експериментально встановлено параметри термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону [370, 428, 468-470], міцність зчеплення між асфальтобетоном та основою при зсуві [343, 415, 417, 423, 454, 456, 459]; розроблено метод контролювання процесу модифікації бітуму нафтового дорожнього полімерами, з використанням лабораторної лопатевої мішалки [432, 434, 437, 468]; досліджено закономірності впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті [342, 419, 429, 436, 438, 439, 441]; запропоновано метод розрахунку міцності зчеплення асфальтобетонного покриття з проїзною частиною мосту при зсуві від дії екстреного гальмування транспортного засобу [467]; розроблено практичні методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини [418, 409, 410, 418, 421, 431, 434, 437, 440, 442, 443, 455, 458-465].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та практичні результати дисертаційних досліджень доповідались, обговорювались і отримали позитивну оцінку на науково-практичних та науково-технічних, міжнародних, республіканських і вузівських конференціях та семінарах, серед яких: міжнародна науково-технічна конференція, яка присвячена 80-річчю ХНАДУ та дорожньо-будівельного факультету «Проектування, будівництво і експлуатація нежорстких дорожніх одягів», Харків – 2010 року; міжнародна конференція «Новые дороги России», Саратов – 2011 року; «Современные тенденции и направления строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений», Мінськ – 2012 року; міжнародна науково-практична конференція «Современные компьютерно-инновационные технологи проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов», Харків – 2012 року; «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузі», 28 – 31 травня 2012року, Луцьк; «Сучасні методи

і технології, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах», Київ – 2013 року; 16-та конференція молодих вчених «Наука – майбутнє Литви», 8 травня 2013 року, Вільнюс, Литва; 8-ма міжнародна наукова конференція «TRANSBALTICA», 9 – 10 травня 2013 року, Вільнюс, Литва; 17-та конференція молодих вчених «Наука – майбутнє Литви», 8 травня 2014 року, Вільнюс, Литва; XII міжнародна Всеросійська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія і науково-технічний прогрес. Урбаністіка», 21 листопада 2014 року, Пенза, Росія; міжнародний форум з будівництва, експлуатації та проектування автомобільних доріг і мостів «Автодорекспо» №№ 12 – 14, Київ – 2014 – 2016 рр.; наукові конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів Національного транспортного університету №№ 62 – 73 в 2006 – 2017 рр.

РОЗДІЛ 1
ПРОБЛЕМА СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ. СТАН СПРАВ

1.1 Основні передумови дослідження

Раніше вважалось, що утворення колії на проїзній частині характерно тільки для автомобільних доріг, а на автодорожніх мостах із-за жорсткої основи під покриттям такого явища не повинно бути. Однак в останні роки із збільшенням інтенсивності і швидкості руху на мостах почала з’являтися колія, глибина якої може досягати 50 – 80 мм при загальній товщині покриття 70 – 110 мм. В результаті не тільки швидко скорочується строк служби асфальтобетонного покриття але і погіршуються показники безпеки руху. Комплекс досліджень причин і інтенсивності колієутворення на асфальтобетонних покриттях автодорожніх мостів до цього часу не виконувався в Україні, а також в не повній мірі за кордоном. Не достатньо вивчені причини колієутворення на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів, що не дозволяє прийняти ефективні заходи щодо попередження цього явища або своєчасного ремонту пошкоджених ділянок покриття. В результаті цього явища не тільки порушується комфортність руху транспортних засобів по мостам, а також виникають можливі передумови для створення небезпечних ситуацій через попадання коліс в колію або при виїзді із колії.

Тому у відповідності до розпорядження Кабінету Міністрів України від 3 вересня 2012 р. за № 719-р. «Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування на 2013 – 2018 роки» [1] основні зусилля дорожніх організацій та інших служб повинні бути спрямовані на розв’язання проблеми колієутворення в асфальтобетонному покриттів автомобільних доріг.

Крім того, актуальною залишається проблема, пов'язана з станом покриття автодорожніх мостів та мостів в цілому, що є невід'ємною складовою мережі

автомобільних доріг, більшість з яких (близько 65 відсотків) побудовано до 1970 року за діючими на той час нормативами. З того часу навантаження на автомобільні дороги, особливо транзитних напрямків, значно зросли. Також ці недоліки посилює рівень фінансування дорожньої галузі за останні 10 років, який становив 14-34 відсотки від мінімально необхідної потреби на ремонт та утримання мережі автомобільних доріг [3, 4].

Результатом є погіршення стану доріг, утворення на покритті зсувів, колійності та інших деформацій, чим створюється реальна загроза безпеці дорожнього руху. Тому в дисертаційній роботі вся увага приділяється вивченню проблем колійності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах.

Нині на дорогах України загального користування експлуатується 16100 автодорожніх мостів загальною довжиною 364 км, у тому числі загальнодержавного значення 1900 мостів довжиною 72,5 км та 14200 мостів довжиною 291, 5 км місцевого значення [2 – 5]. З них на сьогодні понад 9500 мостів не відповідають технічним параметрам сучасних норм і фактичному навантаженню, а 702 – потребують термінового ремонту.

В конструктивному відношенні в нашій країні найбільш розповсюдженими є такі типи мостів [6]: залізобетонні балочні розрізні, нерозрізні, температурно-розрізні, балочно-консольні споруди, арочні та рамні мости, металеві мости з суцільних балок або у вигляді ферм з рухом поверху та понизу, мости у вигляді ферм з трикутними або розкосими решітками або багаторешітчастими фермами, а також сталезалізобетонні мости.

Асфальтобетонне покриття (надалі - покриття) на автодорожніх мостах є складовим елементом проїзної частини (в даній роботі розглядається покриття на залізобетонних плитах), з урахуванням шарів гідроізоляції й захисного шару [7 – 22]. Покриття складається з верхнього шару, яке безпосередньо сприймає вплив транспортних навантажень і атмосферних факторів, і несучого шару, що розподіляє й передає навантаження на нижче розташовані елементи проїзної частини. У ряді випадків несучий шар може бути відсутнім, тоді функції розподілу й передачі навантаження виконує покриття. Покриття може мати

додатковий тимчасовий шар, що виконує роль захисного шару або шару зносу (поверхнева обробка та ін.) [23]. Він може влаштовуватись при новому будівництві й відновлюватись в процесі експлуатації або влаштовуватись замість зношеної частини покриття при виконанні ремонтів.

Не дивлячись на те, що останнім часом в якості покриття на автодорожніх мостах почали використовувати нові асфальтобетони (ЩМА [24], литий асфальтобетон [13, 14, 25], дренуючий асфальтобетон [26 – 28] та асфальтобетон на в'яжучих з використанням полімерів [15, 29]), найпоширенішим матеріалом залишається гарячий асфальтобетон [5 – 22].

Вивченням впливу зовнішніх факторів на асфальтобетонне покриття автомобільних доріг та мостів, а також розробкою нових конструктивних рішень, створення нових матеріалів і технології для підвищення довговічності покриття, займались і займаються такі вітчизняні та закордонні вчені: А.Г. Батракова, О.І. Безбабічева, М.В. Бистров, О.К. Біруля, А.О. Білятинський, А.М. Богуславский, В.І. Братчун, О.І. Васильєв, Є.Б. Васильєв, Ю.М. Васильєв, С.Л. Вейцман, В.А. Веренько, В.К. Вирожемський, Д.Ю. Виноградський, М.І. Волков, О.О. Воловик І.П. Гамеляк, Д.Б. Гезенцвей, М.В. Горелишев, В.М. Гоглідзе, Л.М. Гохман, С.К. Головко, В.М. Даценко, С.Г. Джигіт, В.К. Жданюк, Л.В. Захаров, В.О. Золотарьов, М.М. Іванов, О.М. Іщенко, М.І. Калашніков, В.Г. Кваша, І.В. Кияшко, П.М. Коваль, М.М. Корнєєв, Е.В. Котлярський, Я.М. Ковальов, Г.М. Кірюхін, Ю.О. Кірічек, А.І. Лантух-Лященко, А.С. Лапченко, Я.Д Лівщиц, М.П. Лукін, Й.Й. Лучко, Л.І. Мещеряков, А.В. Мішутін, В.В. Мозговий, В.Б Назаренко, В.Ф. Невінгловський, Я.М. Новіков, І.Г. Овчинніков, М.В. Пахомов, Д.О. Павлюк, В.Г. Піскунов, С.М. Попченко, Є.Д. Прусенко, Б.С. Радовський, С.Л. Рутгайзер, А.В. Руденський, І.О. Риб'єв, В.Я. Савенко, Ю.М. Саканський, І.Д. Сахарова, Д. Сібільскій, А. Соловчук, С.Й. Солодкий, М.В. Стабніков, Н.Є. Страхова, Г.К. Сюньї, Б.Б. Телтаєв, М.І. Шейнцвіт, В.І. Шестеріков, А.А. Шкуратовський, К.В. Циркунова, Г.Ф. Фукс, В.Н. Яромко та інші дослідники.

Встановлено, що асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах перебуває у складних умовах експлуатації. На них у процесі служби діють багато

несприятливих факторів, до основних з яких відносять [4, 5, 7, 13, 14, 30]: атмосферні опади; коливання температури; перемінне заморожування-відтавання води в порах і ушкоджених місцях; сонячна радіація; забруднення води й повітря агресивними хімічними засобами, що були викинуті промисловістю; антиожеледні реагенти; рідкі нафтопродукти й кислоти, що потрапляють на поверхню в процесі проїздів транспортних засобів; продукти згоряння палива у двигунах; циклічні навантаження при русі важкого транспорту, що викликають складний несприятливий напружено-деформований стан покриття в різних конструктивних сполученнях. При цьому, негативність всіх перелічених факторів, по відношенню до асфальтобетонного покриття на мостах, посилюється їх одночасною дією.

Дія цих несприятливих факторів приводить до того, що в процесі експлуатації раніше інших елементів конструкцій мостів виходить із ладу, як правило, асфальтобетонне покриття [4, 5, 7, 13, 31]. При цьому ушкодження асфальтобетонного покриття значною мірою приводять до погіршення роботи конструкції прольотних будов і опор через появу можливості проникнення атмосферної вологи, підвищується ступінь динамічної дії у вигляді ударів коліс через нерівність зруйнованого покриття, що може викликати перевантаження окремих елементів [7]. Одним з найрозповсюдженіших видів ушкоджень на поверхні покриття автодорожніх мостів – є колія (рис. 1.1) [7].

З літературних джерел відомо [30, 32 – 34], що колія утворюється там, де транспорт не має можливості зміщуватись в поперечному напрямку, тобто при інтенсивному русі. Такі умови руху характерні як для міських, так і для магістральних доріг. Саме спостереженнями встановлено, що незважаючи на однаковий вид застосовуваного матеріалу й подібні конструкції, експлуатаційні витрати на утримання і ремонт дорожніх покриттів тим більше, чим більша інтенсивність руху вантажних автомобілів [7]. У зв'язку із цим для міських мостів фахівцями КАДІ виділені наступні їхні розряди по інтенсивності руху: поза розрядні – мости з інтенсивністю руху понад 33 тис. авт./добу; 1-го розряду – від

7 до 14 тис. авт./добу; 2-го розряду – від 3 до 7 тис. авт./добу; 3-го розряду – від 1 до 8 тис. авт./добу; 4-го розряду – менше 1 тис. авт./добу.

Ця проблема посилюється ще й тим, що значна кількість мостів була побудована за технічними нормами [35, 36], що на цей час не відповідає умовам руху автотранспорту за габаритами проїжджої частини [37]. На магістральних дорогах експлуатується близько 1500 мостів, що мають габарит проїжджої частини менш, ніж 8 метрів, тобто на цих мостах двох смуговий рух вантажівок неможливий і регулюється знаками [2 – 5, 38]. Таким чином, збільшується кількість проходів колеса з великим навантаженням по одному сліду.

Наступним фактором, що впливає на інтенсивність колієутворення, є вантажонапруженість руху, тобто частка важкого транспорту у складі руху. Сучасний великоваговий автомобільний транспорт має такі характерні відзнаки, як збільшені вагові параметри: розрахункове навантаження на вісь знаходиться в межах від 60 кН до 130 кН [39]; питомий тиск автомобільних шин на покриття, який, як правило, сягає 0,9-1,0 МПа [40] проти розрахункового 0,8 МПа [41].

Крім того, багаторазова зміна норм проектування [35, 36] та несвоєчасна реконструкція призвели до того, що зараз автомобільні мости відрізняються за своєю вантажністю. Параметри вантажопід’ємності згідно норм [37] для мостів, розташованих на автомобільних дорогах І-ІІІ категорії, прийняті при їх розрахунковому навантаженню А-15 та колісному навантаженню НК-100. Це відрізняється від параметрів навантаження Н-18, НК-80 та А-11 [36] під які було запроектовано значну кількість нині діючих мостів в Україні [2, 3]. Це пов’язано з тим, що за останні 10-15 років суттєво змінився якісний склад рухомого навантаження [38].

Багато авторів [40, 42 – 47] схиляється до такої думки, що вертикальні зусилля від транспорту, що рухається, викликають напруження стиску в асфальтобетонних покриттях, які не перевищують 0,8-1,2 МПа. Стискаючі напруження такої величини не утворюють небезпеки для покриття, оскільки міцність асфальтобетону, враховуючи реакцію сусідніх з місцем контакту шарів

матеріалу, навіть при високій температурі, перевищує ці величини. Значно небезпечніша дія розтягуючих та зсувних зусиль [44, 46, 47].

Виходячи з того, що температура асфальтобетонних конструкцій і частота її коливання є дуже важливими характеристиками, потрібно звертати серйозну увагу на кліматичні фактори того чи іншого регіону. Дослідження в цій області проводились різними вченими, в різних країнах та продовжуються і тепер [40, 46, 48 – 50]. Нагрівання асфальтобетонного покриття починається приблизно з 6:00. Період нагрівання триває до 15:00 після чого починається зниження температури. Охолодження верхнього шару триває до 19:00 і температура залишається практично стабільною, тому що швидкість її падіння дуже мала. Високі температури зумовлюють нагрівання асфальтобетонного покриття за рахунок акумулювання сонячної радіації через його темну поверхню, яка майже не віддзеркалює сонячних променів. Цим пояснюється те, що асфальтобетонне покриття має вищу температуру, ніж повітря [48 – 51]. Максимальні температури асфальтобетонного покриття в літній період перевищують 50 ^{o}C, а подекуди 60 ^{o}C [40].

Таким чином, дія на покриття автомобільної дороги комплексу транспортних навантажень, які визивають стираючу дію, нормальні та дотичні напруження від рухомого транспорту, а також ударні навантаження в зонах контакту колеса автомобіля з покриттям у поєднанні з багаторазовою дією сонячної радіації (випромінювання), призводить до великої кількості різних дефектів покриття пластичного характеру, у тому числі і колійності [30, 47, 52 – 58]. Це обумовлено недостатньою деформативною стійкістю асфальтобетону при підвищених температурах та недостатнім зчепленням в шарах, які розташовані нижче. Так слід відмітити, що зміна температури асфальтобетонного покриття в межах від + 10 ^{o}C до + 50 ^{o}C викликає в шарах покриття збільшення вертикальних і горизонтальних переміщень від розрахункового навантаження в 1,5-2 раза [59]. В цій же роботі відмічається [59], що відсутність зчеплення хоча б в одному з конструктивних шарів дорожнього одягу, викликає збільшення горизонтальних переміщень від 3,7 (у верхніх шарах покриття) до 7,7 раза (в нижньому шарі

покриття). Виникнення такого типу пластичних деформацій обумовлена наявністю в асфальтобетоні бітуму, який представляє собою в'язку структуровану рідину [60 – 63].

Згідно з даними Золотарьова В.О. [58] накопичення пластичних деформацій асфальтобетону залежить від наступних факторів: внутрішнього тертя, яке визначається в'язкістю структурованого бітуму, який розділяє зерна мінерального остову; ступеня шорсткості мінеральних зерен, який виражається утворенням хвильових поверхонь ковзання і збільшує силу, необхідну для їх зсуву; опору асфальтобетону розриву, який характеризується адгезійно-когезійними властивостями в'яжучого та ступінь його взаємодії з поверхнею мінеральних часток.

В роботах [49, 64 – 66] пояснюється механізм виникнення пластичних деформацій наступним чином: бітум, який збільшується в об'ємі при нагріванні, заповнює залишкові пори в асфальтобетоні, внаслідок чого зменшується внутрішнє тертя, що спонукає до переупаковки зерен мінеральних часток і підвищеної деформативності. Також, зсувостійкість та колієстійкість асфальтобетону знижується за рахунок надмірної кількості в'яжучого (низьке водонасичення), недостатньої каркасності (малий вміст щебеневих фракцій) та ущільнення, використання малозв'язних не структурованих бітумів, відсутності в складі асфальтобетону карбонатного мінерального порошку [57, 60, 67 – 74].

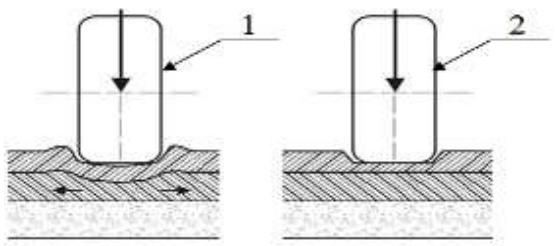
Однією з причин колієутворення на покриттях мостових переходів може слугувати відсутність нормативної документації, щодо складів асфальтобетонів, які застосовуються в таких конструкціях. Це призводить до того, що у вітчизняній практиці й у багатьох закордонних країнах застосовують нормативні документи для автомобільних доріг і аеродромів [4 – 22]. В той же час, специфіка умов експлуатації покриттів на мостових переходах і шляхопроводах істотно відрізняється від тієї, що спостерігається на автомобільних дорогах, особливо в міських умовах [35, 40, 42, 52, 75 – 77]. Тому в ряді країн розробляють нормативи для асфальтобетону, які орієнтовані на конкретні умови експлуатації дорожніх

покриттів на мостах і шляхопроводах. Наприклад, у США існує стандарт на асфальтобетонні покриття для мостів [78, 79].

В ньому передбачене застосування двох спеціальних видів асфальтобетону. Один з них гарячий щільний асфальтобетон на бітумополімерному в'яжучому із застосуванням дисперсно-армуючих синтетичних волокон. Інший – литий асфальтобетон на бітумополімерному в'яжучому. Передбачені спеціальні вимоги до кожного складового компонента асфальтобетону й до властивостей самих асфальтобетонних сумішей, а також до технології їх одержання. Показники властивостей матеріалів визначаються по спеціальним стандартним методикам, що відображають специфіку роботи асфальтобетону на мостах.

Відомо, що найбільш небезпечними в плані появи зсувних деформацій, зокрема колійності, на покриттях є ділянки дороги, де відбувається різка зміна режиму руху транспортних засобів. Зокрема, у відбитку поєднання колеса з поверхнею покриття опір коченню залежить від швидкості руху транспортних засобів, навантаження на вісь, характеристик шин, стану поверхні і характеристик матеріалу покриття [80, 81].

Як зазначено в роботах [80] покриття повинно розподіляти діючі на нього навантаження по можливості на більшу площу. При дії тиску від колеса нижній шар покриття на мостах стискається з одночасни випиранням по обидва боки. Причому цей процес відбувається в межах активної зони. Зарахунок поєднання цих факторів і відбувається утворення випорів. Утворення колії без випорів, особливо на початковій стадії, переважно відбувається за рахунок зносу (рис. 1.1).



1 – колія пластичності; 2 – колія зносу.

Рисунок 1.1 – Види колії на покритті автодорожніх мостах

Світова практика з оцінки утворення колії з використанням лабораторних установок з завантаженням колеса свідчить, що поява колії на асфальтобетонному покритті у досліджуваних зразках відбувається в декілька характерних етапів (рис. 1.2) [82].

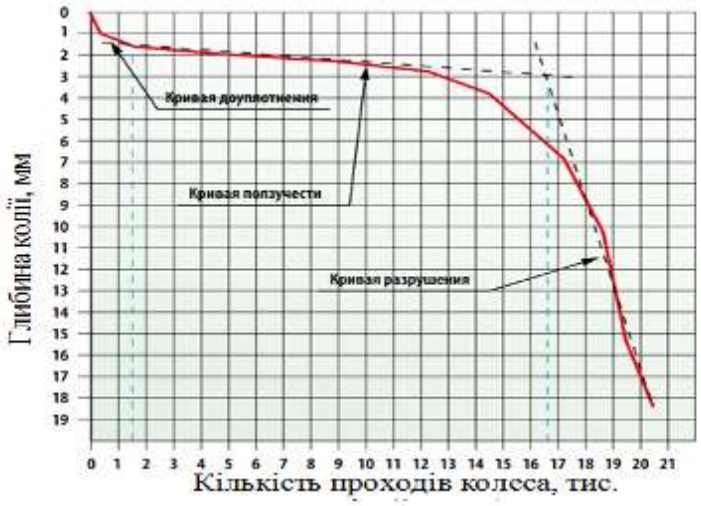


Рисунок 1.2 – Типовий графік розвитку колії при випробуванні в лабораторії (водонасичені зразки, методика H LWT – Гамбург) [82]

Якщо покриття на мостах має добре зчеплення з плитою мосту, то асфальтобетонне покриття буде працювати на згин разом з плитою моста. Тобто як балка з різними модулями пружності при розтягуванні і стисканні в поперечному перерізі. У цьому випадку нейтральна вісь такої балки не проходить через центр ваги перерізу, а ділить його на дві нерівні частини. Епюра напружень в такій балці має злам в точці проходження нейтральної осі балки. У такому випадку, в зоні з найбільшими значеннями модулів, розтягуючі напруження ще більш збільшуються в порівнянні з балкою, у якої нейтральна вісь проходить через центр ваги перерізу (варіант роботи покриття на автомобільних дорогах [81].

Принципова відмінність конструкції дорожнього одягу на дорозі і на автодорожньому мосту з залізобетонними прогоновими будовами наведено в роботі [81]. Зі збільшенням товщини покриття площа на яку розподіляється навантаження у нижньому шарі покриття та тиск зменшуються. При дії

навантаження відбувається стиснення верхніх частин покриття, доущільнення шару, а в нижній частині покриття – розтягнення. Імовірність появи деформацій, які можуть викликати зсувні зусилля в шарі покриття, що призводять до появи колії, пов'язана з одночасною дією навантаження від колеса і кліматичних факторів.

Робота нежорстких дорожніх покриттів на мостах в залежності від кліматичних та експлуатаційних факторів має деякі особливості в порівнянні з роботою покриттів на автомобільних дорогах. Більш інтенсивна зміна температури асфальтобетонного покриття і наявність більш інтенсивного впливу цієї зміни через відсутність демпфуючого впливу земляного полотна.. Дорожній одяг укладається практично на бетонні чи металеві конструкції, які мають іншу теплопровідність і теплоємність, ніж органо-мінеральні матеріали, зокрема, асфальтобетон. Тому температура шару асфальтобетонного покриття буде практично прямо залежати від температури повітря і сили вітру, а швидкість зміни цієї температури буде більша і інтенсивність утворення температурних напружень вище, ніж на автомобільних дорогах. Відповідно влітку асфальтобетонне покриття на мостах може нагріватися до температури, яка в кілька разів перевищує температуру повітря [83].

Робота асфальтобетону то на стиск, то на розтяг з вигином викликають коливання прогонової будови і прогини конструкції (плит, або балок) при одночасному проході транспортного засобу по двох смугах руху [81, 83].

Досвід експлуатації мостів у всьому світі показує, що надійна робота покриття може бути забезпечена тільки спільною роботою його з нижніми шарами, наприклад захисним бетонним шаром, що є основою для дорожнього одягу [81]. В цьому випадку критерієм зсувостійкості міжшарового зчеплення служить розрахунковий опір зсуву (τ_p).

Тому за умову забезпечення зсувостійкості приймається випадок, коли максимальні дотичні напруження від коліс розрахункового автомобіля протягом

терміну служби покриття $(\tau_{\max})$ не перевищують величину розрахункового опору зсуву, тобто :

$$\tau_p > \tau_{\max} \qquad (1.1)$$

Як випливає зі схеми [81], в асфальтобетонному покритті на мостах, максимальні напруження зсуву під навантаженням виникають не тільки між шарами, а й в самих шарах. В основному вони розташовуються на рівні середини його товщини. Напруження у верхньому шарі покриття виникають при проїзді чи гальмуванні транспортного засобу [84].

Тривалі спостереження за процесом колієутворення на автодорожніх мостах, виконані російськими дослідниками [81], починаючи з 2005 р., дозволили їм установити наступну схему виникнення колії в асфальтобетонних покриттях на мостах:

1) Рух автомобілів призводить, насамперед, до виносу частинок в'яжучого з поверхні покриття і ослаблення зв'язку між собою щебінок асфальтобетону на поверхні. Тобто відбувається ослаблення поверхні покриття і часткове стирання граней щебеню. Про це свідчать освітлені поверхні покриття на проїзній частині.

2) Сукупний вплив зсувних деформацій у верхній частині покриття і повторних зусиль стиску-розтягу на поверхні покриття призводить до появи зон внутрішнього тріщиноутворення в покритті на відстані приблизно $0{,}25 \div 0{,}35 \cdot h_{\text{покр}}$. Починається переміщення щебінок, в результаті чого з'являється колія.

3) Поступово збільшується глибина колії і може проявитися тріщина вздовж колії на поверхні асфальтобетону, це також виявлено при наукових дослідженнях професора В.В. Мозгового [85, 86]. З цього моменту починається знос покриття, що супроводжується виносом щебінки.

З огляду на це для мостів в якості основних завдань вирішення проблеми колієутворення пропонується попередження утворення колій шляхом використання більш зсувостійких матеріалів або спеціального підібраних шарів

покриття з високими характеристиками розтягу, при згині і стиску з урахуванням епюр напружень в балках з різними модулями по поперечному перерізу [87]. При ремонті покриття з колією різного ступеня пропонується ліквідація поверхневої колії шляхом видалення матеріалу у районі колії і заповнення її новим більш зсувостійким матеріалом [81, 84].

Таким чином, особливості експлуатації покриття на автодорожніх мостах свідчать, що вони знаходяться в дуже несприятливих умовах і мають незначний термін служби. Однією із причин такого стану може бути відсутність необхідних вимог до матеріалів і конструкції дорожнього покриття, а також до правил експлуатації, які б відображали специфіку їхньої роботи на автодорожніх мостах. Крім того, звертає на себе увагу факт відсутності загальноприйнятих методів та методик, а саме: а) експериментальні – лабораторні з визначення міцності зчеплення асфальтобетонного покриття і жорсткої основи при зсуві; випробування асфальтобетонів на стійкість до накопичення залишкових деформацій з урахуванням різної швидкості руху колеса, різного навантаження і температури та розмірів зразка; б) натурні – при випробуванні асфальтобетонного покриття на жорсткій (бетонній) основі на колійність при русі електромобілів на кільцевому стенді; в) теоретичні – з розрахунку зміни температури покриття в полосі накату та залишкових деформацій у вигляді колії в асфальтобетоні від різної інтенсивності транспортних засобів на автодорожніх мостах; г) практичні – заходи з підвищення стійкості до утворення колії. Головним чином на практиці застосовують лише конструктивні рішення, засновані на досвіді застосування на подібних інших об’єктах і на епізодичних дослідженнях. Це приводить до того, що фактично будь-яке нове влаштоване покриття на автодорожніх мостах перетворюється на великомасштабний натурний експеримент, що не дає впевненості в безвідмовній довговічній роботі покриття.

1.2 Сучасні уявлення щодо причин виникнення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах з урахуванням різних транспортно-експлуатаційних факторів

Найважливішим параметром силового впливу, в результаті якого часто виникає колія на покриттях, є навантаження, яке діє на них від руху транспортного засобу. У таблиці 1.1 наведені відомості про діючі в Європі норми на максимально допустимі навантаження на вісь, загальну масу і довжину автомобілів і автопоїздів. Як випливає з даних таблиці 1.1 в кожній з країн Європи є характерні відмінності.

Таблиця 1.1 – Допустимі в Європі та США навантаження на вісь, загальна маса і довжина автомобілів [88]

Країна	Допустиме навантаження на вісь, т			Загальна маса, т	Довжина, м	Примітка
	одна	дві	три			
Норвегія	10; 11,5 (1)	16-18	16-24	50	18,5	(1) одна ведуча вісь
Швеція	10	16-20	20-24	56	24	
Фінляндія	10(1)	16-20	21-24	56 (2)	22	(1)Автобус 10,5 т. (2)60 т на замерзлому ґрунті
Данія	10	16-20	22-24	44	18,5	
Бельгія	10 12 (1); 13 (2)	16-20	22-27	44	18	(1) Ведуча вісь. (2) зпарена вісь.
Німеччина	11,5	10-20	21-24	40	18,35	
Іспанія	13	14,7-21	21-24	44	18	
Франція	13	21	24	44	18	
Португалія	12	12-20	21-24	44	18,35	
Великобританія	10,5 (1)	20,3 (1)	22,5 (1)	38	18	Можливі менші розміри
Італія	12	17-20	18-24	44	18	
Голландія	10 (1) 13 (2)	10-20(1) 13-26(2)	24-30	50	18	(1) одинична шина. (2) двійні шини.
Австрія	10	16	16	38	18	
Європа	11,5	10-20	21-24	40	18,75	
США	9	16,2	18,9	36		Нормується в штатах.

У Франції та Голландії діють найбільш високі навантаження на вісь. Найбільш висока допустима загальна маса в 56 т характерна для Швеції та Фінляндії. Норвегія і Голландія також допускають досить високу загальну масу транспортного засобу (автомобіля). [88].

У зв'язку з істотними відмінностями в навантаженнях на автомобільні дороги в різних країнах в грудні 1993 року європейська комісія запропонувала гармонізувати параметри по навантаженню на вісь і загальній масі [88].

При цьому, було запропоновано в залежності від конфігурації осей і шин, збільшити максимальну загальну масу екіпажу з 36 до 44 т, а максимальне навантаження на вісь збільшити з 10 до 24 т (одна-, дві- або три вісі), або на ведучу вісь з 11,5 до 19 т (одна або дві вісі). З 1995 року були введені нові європейські розрахункові параметри автотранспорту (новим є: максимальна довжина вантажного автопоїзда – 18,75 м, максимальна ширина контейнеровозів – 2,60 м, для автомобілів звичайної конструкції максимальна ширина в 2,55 м і максимальна висота 4,00 м залишається постійною. Велика увага останнім часом приділяється розрахунку дорожніх покриттів на 6-ти-вісні транспортні засоби загальною вагою до 48 т [88].

У той же час шинна промисловість форсує напрямок розробки від шин з нормальним перетином до шин з низьким перетином і від здвоєних шин до шин Super Single і, таким чином, фактично підвищується несуча здатність шин до максимального контактного тиску шин 1,1 Н/мм^2 [89, 90]. Все це в більшості країн ЄС вимагало посилення дорожніх покриттів і викликало ще більш підвищений інтерес до проблеми боротьби з колієутворення.

Проблема колієутворення на асфальтобетонних покриттях посилюється тим, що в центральній і південній Європі річна температура верхнього шару дорожнього покриття може досягати 70 ºС і вище. При цьому фахівці вважають, що колії утворюються у випадках, коли температура покриття перевищує 35ºС. Для асфальтобетонного покриття на мостах вона може досягати таких температур за досить короткий час, що викликає збільшення температурних напружень, що

значно збільшують значення розтягуючих і згинальних зсувних напружень і підвищують вірогідність появи колії [89, 90].

Заходи щодо попередження утворення колії включають в першу чергу вибір такого типу асфальтобетонної суміші, який знижує або повністю виключає ризик утворення колії в процесі експлуатації покриття на мостах і дорогах [91, 92].

На сьогоднішній день для влаштування тонких шарів покриттів в Європі використовується велика кількість різних матеріалів. Будівельні фірми в різних країнах проводять дослідження, розробляючи нові і покращуючи існуючі зернові склади сумішей [93, 94]. Правда, не всі ці розробки проводилися для попередження колійності на автомобільних дорогах. Покриття на мостах проектувалось аналогічно дорожнім без урахування особливостей їх роботи, зокрема, відсутності демпфуючого впливу ґрунтової основи, зростання ролі температурних напружень і включення до складу дорожнього одягу (в якості основи) матеріалів, що різко відрізняються за своїми міцностними характеристиками (бетон, метал).

Проте багато рішень щодо попередження колієутворення на дорогах можуть бути використані і для боротьби з колійністю на мостах. Тому нижче будуть розглянуті деякі заходи боротьби з колійністю на дорогах з урахуванням перспективи застосування їх на автодорожніх мостах.

Деякі приклади зарубіжного досвіду попередження утворення колій на дорогах і мостах розглянуті в додатку А [44, 81, 84, 90, 93 – 110].

Нові концепції застосування високоякісних дорожньо-будівельних матеріалів, зокрема, асфальтобетонів, повинні увійти в повсякденну практику, коли мова йде про вплив дії коліс великовагових транспортних засобів на асфальтобетонне покриття, а особливо автодорожніх мостів.

1.3 Критерії і методи оцінки стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії

Великий вклад з розв'язку проблем деформування та утворення колії в матеріалах дорожніх одягів та асфальтобетонному покритті від дії пневматичних коліс транспорту та режимів їх роботи внесли такі вчені як: А.С. Александров, Г.М. Анісімов, І.О. Барашков, А.Г. Батракова, І.М. Бартенєв, А.М. Богуславського, Г.О. Бонченко, А.О. Білятинський, М.В. Бистров О.М. Бурмистрова, А.П. Васильєв, О.О. Воловик, І.А. Вікович, І.П. Гамеляк, Л.Б. Гезенцвей, Л.М. Гохман, С.К. Головко, К. Джонсон, Ж.В. Дорожко, В.К. Жданюк, І.А.Золотарь, В.О. Золотарьов, А.Ю. Ішлінскій, Д.Д. Івлев, М.М. Іванов, В.Д. Казарновський, А.С. Колбановская Г.М. Кірюхін, Ю.О. Кірічек, В.П. Матуа, О.В. Марчук, В.М. Меньшиков, О.Ю. Мерзлікін, В.В. Мозговий, С.О. Мирончук, А.В. Мішутін, А.І. Нікіфорова, І.Г. Овчиников, Д.О. Павлюк, Б.С. Радовський, А.В. Руденська, О.О. Росказов, В.М. Ряпухін, В.Я. Савенко, С.Й. Солодкий, Б.Б. Телтаєв, В.Б. Фадеев, М.Я.Хархута, М.О. Цитович, І.Р. Шегельман, В.І. Шестеріков, [44, 47, 111-134] та інші дослідники. Аналіз цих робіт показав, що на даний час математичні моделі з використанням реологічних основ механіки матеріалу дуже складні, зв'язані з його показниками, які визначаються в лабораторних умовах, в такому випадку авторами в своїх роботах [117-120, 125] запропоновано спрощені математичні моделі колієутворення в матеріалі дорожнього одягу від дії жорсткого та пневматичного колеса. В даних моделях одночасно не враховується термореологічні властивості матеріалу, різний час дії навантаження пневматичних коліс від транспортного засобу та температура, а також зміна товщина покриття. З урахуванням даних зауважень таку модель колієутворення можна застосувати для асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах з відповідним удосконаленням.

В рамках проблеми підвищення довговічності асфальтобетонного покриття на штучних спорудах, однією з найважливіших задач вважають збереження рівності покриття у часі. Поступове накопичення пластичних деформацій в

дорожньому покритті призводить до порушення рівності поверхні покриття в повздовжньому та поперечному напрямках, що в свою чергу сприяє значному зростанню динамічних впливів від руху автомобілів та швидкому виникненню деформацій і руйнувань у вигляді хвиль, колій, напливів.

За результатами проведених досліджень і випробувань, а також за аналізом отриманих результатів [48, 80, 135, 136], виділяють такі види колії: колія залишкових деформацій асфальтобетонного покриття, колія залишкових деформацій всього дорожнього одягу, колія стирання. Оскільки на штучних спорудах, в якості конструктивних шарів, відсутнє земляне полотно, а дискретні шари мало поширені, то найбільш актуальною є перший вид колії.

Одним з критеріїв оцінки опору накопиченню залишкових деформацій в асфальтобетонних покриттях є зсувостійкість [57, 58, 64, 67, 70, 137]. Не дивлячись на велику кількість методів і методик визначення зсувостійкості в діючих нормативних документах [41] цей критерій враховується тільки відносно ґрунтів і мало зв’язаних шарів конструкцій.

В роботах [41, 138 – 142] показником зсувостійкості прийнято вважати межу міцності на стиск при температурі 50 ^{o}C і швидкості деформування 3 мм/хв. Ці параметри визначені методикою випробування за ДСТУ [142].

Яромко В.М. [143] запропонував оцінювати зсувостійкість асфальтобетонів комплексним показником, який визначається відношенням фактичного значення міцності при 50 ^{o}C до нормативного. Ця методика фактично ні чим не відрізняється від тієї, що запропоновано в [41, 138 – 142].

Застосовувати показник міцності в якості характеристики деформативних властивостей матеріалу, неприпустимо, не кажучи про те, що випробування зразка на одноосний стиск не відтворює реальних умов роботи асфальтобетону в дорожньому покритті, як з точки зору напружено-деформованого стану, так і з точки зору характеру прикладення навантажень. До того ж, це доказано в роботі [70] на великому експериментальному матеріалі.

Слід відмітити, що більшість методів визначення зсувостійкості асфальтобетону базується на теорії Мора та законі тертя Кулона [66, 67, 144 –

155], в яких величина діючих напружень порівнюється з максимально допустимим. Звісно, що в цих роботах є свої відмінності. Якщо в роботах [146, 147, 151] запропоновано проводити випробування зразків асфальтобетону на одноосний стиск і розтяг по твірній («бразильський метод»), то в роботах [74, 152, 156] на одноосний стиск та стиск за схемою Маршала. За результатами випробувань визначають кут внутрішнього тертя і зчеплення. Саме ці параметри, як критерії зсувостійкості, введені в ДСТУ Б В.2.7-127:2015 «Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастиковий». В роботах [147, 149, 150] зчеплення розкладають на зчеплення мінерального остову та зчеплення, обумовлене властивостями асфальтов'яжучої речовини. В роботі [67] запропоновано визначати зсувостійкість асфальтобетонів та асфальтополімербетонів за залежністю, яка поєднує: закон міцності І.А. Риб'єва [45], який базується на відношенні товщини плівки системи з оптимальною структурою до товщини плівки системи з структурою відмінною від оптимальної; формулу Кулона [156]; коефіцієнт розвитку поверхні, який запропоновано Золотарьовим В.О. [60] відносно асфальтобетону при розрахунках на міцність.

В роботі [47] розрахунки на міцність, які базуються на теоріїї Мора і пов'язаний з нею кут внутрішнього тертя та зчеплення, підлягають критичному аналізу. Бонченко Г.А. [47] справедливо відмічає, що теорія Мора призначена для визначення умов руйнування малопластичних тіл. Асфальтобетон же при температурі 50 ^{o}C і вище являє собою в'язко-пружньо-пластичний матеріал, який виявляє залишкові деформації при великому циклі навантаження. При цьому, пластичні деформації можуть перевищувати пружні на один, два порядки. Крім того, Бонченко Г. А. [47], розробив теоретичні положення і виконав експериментальні дослідження зсувостійкості асфальтобетону в умовах дії нормальних і дотичних навантажень при високих позитивних експлуатаційних температурах.

Зсувостійкість на «базі N» (N - кількість циклів навантаження) вимірюється середньою залишковою деформацією зсуву, накопиченою в шарі протягом стандартного числа циклів N при стандартному законі зміни або ймовірному

розподілу імпульсного навантаження в заданих температурних і вологісних умовах. Гранична залишкова деформація є визначається з умови, що їй відповідає встановлене нормою відхилення висоти поперечних і поздовжніх профілів, що вимірюються шаблоном (триметровою рейкою). Запропоновано модель деформування асфальтобетону (Додаток А, Таблиця А.1, (А.1)).

Дослідження Золотарьова В.О. [57] показують, що процес зсуву асфальтобетону може бути описаний біноміальним законом тертя-ковзання Дерягіна Б.В. [157]. Але останнім часом, цей закон для описання процесів зсуву асфальтобетону практично не використовується.

В роботах [66, 148, 158 – 160] зсувостійкість асфальтобетонів оцінюють при трьохосьовому стиску, коли враховуються всі нормальні компоненти тензору напружень. Одним з різновидів випробування асфальтобетону на трьохосьовий стиск є визначення стійкості на стабілометрі Хвіма [161, 162]. Показник опору за Хвімом визначається аналогічно тому, як це робиться в механіці ґрунтів [163], за допомогою коефіцієнта бічного тиску. Однак, застосування методу трьохосового стиску, для прогнозування зсувостійкості асфальтобетону важко реалізувати. Також при цьому методі є певна невизначеність у відношенні критерію зсувостійкості. Метод Хвіма занадто суб’єктивний при виборі оптимальної кількості бітуму в асфальтобетоні, що може призводити до низької довговічності покриття [48].

При нормуванні зсувостійкості критеріями пластичності визначають: показник стійкості та умовної пластичності за Маршалом [164] і за Сахаровим П.А. [165]; коефіцієнти пластичності [166] та рухомості, які визначаються при випробуванні асфальтобетону на стиск [45]; величину гранично допустимої деформації [167]. В цих випробуваннях асфальтобетон одноразово навантажується і виникають великі деформації. Слід відмітити, що отримані результати мають дуже поверхневе відношення до зсувостійкості, яка, як відомо, пов'язана з утомою матеріалу при навантаженнях, які значно менші граничних. Що стосується методу Маршала, то показник стійкості неадекватно оцінює опір зсуву асфальтобетонного покриття [49, 168]. До того ж, в роботі [161]

відмічається, що метод Маршала не має гарного збігу результатів для паралельних зразків. Тому для цього визначення часто випробовують по вісім зразків, тоді як для звичайного визначення міцності на стиск достатньо трьох.

В роботах [169 – 172] можливість виникнення залишкових деформацій, в тому числі і у вигляді колії, прогнозують за допомогою величини дотичного напруження, яке виникає в асфальтобетонному шарі по його товщині. В цьому випадку навантаження прикладається у вигляді штампа. В усіх роботах [169 – 172] при обчисленні дотичних напружень враховується: тиск від колеса автомобіля, радіус кола, що відповідає рівновеликому відбитку сліду колеса від навантаження, глибина розподілення навантажень. До того ж, в роботах [169, 170] враховується модуль пружності шарів дорожнього одягу і кут внутрішнього тертя матеріалу, а в роботі [172] – коефіцієнт зчеплення колеса автомобіля з покриттям дороги і її повздовжній нахил. Однак перераховані методи не враховують реальних умов деформування покриття і використовуються тільки для порівняльного аналізу.

Ще один напрям, який характеризує зсувостійкість асфальтобетону, передбачає використання феноменологічних реологічних моделей Богуславського О.М. (паралельне поєднання елементів Кельвіна та Максвела) з поєднанням тіла Сен-Венана [173], модель, запропонована Гезенцвеєм Л.Б. (тіло Максвела) [161], модель Кіма О.Х. (тіло Кельвіна) [164], нелінійна модель Фітцжеральда [174]. Дослідження реологічних властивостей асфальтобетону представляє зацікавленість, але вони не доведені до практичного використання. Крім того, моделювання на основі феноменологічних моделей не є характерним для асфальтобетону, з точки зору оцінки їх зсувостійкості.

В рамках національної програми США Strategic Highway Research Program (SHRP) був розроблений прилад на зсув «Superpave Shear Tester» (SST), який використовується для проведення експериментальних досліджень та проектування асфальтобетону за методом «Superpave» [49, 175]. Цей прилад являє собою складний пристрій, який складається з завантажувальної частини, системи реєстрації і контролю напружень та деформацій зразка (зі зворотнім зв'язком),

камери з регульованим тиском до 1 МПа та постійної температури в діапазоні від 0 до 70 ^{o}C, гідроприводу для створення осьових та зсувних навантажень. Прилад дозволяє проводити декілька видів випробовувань циліндричних зразків асфальтобетону шляхом прикладення одночасно бокового тиску, зсувних навантажень при різних режимах. Отримані при випробуваннях асфальтобетонних зразків дані дозволяють прогнозувати виникнення колії в покритті [175]. Важливою особливістю приладу SST, яка відрізняє його від інших відомих приладів для випробування будівельних матеріалів – це можливість проведення випробувань при постійній висоті зразка. Тим самим моделюється ситуація в середині покриття, де можливість зміни об'єму матеріалу при зсуві обмежена. Єдиним недоліком приладу, на думку автора [175] – це некоректність напружено-деформованого стану: замість чистого зсуву при крученні до торців циліндра прикладені паралельні та протилежно направлені сили.

В роботі [155] розрахункова модель прогнозування колієстійкості виражена через сумарну залишкову деформацію асфальтобетону, яка накопичується за розрахунковий період експлуатації покриття. В цьому випадку деформування розглядається як в'язко-пластичне, для якого характерний взаємозв'язок між часом до руйнування і швидкістю незворотної деформації зразків. Цей взаємозв'язок обумовлений єдиним термофлуктуаційним механізмом повзучості та руйнування. Параметри, які характеризують зміну структури, такі як енергія активації, ступінь пластичності, показник аномалії в'язкості, визначають закономірності зміни довговічності, в'язкості та пружньої післядії асфальтобетону від умов випробування. Недоліком цієї моделі є те, що такі параметри як енергія активації, показник аномалії в'язкості більш притаманні бітумам ніж асфальтобетонам [176]. Таким чином, спроби експериментально оцінювати стійкість асфальтобетону до утворення колійності в лабораторних умовах, використовуючи різні схеми випробувань на стиск, зріз, кручення, стискання в обоймі, продавлювання, при випробуваннях на трьохосьовий стиск в стабілометрах і за допомогою інших методик, отримуючи різні лабораторні показники – не завжди давали позитивний результат по колійності

асфальтобетонного покриття і до цього часу носять дискусійний характер [47, 48, 57, 67, 153 – 155, 158, 161, 168, 170, 172 – 174]. Крім того, такого роду методи є достатньо умовними, оскільки не в повній мірі відображають реальні умови роботи асфальтобетону в покритті за такими важливими критеріями як режим навантаження та напружено-деформований стан.

Тому останнім часом при експериментальній оцінці колійності асфальтобетону почали віддавати перевагу безпосередньо випробуванням асфальтобетону на колійність за допомогою коліс, які імітують реальні умови роботи його в покритті при поступовому накопиченні залишкових деформацій від циклічної дії навантаження. Серед цих методів виділяють три основні групи: 1) полігони, на яких проводяться комплексні випробування дорожніх одягів в реальних умовах під заданим навантаженням [69, 82, 177]; 2) випробувальні стенди, які випробовують дорожні одяги чи шари асфальтобетону в умовах моделювання, за допомогою звичайного колеса вантажного автомобіля чи колес менших розмірів [69, 82, 136, 178 – 183]; 3) лабораторні методи, які призначені для умовних випробувань асфальтобетону на лабораторній установці в умовах моделювання з вимірюванням параметрів колієутворення [40, 69, 71 – 73, 82 184 – 188]. Головним недоліком полігонів [69] – є їх вартість, до того ж вони займають дуже велику площу, тому більше використовуються випробувальні стенди та лабораторні установки.

Зараз існує декілька стендових методів [69, 82, 136, 178-183]: установка лабораторії Laboratoire Central des Ponts and Chaussees (LCPC); датська установка Danish Road Testing Machine (DRTM); установка Голанського університету Технології – Lintrack; румунська установка Технічного університету м. Ясси; словацька установка Vuis-Cesty; установка прискореного навантаження Accelerated Loading Facility (ALF); Mobile Load Simulator (MLS); стенд ДерждорНДІ. Ці стенди відрізняються між собою за наступними параметрами: навантаження на покриття – LCPC (при здвоєних колесах від 40 до 75 кН; при використанні шасі літака 280 кН), DRTM (до 65 кН), Lintrack (від 15 до 100 кН), ALF (від 43 до 100 кН), стенд ДерждорНДІ (до 115 кН); тип колеса – LCPC

(здвоєні колеса, шасі літака), DRTM (вантажне колесо реального розміру), Lintrack (одинарні або здвоєні колеса), установка Технічного університету м. Ясси, Vuis-Cesty (різні види коліс та осей), ALF (здвоєна або широка одинарна шина), ДерждорНДІ (як одинарні, так і спарені колеса); температура випробувань: LCPC (температура природного середовища), DRTM (від + 10 ^{o}C до + 30 ^{o}C), установка Технічного університету м. Ясси (температура природного середовища), ALF (температура на глибині покриття – 46, 52, 58, 64, 70 и 76 ^{o}C), ДерждорНДІ (температура природного середовища); швидкість руху колеса – LCPC (до 105 км/год), DRTM (до 30 км/год), Lintrack (20 км/год), установка Технічного університету м. Ясси (до 50 км/год), Vuis-Cesty (до 50 км/год), ALF (18,5 км/год); траєкторія руху колеса – кільцеві (LCPC, установка Технічного університету м. Ясси, Vuis-Cesty, стенд ДерждорНДІ); лінійні (DRTM, Lintrack, ALF).

До недоліків кільцевих стендів можна віднести: громіздкість, можливість розміщення тільки на відкритих територіях, негативний вплив центробіжних сил на загальний результат колійності. Лінійні методи не дозволяють влаштовувати випробувальні секції в місцях, де колесо сповільнюється чи починає прискорюватись, крім того, в лінійних методах по одній полосі накату колесо рухається як в одну, так і в іншу, що не відповідає реальним дорожнім умовам. Крім того, єдиним недоліком, як для лінійних стендів, так і кільцевих залишається їх вартість. Недоліком окремих методів також є обмеженість за температурним фактором. Наприклад, метод DRTM має максимальну температуру випробування 30 ^{o}C, а методи LCPC, ДерждорНДІ при випробуванні на колійність при високих температурах обмежені добовими рамками такої пори року.

Лабораторні методи випробувань навантаженням у вигляді колеса переслідують ціль дати відносну характеристику поведінки асфальтобетону при багаторазових навантаженнях та визначених кліматичних умовах випробування. Як правило, ці методи дозволяють випробувати циліндричні зразки з асфальтобетону чи зразки у вигляді плит. При цьому, зразки, що випробовуються,

можуть бути приготовані як в лабораторних умовах, так і взяті з готового асфальтобетонного покриття автомобільної дороги [4, 40, 69, 71-73, 82, 184 – 188].

Кожний конкретний метод має відмінності за деякими характеристиками, з яких найбільш важливими є наступні: вид зразків – плити (прилади FRT, HWTD, PURWheel, коліємери ХНАДУ, ДелждорНДІ, МАДІ, НТУ (КАДІ)-ДНТЦ «Дор'якість» ПМА 218-21476215-450), плити та циліндричні зразки (прилади WTD, APA); розмірами зразків – FRT (500 мм × 180 мм × 50 чи 100 мм), GLWT (380 мм × 125 мм × 75 мм), HWTD (320 мм × 260 мм × 40,8-120 мм), коліємір ДерждорНДІ (300 мм × 100 мм × 30-80 мм), ПМА 218-21476215-450 (230 мм × 160 мм × до 70 мм); навантаження, яке прикладається до зразків – FRT (5000 ± 50 Н), APA (740 Н), WTD (520 Н), коліємір ХНАДУ (57,5 кН); використовуються різні типи колеса – металеве (HWTD, PURWheel), металеве з резиновою накладкою (WTD, SCRT, МАДІ, ХНАДУ, ПМА 218-21476215-450), металеве, яке рухається по пневматичному шлангу з повітрям визначеного тиску (APA), реальне або зменшена копія пневматичного колеса (FRT, MMLS); середовище випробування – випробування у сухому стані (FRT, WTD, ХНАДУ, ДерждорНДІ, ПМА 218-21476215-450), випробування у водонасиченому стані (HWTD), випробування зразків, як в сухому стані, так і в водонасиченому стані (APA); розміри приладів – великорозмірні (FRT), малорозмірні (HWTD, MMLS, SCRT, PURWheel, МАДІ, ХНАДУ, ПМА 218-21476215-450); температурний режим – FRT (60 ^{o}C), GLWT (41 ^{o}C), HWTD (40-50 ^{o}C), WTD (50-60 ^{o}C), коліємір ХНАДУ (до 65 ^{o}C), прилад ДерждорНДІ (30-65 ^{o}C), ПМА 218-21476215-450 (до 60 ^{o}C); частота прикладення навантаження або швидкість руху колеса – FRT (7 км/год), GLWT (2 км/год), WTD (42 проходи за хвилину), коліємір ДерждорНДІ (23 чи 18 проходів за хвилину), ПМА 218-21476215-450 (один прохід за 1 секунду).

Недоліком приладів з використанням металевого колеса (прилади HWTD, PURWheel) є те, що вони не в повній мірі відтворюють вплив на матеріал, через це матеріал може почати кришитися в процесі випробування, чого не проявляється при використанні інших видів коліс. Випробування при використанні пневматичних та металевих коліс, які прикладаються через

пневматичний шланг (прилади FRT, MMLS, APA) надзвичайно складні в зв’язку з підтриманням в них потрібного тиску та більш складної конструкції. Великорозмірні пристрої (FRT) не підходять для випробування кернів.

Найкраще використовувати коліємір з обрезиненим металевим колесом (WTD, SCRT, МАДІ, ХНАДУ, ПМА 218-21476215-450, ДерждорНДІ). Вони поєднують в собі переваги інших видів коліс, попереджують дроблення матеріалу під час випробувань, а також більш прості при використанні. Крім того, для нормування властивостей матеріалів країнами ЄС були сформульовані єдині вимоги по відношенню до малорозмірних приладів з оцінки колієутворення. Саме за цими вимогами використовують металеве колесо з резиновими накладками.

Істотним недоліком українських нормативних документів з проектування дорожнього одягу на мостових переходах, починаючи з ВБН В.2.3-218-186 [41] та ДБН В.2.3-14 [37], є відсутність розділів з прогнозування стану дорожнього одягу в процесі її служби. Кінець розрахункового терміну служби ніяк не пов'язується з обсягом руйнувань. Простіше кажучи, невідомо, яка буде середня глибина колії. Не дивлячись на це, існують різні методики прогнозування глибини колії.

Для прогнозування накопичення пошкоджень у вигляді колії, а також повздовжніх і поперечних нерівностей в звіті NCHRP 1-37 A [189], кожний рік розбивається на періоди (наприклад, тижневі або двотижневі), в межах яких максимальна денна температура покриття вважається постійною. Враховується також вимірювання інтенсивності руху протягом доби.

Наприклад, щоб прогнозувати колію, обумовлену накопиченням деформацій асфальтобетонного покриття, виділяють умовний вертикальний «стовпчик» в асфальтобетонному покритті, розбивають його на декілька «підшарів», обчислюють з теорії пружності відносну вертикальну деформацію стиснення кожного підшару ε_r, що залежить від модуля пружності асфальтобетону, товщини і модулів всіх шарів і параметрів навантаження (позначення r тут не пов’язано з системою координат). Частина цієї деформації стиснення ε_p буде залишковою. Її знаходять за емпіричною формулою, яка отримана в лабораторії при випробуванні асфальтобетонів, залежно від

температури T і числа попередніх навантажень N (Додаток А, таблиця А.1, (А.2)). Так поступають з усіма підшарами даного стовпчика. Вираховують залишкові деформації підшарів, множать на їх товщини і складають (Додаток А, таблиця А.1, (А.3)).

Таким шляхом отримують абсолютну деформацію стиснення покриття в тому місці поперечного перерізу, де виділено стовпчик. Аналогічні розрахунки проводять для інших «стовпчиків», якщо необхідно побудувати обрис поперечного профілю в результаті утворення колії. Ці розрахунки проводять для всіх двотижневих періодів, на які розбитий термін проектування. Подібним чином розраховують залишкові деформації стиснення й інших шарів. В результаті отримують графік, по осі абсцис відкладаються місяці, по осі ординат - максимальну глибину колії. В [190] зазначається, що такі розрахунки досить трудомісткі і без комп'ютера практично нездійсненні. Тому розрахунок дорожнього одягу йде досить довго – на комп'ютері з частотою 2,8 ГГц мікропроцесора чистий час розрахунку складає близько 1,5 хв на кожен рік аналізованого періоду, тобто для 30-річного періоду розрахунок йде не менше 45 хв для кожного варіанту дорожнього одягу. Ці розрахунки, на жаль, поки що й не дуже точні. Їх точність залежить від того, наскільки добре було проведено калібрування (наприклад, у формулі Додаток А, Таблиця А.1, (А.1) для залишкової деформації є шість калібровочних коефіцієнтів, що відображають вплив складу суміші та інших факторів).

Так наприклад в [191] формула приймає вигляд, яка наведена в додатку А, таблиця А.1, (А.4), а в роботі [192] ця формула має інший вигляд (додаток А, таблиця А.1, (А.5). В роботі [193] виведено залежність глибини колієутворення від числа прикладень навантажень (80 кН), кількості мінерального порошку та фракції вище 2,36 мм, вмісту в'яжучого, залишкової пористості (додаток А, таблиця А.1, (А.6). Механо-імпірична модель приведена в [193], критерієм утворення колії в цій роботі є деформація при зсуві: (додаток А, таблиця А.1, (А.7). Недоліком даної моделі (додаток А, таблиця А.1, (А.7) є те, що для визначення пластичних деформацій враховується тільки напруження зсуву, в той

же час, при випробуванні на колієутворення, крім згаданих, важливу роль відіграють стискаючі напруження. Крім того, немає точного розподілу саме за які властивості матеріалу відповідають коефіцієнти *a, b, c.*

Ще один підхід було запропоновано Х'юкеломом та Кломпом [194] і Барксдейлом [159], та використано Макліном [195] та Фрімі [196]. Він ґрунтується на використанні розрахунку пружних деформацій для підрахунку напружень у асфальтобетонному шарі разом з залежностями, які пов'язують напруження, визначені до пластичних деформацій для певної кількості повторів напружень (називається методикою пошарових деформацій (layered-strain procedure)). Складання цих деформацій по глибині шару дає глибину колії, яка могла б утворитися. За цією методикою результати випробувань повзучості включені до наступного рівняння для визначення колієутворення (додаток А, таблиця А.1, (А.8)). Хоча ця методика не є достатньо точною для прогнозування фактичного профілю колієутворення внаслідок повторних наїздів транспортних засобів, вона дає інформацію про відносну роботу різних асфальтобетонів, які містять традиційне бітумне в'яжуче. Якщо заплановано використовувати суміші на модифікованому бітумному в'яжучому, то використання результатів випробувань на повзучість для цих сумішей у рівнянні (додаток А, таблиця А.1, (А.8)) не дасть вірну оцінку роботи асфальтобетону і асфальтобетони на таких в'яжучих працюють інакше під впливом руху транспортних засобів, порівняно з їх поведінкою при повзучості. Наприклад, робота дослідників з Шелл показує, що використання результатів випробувань на повзучість може привести до надмірного прогнозування колієутворення асфальтобетонів на модифікованих в'яжучих [197].

При випробуванні асфальтобетону на колієутворення по французькому методу (пневматичне колесо) для 16 асфальтобетонів, виготовлених на бітумах марок 40/50, 60/70, 80/100, 180/200 та в'яжучих з трьома концентраціями полімеру для кожної вихідної марки бітуму, була отримана формула, що дозволяє прораховувати глибину колії асфальтобетонів та асфальтополімербетонів [198] (додаток А, таблиця А.1, (А.9). Після логарифмування рівняння (додаток А,

таблиця А.1, (А.9) було отримано спрощений вираз (додаток А, таблиця А.1, (А.10). В роботах [199 – 201], так само як в роботі [198], наводяться формули для визначення величини колії, в основу яких закладена глибина колії після незначної кількості проходів: в роботі [199, 200] після 100 проходів, в роботі [201] після 200 проходів (додаток А, таблиця А.1, (А.11 – А.13).

До недоліків рівнянь (додаток А, таблиця А.1, (А.9 – А.13) можна віднести те, що залишається так і незрозумілим при якій кількості проходів потрібно визначати початкову глибину. До того ж, після ста проходів колеса не для кожного виду асфальтобетону може з'явитися колія. Крім цього, залишається незрозумілим, саме які параметри *A*, *B*, *a* відображають дані коефіцієнти. Залишається незрозумілим фізичний вміст коефіцієнту пропорційності в формулі (додаток А, таблиця А.1, (А.13).

Eisenmann J. та Hilmer A. [202] стверджують, що впливати на процес утворення колії можна двома шляхами: 1) оптимізацією складу асфальтобетону та дорожньої конструкції; 2) конструкцією та параметрами коліємірa. Вони запропонували функціональний взаємозв'язок між глибиною колії з однієї сторони і параметрами навантаження та властивостями матеріалу з іншої: (додаток А, таблиця А.1, (А.14). За методологією Loo P.J. [203] пластичну (залишкову) деформацію в асфальтобетонному шарі визначають за допомогою залежності, яка наведена в додатку А, таблиця А.1, (А.15). За жорсткістю (модулем деформації) бітуму з допомогою діаграми визначають модуль деформації асфальтобетону. Модуль деформації бітуму визначають за формулою, яка наведена в додатку А, таблиця А.1, (А.16). При цьому в'язкість визначають за номограмою Shell. Аналітичний вираз, який наведено в додатку А, таблиця А.1, (А.16) не отримав широкого використання через те, що він не враховує гранулометричний склад асфальтобетону. Тому його використання можливо для подібних типів асфальтобетону. В роботі [204] пластична деформація обчислюється за формулою (додаток А, таблиця А.1, (А.17)). Аналітичний вираз (додаток А, таблиця А.1, (А.17)) є видозміненим аналогом формули, запропонованої Monismith'ом 1.20 [205] (додаток А, таблиця А.1, (А.18)). Різниця

між формулами (додаток А, таблиця А.1, (А.17, А.18) полягає в тому, що в формулі (додаток А, таблиця А.1, (А.18) замість кількості циклів навантаження використовується час прикладення навантаження. Потім підставив значення пластичної (залишкової) деформації обчислюють глибину колії (додаток А, таблиця А.1, (А.19)).

Залишкову (пластичну) деформацію вираховують і за іншими формулами, які мають видозмінений характер формули Monismith'а (додаток А, таблиця А.1, (А.18)) [205]. Модель VESYS, яка розроблена Kenis'ом [206] (додаток А, таблиця А.1, (А.20)). Модель штату Огайо, яка розроблена Majidzadeh'ом [207] (додаток А, таблиця А.1, (А.21)). Модель Superpave розроблена Lytton'ом [208] (додаток А, таблиця А.1, (А.22)). Модель AASHTO розроблена Witczak'ом [209] (додаток А, таблиця А.1, (А.23)). Формула Wolff H., Visser A. [210] (додаток А, таблиця А.1, (А.24)). Формула Francken L., Clauwaert C. [211] (додаток А, таблиця А.1, (А.25)). Формула Theyse H.L. [212] (додаток А, таблиця А.1, (А.26)). Після обчислення залишкової деформації за формулами (додаток А, таблиця А.1, (А.20 – А.26)), її підставляють в формулу (додаток А, таблиця А.1, (А.21)) і вираховують глибину колії. Barksdale R.D. [159] запропонував математичну модель в якій процес колієутворення в асфальтобетоні виражається накопиченням незворотних деформацій: (додаток А, таблиця А.1, (А.27)). Tseng K.H. і Lytton R.L. [213] запропонували дві формули для розрахунку накопичених пластичних деформацій від числа прикладення навантаження (додаток А, таблиця А.1, (А.28 – А.30)).

В роботі [214] залишкову деформацію асфальтобетонного покриття запропоновано вираховувати з урахуванням радіуса відбитка колеса, товщини шару, швидкості руху колеса, часу прикладення навантаження (додаток А, таблиця А.1, (А.31)). В роботі [215] глибину колії асфальтобетонного покриття вираховують як сумарну колію за кожний період, тобто коли фактори ризику накопичення пластичних деформацій постійні (додаток А, таблиця А.1, (А.32)). Huurman M. [216] для визначення глибини колії запропонував наступну формулу (додаток А, таблиця А.1, (А.33)). Формула (додаток А, таблиця А.1, (А.26)) виведена на основі сумування миттєвої пластичної деформації та в'язко-

пластичної деформації [217]: (додаток А, таблиця А.1, (А.34)). Вирази (додаток А, таблиця А.1, (А.20 – А.34)) не отримали широкого використання через нерозкритість кількісних коефіцієнтів, які важко отримати, обмеженого впливу структурних факторів. Крім того, більшість формул не враховує температуру випробування, а також термореологічні властивості асфальтобетону. Тому вище наведений аналіз свідчить про відсутність адекватного методу оцінки колієстійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах, який на стадії проектування та під час його експлуатації враховував особливостей конструкції дорожнього одягу з урахуванням термореологічних властивостей асфальтобетону та параметрів впливу транспортного і кліматичного факторів.

1.4 Способи підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії

На даний час існує дві основні групи підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах [218]. Перша – це заходи попередження утворення колій, які включають: розрахунок і конструювання дорожнього одягу з урахуванням накопичення залишкової деформації; влаштування верхніх шарів покриття з матеріалів із високою колієстійкістю та опором зносу; використання армуючих прошарків з геосинтетичних матеріалів у шарах покриття. Тобто, заходи направлені на підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття. Друга – це заходи, що уповільнюють виникнення колії: обмеження руху великовантажного транспорту; обмеження руху в денний час, при високих літніх температурах; контроль за виконанням вимог за фактичною величиною навантаження на вісь автомобіля; рівномірний розподіл руху по всій ширині проїзної частини (при наявності широкої проїзної частини); ліквідація місць зниження швидкості руху вантажних автомобілів, заторів та зупинок (для скорочення довготривалого прикладання навантажень).

Для безперебійного і ефективного функціонування автомобільних доріг і мостових споруд краще підвищувати колієстійкість за допомогою першої групи

заходів, тим паче, що друга група лише уповільнюють виникнення колії. Стійкість асфальтобетонів до колієутворення, як на автомобільних дорогах, так і на автодорожніх мостах залежить від різних параметрів, які підрозділяються на структурні (гранулометричний склад, форма та властивості кам'яного матеріалу, кількість та характеристика в'яжучого) і технологічні (ступінь ущільнення).

Одним з шляхів підвищення стійкості до колієутворення верхніх шарів покриття на автодорожніх мостах є зміна гранулометричного складу і властивостей мінеральних складових. Результати порівняння експериментальних випробувань стійкості асфальтобетонів різної гранулометрії до утворення колії приведені в роботах [71 – 74, 219]. Автори цих досліджень стверджують, що серед вказаних дрібнозернистих асфальтобетонів найменша глибина колії притаманна типу А, а найбільша типу В. Піщаний асфальтобетон характеризується найбільшою глибиною колії у порівнянні з мілкозернистими асфальтобетонами, при цьому після 25 тисяч проходів колеса глибина колії асфальтобетону типу А в 2 рази менша ніж типу Г. Отримані результати експериментальних випробувань дозволяють констатувати, що глибина колії і показник міцності на стиск при температурі 50 ^{o}C, як критерії зсувостійкості, знаходяться в протиріччі.

В роботі [69] випробувались на колієутворення три типи асфальтобетонів (тип А, тип Б, тип В) на одному бітумі БНД 60/90. Колієутворення визначали за методом приведеним в EN 12697-22 [220] при температурі 60 ^{o}C. Колієстійкість асфальтобетонів оцінювали за трьома показниками: показник глибини колії, показник інтенсивності утворення колії (кут нахилу дотичної), показник глибини колії після 1000 проходів. Аналіз отриманих результатів засвідчує, що за всіма трьома показниками найбільш високу стійкість до колієутворення показав асфальтобетон типу А, потім – тип Б, і асфальтобетон типу В виявився найменш колієстійким. Ці результати по колієстійкості асфальтобетонів різних типів добре співставляються з результатами отриманими в роботах [71 – 74, 219]. Однак, співставлення результатів отриманих за ГОСТ 12801 [221] і випробувань з використанням методів оцінки колієутворення навантаженим колесом показує, що з використанням тільки показників ГОСТ 12801 (коефіцієнт внутрішнього

тертя, зчеплення при зсуві) не можливо оцінити ступінь опору того чи іншого асфальтобетону до утворення колії. Оскільки показники зсувостійкості за коефіцієнтом внутрішнього тертя та зчепленням при зсуві мають не співставний характер. При невеликих навантаженнях найменш зсувостійким буде асфальтобетон типу А, а при великих навантаженнях – асфальтобетон типу Б. Такі дані не підтверджені результатами випробувань на коліємтійкість і заперечують реальній практиці.

Оскільки, для дорожніх покриттів на мостах і шляхопроводах окрім гарячого, щільного асфальтобетону використовують литий, дренуючий та щебенево-мастиковий асфальтобетон [13, 14, 25 – 28], тому дуже важливо знати, як ці види асфальтобетону чинять опір утворенню колії. В роботі [222] порівнюються щебенево-мастиковий, щільний і литий асфальтобетони. Найбільшу коліємтійкість проявив щебенево-мастиковий асфальтобетон у порівнянні з щільним і, тим паче, з литим асфальтобетоном. Мабуть тому, для підвищення коліємтійкості у литий асфальтобетон «втоплюють» щебінь [25]. При цьому прагнуть застосовувати матеріали світлих порід, що дозволяє зменшити температуру нагрівання асфальтобетону сонячною радіацією в жаркі періоди і сприяє підвищенню його коліємтійкості.

Як показали результати досліджень, проведені в ХНАДУ [72, 73], на коліємтійкість асфальтобетону дуже впливає кількість в'яжучого (бітуму). При зменшенні кількості бітуму від 6,4 % до 4,6 % глибина колії асфальтобетону після 30000 проходів колеса зменшується від 14 мм до 6 мм. Тобто, при встановленні залежності глибини колії від вмісту бітуму в асфальтобетоні не спостерігається максимуму (екстремуму), на відміну від результатів при випробуванні асфальтобетону на міцність та при визначенні реологічних характеристик [45, 57, 98, 165, 218, 223 – 225]. Це можна пояснити тим, що при цих випробуваннях асфальтобетон перебуває в різних напружено-деформованих станах. В той же час, необхідно враховувати залишкову пористість і водонасичення асфальтобетону, як це регламентовано в ДСТУ Б В.2.7-119 [142]. До того ж, як показано в роботі [226] збільшення залишкової пористості від 3,5 % до 7 % збільшує глибину колії

водонасиченого зразка після 2000 проходів при температурі 40 ^{o}C на приладі АРА з 7 мм до 9 мм, а після 8000 проходів з 11,5 мм до 14 мм. В цій же роботі [226] порівнюються результати випробувань на колієутворення асфальтобетону (5 % SBS) при температурі 40 ^{o}C і 50 ^{o}C в сухому і водонасиченому стані. Якщо після 8000 проходів при температурі 40 ^{o}C глибина колії водонасиченого зразка була більше в 4,25 рази, у порівнянні з сухим, то при температурі 50 ^{o}C це перевищення становило 3,83 рази.

В роботі [68] показана можливість регулювання колієутворення в асфальтобетонному покритті за допомогою зміни марки бітуму, який використовується при приготуванні цієї асфальтобетонної суміші. При зміні товарної марки бітуму в сторону зменшення його глибини проникнення голки спостерігається значне зменшення глибини колії асфальтобетону. Якщо для асфальтобетону типу Б з використанням бітуму марки БНД 130/200 при температурі 50 ^{o}C глибина колії після 30000 проходів колеса становить 13,7 мм, то при використанні бітуму БНД 40/60 – 3 мм.

В роботі [227] також показана можливість впливу зміни марки бітуму на глибину утворення колії. Перехід від марки В 70/100 ($П_{25}=85\cdot10^{-1}$ мм; $T_р=45{,}4$ ^{o}C) до В 50/70 ($П_{25}=68\cdot10^{-1}$ мм; $T_р=48{,}4$ ^{o}C), а потім до В 30/45 ($П_{25}=45\cdot10^{-1}$ мм; $T_р=53{,}8$ ^{o}C), зменшує глибину колії після 20000 разів прокату резинового колеса з навантаженням 500 Н від 10 мм до 6 мм і 4 мм, відповідно. При цьому, швидкість колієутворення, яка визначалась за наклоном кривої в проміжку між 5000-ним і 15000-ним циклами, для асфальтобетону на бітумі марки В 70/100 дорівнює 0,99 мм/год, для В 50/70 – 0,3 мм/год, для В 30/45 – 0,29 мм/год.

Не зважаючи на суттєву зміну глибини колії асфальтобетону в залежності від використання товарної марки бітуму [219, 226, 227], в ГОСТ 9128-94, який регламентує вид та тип асфальтобетону для виконання ямкового ремонту та ремонту конструкцій деформаційних швів міських мостів, не конкретизується і не вказується марка бітуму, яка б враховувала регіональність України за кліматичними умовами застосування асфальтобетону.

В роботі Sybilski D. [228] показана можливість впливати на колієутворення в асфальтобетоні за допомогою використання трьох різних бітумів: перший – «PKN Orlen» ($П_{25}$=48×0,1 мм; $T_р$=56 ^oC; $T_{кр}$= - 17 ^oC), другий – «Rafinerii Gdansk» ($П_{25}$=46×0,1 мм; $T_р$=56 ^oC; $T_{кр}$= - 21 ^oC), третій – «firmy Nynas» ($П_{25}$=47×0,1 мм; $T_р$=55 ^oC; $T_{кр}$= - 17 ^oC). Не зважаючи на близькі показники за пенетрацією і температурою роз'якшення бітумів, глибина колії в асфальтобетонах на основі цих бітумів – різна. Так після 30000 проходів колеса за методом LCPC при температурі 60 ^oC для асфальтобетону з максимальним розміром зерна 16 мм глибина колії становила: для бітуму «PKN Orlen» – 7,5 % (від початкової товщини плити); «Rafinerii Gdansk» – 9,2 %; «firmy Nynas» – 5 %. Така сильна різниця за колієутворенням, розглянутих асфальтобетонів, може пояснюватись тим, що використані бітуми відносяться до різних структурних типів бітумів, які виділені Колбановською А.С. та Михайловим В.В. [61]. Золотарьов В.О. [58] рекомендує диференційовано підходити до призначення областей застосування таких бітумів: асфальтобетони на основі бітумів І типу повинні використовуватись в районах з холодним кліматом, а асфальтобетони на основі бітумів ІІ типу – в районах з жарким кліматом. В роботі Sybilski D. [228] не вказується кількість щебеню в асфальтобетоні, тому тип асфальтобетону залишається не визначеним, що не дає можливості порівняти ці дані з колієстійкістю з даними інших авторів.

Пошуки способів підвищення експлуатаційної надійності верхніх шарів покриття автодорожніх мостів, шляхом підвищення опору колієутворенню асфальтобетонних шарів є головним фактором, виконаних в останні тридцять років дослідницьких робіт [29, 74, 81, 219, 229 – 256], які направлені на покращення властивостей бітумних в'яжучих.

Ефективним способом з попередження утворення колії в асфальтобетонах є введення в бітум різних полімерних добавок, таких як [29, 74, 81, 219, 229 – 256]: каучукоподібні-еластомери (натуральні та синтетичні каучуки; де вулканізована резинова крошка); термопластичні (поліетилен, поліпропілен); термореактивні (епоксидні смоли); термоеластопластичні (дивінілстирольний, дивінілметастирольний).

Перше широкомасштабне використання бітумополімерних в'яжучих в дорожньому будівництві України відноситься до 1976 року. В Києві в покриття на ортотропній плиті «Північного» мосту через р. Дніпро у відповідності з розробками СоюзДорНДІ був укладений асфальтобетон на основі бітумополімерного в'яжучого, яке отримано введенням в бітум термоеластопласту ДСТ з маточного розчину [29].

В роботі [229] були проведені порівняльні дослідження на колійність зразків мілкозернистого асфальтобетону типу А, який був приготований на полімерно-бітумному в'яжучому марки ПБВ 60 і на бітумі БНД 60/90. Температура випробувань складала 60 ^{o}C. В результаті випробувань встановлено, що при рівних умовах використання полімерно-бітумного в'яжучого в асфальтобетоні дозволяє знизити утворення глибини колії приблизно на 28 % у порівнянні з асфальтобетоном на традиційному бітумі. Не з'ясованим залишається склад полімерно-бітумного в'яжучого, зокрема: марка початкового бітуму, кількість полімеру та його вид. В [230] дослідження показали, що кількість проходів пневматичного колеса з визначеним навантаженням для досягнення визначеної глибини колії в асфальтобетоні (асфальтополімербетоні) при переході від бітуму з температурою розм'якшення 36 ^{o}C до бітумополімерного в'яжучого на його основі збільшується. В [231] навпаки показано, що зростання температури розм'якшення не завжди супроводжується підвищенням колієстійкості і зсувостійкості асфальтобетону.

В статті [232] приведені дані випробувань незалежної лабораторії університету м. Вуппераль (за 2007 р.). Ці дані містять порівняльні результати випробувань ЩМА з добавками РТЭП і Viatop 66 на стійкість до колієутворення. Аналіз отриманих результатів показав перевагу сумішей, модифікованих РТЭП більш ніж на 30 % за показником глибини колії. Зокрема після 20000 проходів колеса по одному сліду глибина колії ЩМА з добавкою 0,3 % РТЭП становила 4,3 мм, а з додаванням Viatop 66 – 5,7 мм. Не з'ясованим залишається гранулометричний склад ЩМА, марка вихідного бітуму (до модифікації) і температура випробування. В роботі [233] оцінку властивостей асфальтобетону на

колієстійкість проводили на бітумах без модифікаторів і модифікованих термоеластопластом SBS. Для проведення експерименту були підібрані бітуми з пенетрацією рівною або близькою до пенетрації бітумополімерного в'яжучого, але при цьому температура розм'якшення бітумополімерного в'яжучого була значно більшою (на 9-16 ^{o}C). При переході від бітуму до бітумополімерного в'яжучого для досягнення фіксованої глибини колії (яка дорівнює 0,1 від товщини асфальтобетонного шару) кількість проходів колеса збільшилось від 5 до 9 раз, причому менше значення збільшення відповідає більшому значенню пенетрації.

Vonk W. з співавторами [234] зростання колієстійкості при введенні в бітум термоеластопласту СБС визначали в умовах найбільш наближених до реальних. Для цього асфальтобетонну суміш укладали в конструкцію дорожнього одягу лабораторного випробувального стенду з шириною полоси 0,7 м і діаметром 3,5 м. Колієстійкість асфальтобетонів оцінювали за глибиною колії після 10^2 проходів колеса з навантаженням 2×10^4 Н при температурі 60 ^{o}C. В ході експерименту була отримана наступна глибина колії: асфальтобетон на чистому бітумі – 16 мм, асфальтополімербетон – 3 мм.

В дослідженні [227] при переході від бітуму модифікованого полімером, марки PMB 65 ($П_{25}$=×0,1 мм; $T_р$= ^{o}C) до марки PMB 45 глибина колії асфальтобетону залишається однаковою – 3 мм, а швидкість колієутворення – близькою (для PMB 65 – 0,12 мм/год, а для PMB 45 – 0,14 мм/год). Залишається не зовсім зрозумілим, те як в асфальтополімербетонах на різних марках в'яжучих (з різними їх характеристиками) можна було отримати однакову глибину колії, якщо в асфальтобетонах на чистих бітумах цього не спостерігалось.

Наглядним прикладом поліпшення якості двох бітумів марки 80/100 (з Середнього Сходу та з Венесуели) є результати роботи [235]. В бітуми додавали 5 % термоеластопласту SBS, який містив 30 % стиролу. Не зважаючи на більш високу температуру розм'якшення в'яжучого на основі середньо-східного бітуму (86 ^{o}C), ніж на основі венесуельського бітуму (74,5 ^{o}C), глибина колії (при 50 ^{o}C і 10^5 проходів) виявилась однаковою для обох асфальтополімербетонів – 8 мм. Крім того, пенетрація зазначених в'яжучих була теж різною: з використанням

середньо-східного бітуму – $П_{25}$=72·0,1 мм, а з використанням венесуельського бітуму – $П_{25}$=45·0,1 мм.

Випробування ЩМА, проведені в інституті Шеленберга [74, 219], показали співставимий вплив зернового складу мінеральної частини і добавки полімеру на стійкість до колієутворення. Результати порівняльних випробувань зразків ЩМА проводились на колісному пристрої за EN 12697-22 [220]. Тести на колієутворення показали, що глибина колії в зразках ЩМА знижується в 2,5 рази за рахунок додавання полімеру в бітум або при зміні зернового складу мінеральної частини суміші в сторону більшої жорсткості при зсуві. Це означає, що зниження колієутворення в асфальтобетоні можна досягти за рахунок покращення зернового складу за показником тертя. В той же час такий підхід під дався критичному аналізу в статті [236]. В роботі Planche P. і співавторів [237] було проведено порівняння результатів натурного експерименту з показниками властивостей, які отримані в результаті лабораторних експериментів для чистих і модифікованих бітумів. Полімербітуми, які використовувались для експериментів значно відрізняються від бітуму за критеріями SHRP: температурою розм'якшення на 18-19 ^oC і в меншій мірі за температурою крихкості на 4-5 ^oC. В умовах експлуатації на автомобільній дорозі по полосі повільного і важкого руху асфальтобетони на бітумах, які модифіковані полімерами, мають більшу колієстійкість, що узгоджується з критеріями SHRP.

В цілях попередження колієутворення на поверхні покриттів мостів, під рухом транспорту з наростаючими інтенсивністю та навантаженнями на вісь, в країнах Західної Європи використовують спеціальні бітуми «multigrade» з широким інтервалом пластичності та індексом пенетрації від 0 до 2 [238]. В роботі [238, 239] приводиться порівняльний аналіз асфальтобетонів з однаковою гранулометрією на чистому бітумі 50/70 і того ж бітуму, модифікованого 3 % SBS, 7 % EVA, бітумі підвищеної в'язкості 10/20, бітумі з широким інтервалом пластичності (пенетраця 35/50). Ці випробування проведені при температурі 60 ^oC на суміші, яка містить чистий бітум 50/70 і має такий гранулометричний склад, який заздалегідь призводив до низької колієстійкості. Дійсно, після 3000 циклів

навантаження колія була більше 10 % на коліємірі LCPC. Такий результат засвідчив про низький опір до колієутворення, який недостатньо для умов важкого руху в країнах ЄС. У випадку використання покращених в'яжучих глибина колії може бути нижче 10 % при 10^4 циклах навантаження. Достовірність і інформативність цих результатів за показником колієутворення в умовах максимально співставимих температур була підтверджена результатами, які отримані на польовому кільцевому стенді [240], а також дослідженнями, які виконані за допомогою використання інших приладів, які моделюють рух [257, 258]. Після випробувань на польовому кільцевому стенді асфальтобетони розташувались від більшої до меншої глибини колії в такому порядку: на бітумі марки 50/70; на бітумі модифікованому SBS; з використанням EVA; на бітумі «multigrade»; на «твердому» (низькопенетраційному) бітумі. Порівняння асфальтобетонів на бітумі «multigrade» і модифікованому SBS дає однаковий результат за глибиною колії. При цьому глибина колії в асфальтобетонах на покращених в'яжучих становить менше 7 мм навіть після $2 \cdot 10^5$ проходів колеса. Це повністю узгоджується з нормативними значеннями країн ЄС. Так, в ряді країн ЄС (Франція, Англія, Фінляндія та інш.) в якості граничного стану дорожнього одягу прийнята допустима глибина колії $h_{доп}$ [174, 257-263]. Значення $h_{доп}$ встановлюють, виходячи з умов безпеки і комфортності руху. В Англії і Франції допустима глибина колії за десять років експлуатації асфальтобетонного покриття повинна складати не більше 10 мм і 15 мм, відповідно. У Фінляндіїї асфальтобетон класифікують за класами зсувостійкості, які визначають за глибиною колії: I – ≤ 4 мм, II – ≤ 8 мм, III – ≤ 12 мм, IV – ≤ 16 мм.

В даний час не існує єдиної точки зору по відношенню необхідної кількості полімеру в бітумі [231, 237, 241 – 245], оскільки це пов'язано з складом бітуму і властивостями полімеру, тобто можливістю змінювати властивості в'яжучого, за рахунок створення в ньому структурної сітки [240].

Вміст полімеру відповідним чином відображається на колієстійкості асфальтополімербетонів. В роботі [226] була визначена глибина колії асфальтополімербетону, в залежності від кількості полімеру у бітумі – до 5 %

термоеластопласту SBS фірми «Ashland». Значення глибини колії асфальтополімербетону зменшувалось при зростанні кількості полімеру (1000 проходів колеса): 0 % SBS – 5,31 мм; 3 % SBS – 2,47 мм; 4 % SBS – 1,19 мм; 5 % SBS – 0,88 мм. Після 8000 проходів колеса: 0 % SBS – 8,6 мм; 3 % SBS – 4,95 мм; 4 % SBS – 3,37 мм; 5 % SBS – 2,33 мм. В той же час, використання полімеру SBS фірми «Koch» дає інший результат, ніж той, що спостерігався при використанні полімеру фірми «Ashland» – зменшення глибини колії спостерігається до 4 % SBS, збільшення кількості полімеру до 5 % SBS призводить до не значного збільшення глибини колії.

Якщо порівняти результати робіт [226] і [246], то можна знайти протиріччя. Воно полягає в тому, що в роботі [226] при додаванні 3 % SBS глибина колії асфальтополімербетону зменшується в 1,74 рази, при додаванні 5 % SBS – в 3,69 рази, а в статті [246] ці параметри становлять 3,17 рази і 5,94 рази, відповідно.

Радзишевським П. [247] проведені дослідження асфальтових бетонів на бітумо-резиновому в'яжучому, яке містить в якості модифікатору від 0 % до 21 % резинового порошку. В результаті дослідження визначена максимальна глибина колії асфальтобетонів при температурі 60 ^{o}C за британськими нормами BS 598 PL 110:1996 [248]: 50/70 – 7,92 мм; 50/70 з 17 % резинової крошки – 3,65 мм; 50/70 з 19 % резинової крошки – 3,36 мм; 50/70 з 21 % резинової крошки – 3,21 мм. Такі результати свідчать, що асфальтобетон на бітумо-резиновому в'яжучому забезпечує високу стійкість до накопичення колії при високих температурах. В той же час, щоб досягти такого ж ефекту, вираженого у зменшенні глибини колії, достатньо значно меншої кількості іншого полімеру. Наприклад, 3 % SBS [247].

В роботі [249] представлені результати випробувань на манежі Центральної лабораторії доріг і мостів Франції. Вони показують, що довготривалість життя покриття за рахунок використання сшитого SB еластомеру виросла в 1,8 рази, якщо в якості критерію приймається та кількість проходів пневматичних пар, яка призводить до однієї і тієїж глибини колії. Хоча, саме до якої в роботі [249] не вказано. Перевірку впливу добавки Trinidad Epure Z 0/8 в роботі [250] проводили на щебенево-мастиковому асфальтобетоні. Після 30000 проходів колеса по

одному сліду глибина колії в ЩМА-10 з 1,5 % добавки Trinidad Epure Z 0/8 зменшилась на 70 %, порівняно з асфальтобетоном без добавки, а при 3 % добавки – на 83,3 %.

Для влаштування верхніх шарів зносу, покриттів мостів і ділянок доріг з високою інтенсивністю руху використовують в'яжучі модифіковані епоксидною смолою (30-35 % за масою) [299-302]. Такі покриття відрізняються стійкістю до дії бензину і масел [255], високими показниками міцності на стиск при підвищених температурах (R_{20}=29,5 МПа; R_{50}=22,1 МПа; R_{100}=3,1 МПа), колієстійкістю і стиранням. Наприклад, у Великобританії на мостовому переході дороги Грейт Вест Роуд, в районі Лондона Хаммерсміт, в якості покриття використовувався дренуючий асфальтобетон на в'яжучому «Шелл Епоксі Асфальт». Після 14 років експлуатації цього покриття, не зважаючи на високу щільність руху по одному сліду (більше 30000 машин/добу) з високою відносною долею важких вантажних машин, залишкових деформацій у вигляді колії так і не спостерігалось. Однак, через високу вартість епоксидних смол суміші з їх використанням в дорожньому будівництві практично не застосовуються.

В роботі [246] порівнюється «контрольний» асфальтобетон на бітумі БДУС 70/100 з асфальтополімербетонами на в'яжучих, які містили різні види полімерів і типи модифікаторів. Середнє значення виміряної глибини колії зразків при температурі 60 ^{o}C і після 20000 проходів колеса, які приготовані з мілко зернистої асфальтобетонної суміші типу А марки І на габро-амфіболовому щебені, дорівнює: БДУС 70/100 – 9,5 мм; БДУС 70/100 з Kraton D 1101 – 3 мм; БДУС 70/100 з Sasobit – 6,5 мм; БДУС 70/100 з Licomont BS 100 – 4,3 мм; БДУС 70/100 з «Унирем» - 4 мм; БДУС 70/100 з КМА – 3,4 мм; БДУС 70/100 з Gilsonit – 3,2 мм; БДУС 70/100 з Trinidad Epure Z 0/8 – 5,4 мм; БДУС 70/100 з PR Plast S – 1,5 мм. При цьому залишається не визначеною кількість полімерної чи модифікуючої добавки.

Вплив якості ущільнення асфальтобетонного покриття на його колієстійкість показано в статті [256]. При збільшенні коефіцієнта ущільнення асфальтобетонного покриття збільшується кількість проходів колеса до появи

колії зазначеної глибини. Так наприклад, якщо коефіцієнт ущільнення зменшується на 1,7 % від максимального, то кількість проходів колеса до появи колії глибиною 10 мм зменшується на 6460 проходів, якщо на 4,7 % – на 7790 проходів, якщо на 8 % – на 8740 проходів. Порівнюючи результати робіт [152, 264 – 268] з коліємістійкістю асфальтобетонів з максимальною крупністю зерен 10 мм та 20 мм спостерігається не відповідність. Як наведено в роботах [265 – 268] максимальна глибина колії асфальтобетону з максимальним розміром зерен 10 мм, а в роботі [264] навпаки. Тому наукові дослідження з вивчення коліємістійкості асфальтобетонів з різним розміром максимального щебеню потребують подальших досліджень. В той же час переконливою є робота [87, 152, 265 –267] бо її результати відповідають дослідженням [268] за показниками міцності при стиску, міцності при зсуві та коефіцієнту внутрішнього тертя. Недостатньо приділено уваги дослідженню закономірностей дії впливових факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, а саме: різні види асфальтобетонів та їх гранулометрія; розмір щебеню; товщина покриття; кількість та марка бітумного в'яжучого (пенетраця, температура розм'якшення); кількість полімеру; швидкість руху та навантаження транспортного засобу; коефіцієнт ущільнення асфальтобетону; різна температура, витрати підґрунтовки; кількість стабілізуючої добавки.

1.5 Аналіз досліджень температурного режиму покриття

Стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії та строк служби на автодорожніх мостах залежить суттєво від температури. Як відомо протягом строку служби асфальтобетонне покриття зазнає обопільного впливу температури і режиму деформування (разом із вологістю, абразивною дією транспорту та інших факторів), що спричиняє їх деградацію, зокрема колієутворення. Все це вимагає ретельного врахування діючих чинників колієутворення і побудови загальних математичних моделей деформування асфальтобетонного покриття на автодорожні мостах при температурному впливі. Однак при проектуванні і

розрахунку асфальтобетонного покриття за критерієм коліестійкості, не враховується в належній мірі реологічний стан асфальтобетону. Тому уточнення залежності температури асфальтобетонного покриття від умов експлуатації транспортних засобів є в даний час актуальним завданням.

Процес впливу температури на елементи мостового полотна суттєво впливає на механічні властивості асфальтобетонного покриття і плити проїзної частини [269]. Але, на даний час відсутні універсальні моделі в яких би враховувалися всі моменти температурних ефектів на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів. В той же час, накопичений великий інформаційний масив методичних, експериментальних і теоретичних розробок щодо прогнозування температур для жорстких і нежорстких дорожніх одягів, розподілу температурних полів для мостових конструкцій, кліматичних, сезонних, добових циклів зміни температур поверхні, товщі асфальтобетонного покриття і навколишнього повітря, моделей теплового впливу і поширення теплових хвиль [269 – 297]. Вивчення зміни температур в дорожньому покритті присвячено роботи таких вчених, як: А.М. Алієва, А.Г. Батракова, М.Г. Бабаева, І.П. Гамеляк, Л.І. Горецькій, В.І. Гуляєв, Л.М. Гохман, С.К. Головко, М.М. Дмитрієв, Я.Н. Ковалева, Г.М. Кірюхін, Б.І. Ладигіна, М.В. Матлакова, В.В. Мозговий, Є.А. Мусаеляна, В.І. Страгиса,І.Г. Овчинников, Б.Б. Телтаєв ті інші дослідники [269 – 297]. Аналіз результатів цих досліджень показують, що температура покриття являється функцією температури повітря, при цьому вона істотно залежить від сонячної радіації, ходу температур в покритті мостового полотна і від багатьох інших факторів.

В роботі [278] проведено широкий аналіз розрахункових залежностей для визначення температури в асфальтобетонному покритті. З аналізу роботи з’ясовано, що перевагу слід віддавати теоретичному методу як більш універсальному, так як він дозволяє враховувати регіональні умови і теплотехнічні властивості даного асфальтобетону. Також відзначаючи, що наведені результати можна застосовувати лише до покриттів, розташованим над земляним полотном автомобільних доріг [278]. Стосовно автодорожніх мостів

розподіл температури по товщині асфальтобетонного покриття буде іншим [269], що також можна встановити за допомогою теплотехнічного розрахунку. Все це дає змогу, на основі існуючого досвіду, удосконалити теорію теплового режиму асфальтобетонного покриття (зокрема на покритті автодорожніх мостів), уточнити теорію і методологію кількісного розрахунку температурних полів. Зокрема, у них би враховувалися як експериментальні, так і теоретичні (фізико-математичні) дані щодо визначення зміни температури в асфальтобетонному покритті по глибині на мостах, що спричинена дією температури навколишнього середовища та інтенсивністю транспортних засобів за рахунок контакту коліс автотранспортних засобів з поверхнею покриття.

При розгляді температурного впливу на дорожнє покриття поставлена задача дещо спрощується внаслідок адитивності теплових потоків і температурних полів, що дозволяє розглядати окремо низку часткових моделей [277, 278] в двох наближення: в стаціонарному і при нестаціонарному теплових потоках.

Порівняльний аналіз поведінки дорожнього одягу на земляній основі і на автодорожніх мостах показав у загальному випадку правомірність переносу методів оцінки теплових впливів, але вони перебувають у різних умовах і відповідно працюють по різному [269], це вимагає ряду уточнень і доопрацювань. Насамперед, це стосується більш точного врахування температури навколишнього повітря (особливо внизу прогонової конструкції), а отже більш точного оцінювання їх часових коливань. Не менш важливу роль відіграють теплофізичних характеристик матеріалів одягу, т.я. вони нормують явища теплопереносу і теплоємкості.

Невирішеними питаннями залишається те, що існуючі рекомендації, які побудовані для вирішення цієї задачі ґрунтуються переважно на емпіричних залежностях, в деяких випадках використовуються найпростіші моделі тепло балансу. Запропоновані раніше моделі взаємодії покриття з основою, які не враховують такі фактори, як добові зміни температури навколишнього

середовища, теплообмін між окремими шарами покриття, теплового потоку від тертя пневматичної шини транспортного засобу в колії.

Пропонується для практичних теплофізичних розрахунків конструкція дорожнього одягу апроксимується багатошаровим пружним напівпростором, верхня гранична поверхня якого знаходиться у тепловому контакті з оточуючим середовищем, а нижня поверхня є нескінченою. Визначення температурних полів по глибині конструкції з асфальтобетонним покриттями може бути вирішеним при дослідженні теплових властивостей в окремих шарах конструкції, кількісному визначенні теплових потоків, що поступають на або випромінюються поверхнею покриття. Для визначення щільності теплових потоків враховуються кліматичні та дорожньо-експлуатаційні фактори, при врахуванні особливо високих літніх температур, накладеної теплогенерації за рахунок тертя шини, особливостей розподілу початкової (поверхневої) температури по товщині покриття, розподілу температури на діючій глибині (0-8 см) колієутворення, врахуванням характеристик сонячної інсоляції [287, 298].

З урахуванням вище наведеного аналізу встановлено, що є необхідність в удосконалені методу визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні.

1.6 Висновки по розділу. Мета і задачі досліджень

1. Проведено критичний аналіз результатів існуючих теоретичних, практичних і експериментальних досліджень з прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів, установлено, що переважна їх більшість має залізобетонну плиту проїзної частини з асфальтобетонним покриттям, в останні роки на яких спостерігається інтенсивне зростання дефектів у вигляді колії, у зв’язку з ростом параметрів транспортних навантажень та аномальними високими літніми температурами (понад 50 % пластичних

деформацій із загальної кількості дефектів). Недостатньо вивчено причини та видів з утворення колії на покритті.

2. Існуючі математичні моделі з прогнозування та методи розрахунку утворення колії в покритті не в повній мірі враховують комплексну дію термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону та внутрішніх і зовнішніх факторів. На практиці, відомі методи розрахунку з прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, не в повній мірі враховують такі фактори, як: зміна температури в смузі накату від інтенсивності транспортних засобів; термореологічні властивості асфальтобетону; інтенсивність руху великовагових транспортних засобів.

3. Установлено, що методи з визначення температури асфальтобетонну не в повній мірі враховують спільну дію сонячної радіації та пневматичних коліс в смузі накату покриттям при їх коченні.

4. Установлено з аналізу робіт, присвяченим лабораторним і стендовим експериментальним дослідження свідчать, що вони не повністю враховують вплив конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на утворення колії в покритті.

5. Проведений літературний огляд свідчить про необхідність у вирішенні наукової практичної проблеми стосовно створення наукових основ з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини.

6. Роботи полягає в розробленні наукових основ підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини при дії вертикальних навантажень від пневматичних коліс транспортних засобів за високих літніх температур. Для досягнення поставленої мети в дисертації визначені завдання:

- провести аналіз: умов роботи асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах, існуючих теоретичних та експериментальних методів прогнозування утворення колії;

- розробити математичну модель прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини від дії вертикальних навантажень пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах та розробити метод розрахунку стійкості покриття до утворення колії;

- удосконалити метод визначення температури асфальтобетонного покриття в смузі накату на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, з урахуванням впливу взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні;

- розробити методи та провести експериментальні лабораторні та стендові дослідження впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних і кліматичних, транспортних та експлуатаційних факторів на стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії.

- експериментально встановити: параметри термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону; характеристики утворення колії; температуру асфальтобетонного покриття в смузі накату; міцність зчеплення між асфальтобетоном та залізобетонною основою при зсуві;

- встановити закономірності впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини;

- розробити практичні методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини та оцінити їх техніко-економічну ефективність.

7. Дисертаційна робота побудована на запропонованій автором науковій *ідеї*: утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, головним чином, відбувається від дії вертикального циклічного навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах за рахунок накопичення залишкових пластичних деформацій в конструкції мостового полотна, що опирається на жорстку залізобетонну основу з урахуванням комплексного впливу внутрішніх (структурних, конструктивних

технологічних) та зовнішніх (кліматичних, транспортних, експлуатаційних) факторів.

8. Для досягнення основного наукового результату та встановленої наукової ідеї висунуто *робочу гіпотезу*: закономірності накопичення залишкових вертикальних деформацій від дії зовнішніх факторів для прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів можуть базуватись на застосуванні феноменологічної моделі незалежно від виду прояву внутрішніх факторів. Використовуючи такий підхід математична модель може бути отримана на основі застосування положень теорії пружнопластичності при вирішенні задач утворення колії від дії пневматичного колеса, з урахуванням термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону та на основі експериментально встановлених параметрів цієї моделі в умовах, що відображають особливості роботи покриття при певному виду прояву внутрішніх факторів.

Основні результати досліджень першого розділу висвітлено в роботах автора: [4, 5, 82, 219].

РОЗДІЛ 2
ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ З ПРОГНОЗУВАННЯ УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

В даному розділі приведено основні теоретичні положення та аналітичні залежності для розрахунку та прогнозування глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах [320], які базуються на відомих теоріях та методах [28, 40, 44, 47, 74, 111 – 133, 173, 184, 219, 298 - 427] (Розділ 1).

2.1 Причини, що впливають на утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів

Сформульовано основні причини виникнення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Аналіз зазначених процесів базується на даних літературного огляду (розділ 1) та власних досліджень [4, 219, 341 –344] (розділ 4, 5).

Причини утворення колії на асфальтобетонному покритті розглядаються при дії багатократного прикладання вертикальних навантажень під час проїздів пневматичних коліс транспортних засобів. При цьому розглядається одно - та двохшарове покриття, що розташоване на гідроізоляції прогонової будови залізобетонних автодорожніх мостів. Використовуючи підходи професора І.П. Гамеляка [315] та інших дослідників до аналізу дефектів асфальтобетонного покриття, запропонована схема основних факторів і причин утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів (рис. 2.1). Внутрішні причини утворення колії в асфальтобетонному покритті на мостах проявляється від дії трьох основних факторів: структурних, конструктивних та технологічних. Кожен із факторів має відповідні види причин утворення колії. Структурний фактор обумовлений різним рівнем невідповідності за класом суміші, видом крупності мінеральних зерен; групою по залишковій пористості; вмістом щебеню та видом

гранулометрії; маркою асфальтобетону та за різновидом асфальтобетонної суміші. Рівні невідповідності (додатку А).

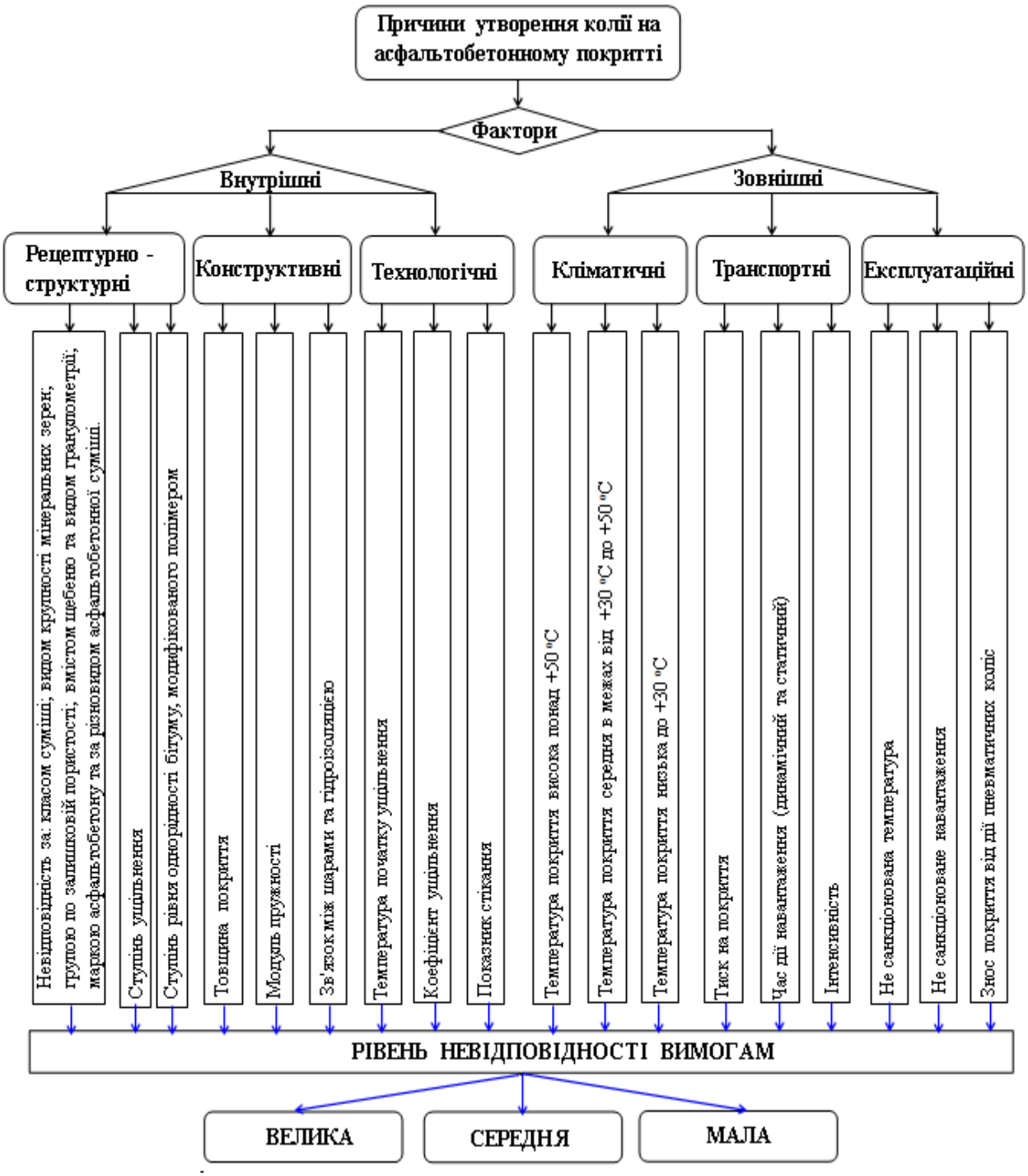


Рисунок 2.1 – Схема причин утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів

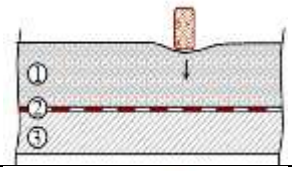
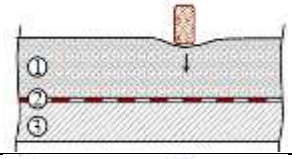
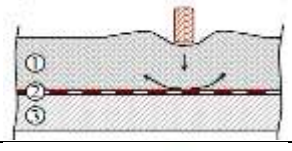
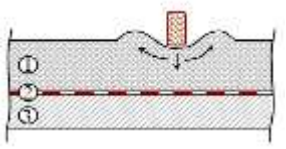
Невідповідність використання марки бітуму в асфальтобетонній суміші в залежності від дорожнього-кліматично районування. Необґрунтована рівень однорідності при модифікації бітуму полімерами в залежності від кількості, виду та класу полімеру і часу його модифікації. Невідповідність вимог до матеріалів дорожнього одягу на автодорожніх мостах в нормативних документах сучасним тенденціям в автомобілебудуванні, що базується на випуску великовагових та великогабаритних транспортних засобах.

Недосконалі методики: з визначення показника стійкості асфальтобетону до накопичення колії; з вибору гідроізоляційного матеріалу для застосування на автодорожніх мостах; з розрахунку строку служби асфальтобетонного покриття при виборі типу та виду асфальтобетону за показником стійкості до накопичення залишкових деформацій. Конструктивні: відсутність об’єктивних значень мінімально-допустимої товщини шару покриття; відсутність концепції з проектування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах; наявність недосконалих методів розрахунку конструкцій дорожнього одягу на мостах з позиції стійкості покриття до утворення колії та між шарового зчеплення при зсуві; застосування застарілих типових конструкцій, які не відповідають сучасним тенденціям дії транспорту. Технологічні: не контрольованість температури в залежності від часу транспортування для різних типів та видів асфальтобетону; відсутність належного контролю якості при виготовленні та ущільненні асфальтобетонної суміші; відсутність врахування показника розшарування щебенево-мастикових асфальтобетонних сумішах за урахуванням часу зберігання та транспортування на термін строку служби покриття. Зовнішні причини утворення колії в асфальтобетонному покритті на мостах проявляється від дії трьох основних факторів: кліматичних, транспортних та експлуатаційних. Кліматичним фактором є вплив підвищеної температури покриття при високих літніх температурах повітря та нагріву від сонячної радіації. Дія транспортних засобів: навантаження на колесо, час дії навантаження (динамічне або статичне); вплив тертя пневматичної шини на підвищення температури асфальтобетонного покриття в полосі накату.

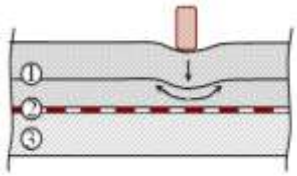
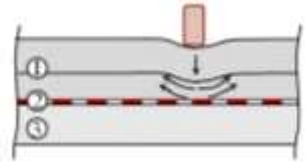
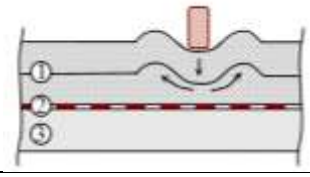
Експлуатаційні: відсутність регулювання руху транспортних засобів по ширенні смуги руху, не контрольованість руху великовагових транспортних засобів в денний час при високій температурі понад 28 ^{o}C. Погані умови руху за рахунок невеликої кількості смуг в одному напрямку, що призводить до відсутності обгонів та випереджень транспортних засобі. Не санкціонована температура та навантаження. Знос покриття від дії пневматичних коліс.

На основі вказаних причин розроблено класифікацію видів колії в одно та двошаровому асфальтобетонному покритті (табл. 2.1, 2.2) та проаналізовано можливі варіанти сполучення комбінованого впливу факторів та причин утворення колії на асфальтобетонному покриті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини.

Таблиця 2.1 – Класифікація видів утворення колії на одношаровому асфальтобетонному покритті

№ поз	Схема колії	Опис виду колії	Вид колії
1	2	3	4
1		Накопичення залишкових деформацій, зносу у верхньому шарі покриття	Колія зносу верхнього шару
2		Накопичення залишкових деформацій, до ущільнення у верхньому шарі покриття	Колія доущільнення
3		Недостатнє зчеплення між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляцією та проковзування по ній	Конструктивна колія
4		Накопичення залишкових деформацій у верхньому шарі покриття з утворенням гребням випору	Колія структурна

Таблиця 2.2 – Класифікація видів утворення колії на двошаровому асфальтобетонному покритті за рахунок причин утворення колії у нижньому шарі

№ поз	Схема колії	Опис виду колії	Вид колії
1	**2**	**3**	**4**
II – асфальтобетонне покриття двошарове			
1		Накопичення залишкових деформацій, доущільнення у верхньому та частково у нижньому шарі покриття	Колія доущільнення
2		Недостатнє зчеплення між нижнім шаром асфальтобетонного покриття і гідроізоляцією та проковзування по ній, а також накопичення пластичних деформацій у верхньому та нижньому шарі покриття	колія конструктивна
3		Накопичення залишкових деформацій у верхньому та нижньому шарі покриття з утворенням гребня випору, при умові міцного зчеплення нижнього шару з гідроізоляцією.	Колія структурна

Для розрахунків передбачається, що влаштовані асфальтобетонні шари на залізобетонних автодорожніх мостах відповідаю вимогам нормативних документів за показником коефіцієнта ущільнення (який становить понад 0,98). Гідроізоляція, що нанесена на прогонову будову відповідає умові міцності зчеплення.

З’ясовані основні причини (табл. 2.1, табл. 2.2), що призводять до утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, це дає можливість розробити розрахункові схеми та моделі, для розрахунку та прогнозування утворення колії, які наведені нижче.

Варіанти комбінацій основних причин з утворення колії на асфальтобетонному покритті представлено в додаток А.

Виходячи з прийнятої в дисертації постановки задачі було розглянуто 52 можливі такі комбінації (додаток А). Це свідчить про залежність утворення колії від значної кількості параметрів впливових факторів (рис. 2.1), що суттєво

ускладнює застосування суто аналітичного методу вирішення проблеми прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті. Тому в роботі пропонується застосувати аналітично-експериментальний підхід з урахуванням відомих наукових положень утворення пластичних деформацій в матеріалах дорожнього одягу. Зокрема, на основі досліджень В.О. Золотарьова, А.М. Кривіського, Н.В. Мурашиної, Д.О. Павлюка, Б.С. Радовського, Б.Б. Телтаєва [111, 124, 127, 316, 338, 358, 393, 400] та інших дослідників можна констатувати, що при накопиченні вертикальних деформацій в асфальтобетонному покритті мостів від разового навантаження відбуваються малі відносні деформації, сумарне накопичення яких за певний період експлуатації призводить до утворення колії. Ці деформації відбуваються: за рахунок переупакування зерен мінеральної частини асфальтобетону без зміни його об'єму і руйнування структурних зв'язків; за рахунок горизонтального деформування під відбитком колеса та деформування, що супроводжується утворенням випорів при пластичних зсувних деформаціях завдяки явищам дилатансії з частковим розрихленням в структурі асфальтобетону. Як свідчать натурні спостереження і дослідження, часткове розрихлення структури асфальтобетону здебільшого відновлюється при високих літніх температурах за рахунок наступних проїздів пневматичних коліс в межах смуги накату. Крім того було взято до уваги, що для асфальтобетону при високих експлуатаційних температурах, як і для інших пружнопластичних і в'язкопружнопластичних матеріалів, існують такі рівні навантажень, при яких не відбувається утворення залишкових деформацій, а також діапазон навантажень, при якому відбувається процес пристосованості структури асфальтобетону до повторних навантажень за рахунок залишкових напружень, що спричинятиме поступовому зменшуванню накопичення залишкових вертикальних деформацій до нульового значення. Дані положення були враховані при розробці математичної моделі.

2.2 Теоретичні передумови розрахунку колії в асфальтобетонному покритті на залізобетонних автодорожніх мостах

Проблемами утворення колії в асфальтобетонному покритті від дії пневматичних коліс транспортних засобів та питаннями деформування матеріалів дорожніх одягів займалися багато вчених [28, 44, 47, 111 – 134, 299- 307, 321].

Математичні моделі колієутворення мають досить складний математичний опис та потребують визначення низки параметрів експериментальним шляхом. Відомі роботи [117 – 120, 125, 321], де автори запропонували спрощені математичні моделі утворення колії в матеріалі дорожнього одягу від дії жорсткого та пневматичного колеса. В даних моделях одночасно не враховується термореологічні властивості матеріалу, різний час дії навантаження пневматичних коліс від транспортного засобу та температури, а також товщина покриття.

З огляду на це існуючі моделі колієутворення для асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах потребують додаткового дослідження. Серед низки різноманітних факторів, які впливають на колієутворення в матеріалі дорожнього одягу, найбільш суттєвішим є поведінка матеріалу під навантаженням. Математичні моделі з описом реологічної поведінки матеріалу під навантаженням різноманітні. Аналізуючи значну кількість відомих закономірностей поведінки матеріалу під навантаженням [45-47, 51, 55, 62, 116, 338, 339] їх можна згрупувати. Існують дві основні групи поведінки матеріалу під навантаженням – з лінійним, або ж нелінійним деформуванням матеріалу, що мають пружні або не пружні властивості. В залежності від величини прикладеного навантаження з урахуванням часу його дії розрізняють матеріали з наступними властивостями: пружними, в’язко-пружними, в’язко-пластичними. Для опису закономірностей поведінки матеріалів з такими властивостями існує множина законів. Але всі вони основані на трьох основних моделях: Гука (пружня поведінка матеріалу), Ньютона (в’язка поведінка матеріалу) та Сен-Венана (характеризує тертя матеріалу). Комбінація цих елементів дозволяє наглядно відображати поведінку матеріалу як пружного, в’язко-пружного або в’язко-

пластичного тіла. Наявність малого набору цих елементів не завжди точно відтворює поведінку матеріалу, наявність великої кількості елементів – більш точно відображає процес деформування матеріалу, але суттєво ускладнює його математичний розрахунок. Крім того, існує думка, що ці моделі не відображають особливостей структури і молекулярної природи в'язко-пружних властивостей матеріалу [62], а в роботах [60, 335] рішуче стверджується про недоцільність спроб описання поведінки матеріалу моделями, що складаються з класичних елементів.

Тому для вирішення практичних задач безпосередньо пов'язаних з взаємодією пневматичних коліс транспортних засобів з асфальтобетонним покриттям необхідно враховувати пружно-в'язко-пластичні особливості поведінки асфальтобетону під навантаженням. Варто зазначити, що поведінка асфальтобетону під навантаженням та утворення в ньому колії від дії транспортних засобів, за процесами які відбуваються в зоні контакту тісно пов'язані з процесами утворення колії в матеріалі з пружно-в'язко-пластичними характеристиками – ґрунті. Аналіз теорії пристосованості [345-349], яка описує реологічну поведінку в'язко-пластичних деформацій в умовах напружено-деформованого стану, що мають циклічну природу, а також теорії Джонсона К. [123] та Ішлінського О.Ю. [125, 126], з урахуванням низки передумов [42-47, 51, 58, 60-62, 70, 111, 114-122, 132, 133, 140, 146, 147, 158, 209, 210, 217, 223, 288] дозволив зробити наступні висновки:

1) шар асфальтобетонного матеріалу під дією навантаження та температури, як і грунт земляного полотна, залежно від вологості і температури, відповідають пружно-в'язко-пластичній поведінці під навантаженням. Особливий пружно-в'язко-пластичний стан відповідає області, коли для переводу асфальтобетону в текучий стан слід подолати межу пластичності. Існування цієї межі пов'язано з наявністю каркасу з високо структурованого асфальтов'яжучого для асфальтобетону, а для ґрунту – зв'язної глинисто-пилуватої фракцій.

2) Як асфальтобетон так і грунт, як основа дорожнього одягу, мають явища релаксації та повзучості. Тому обом матеріалам властиве пластичне

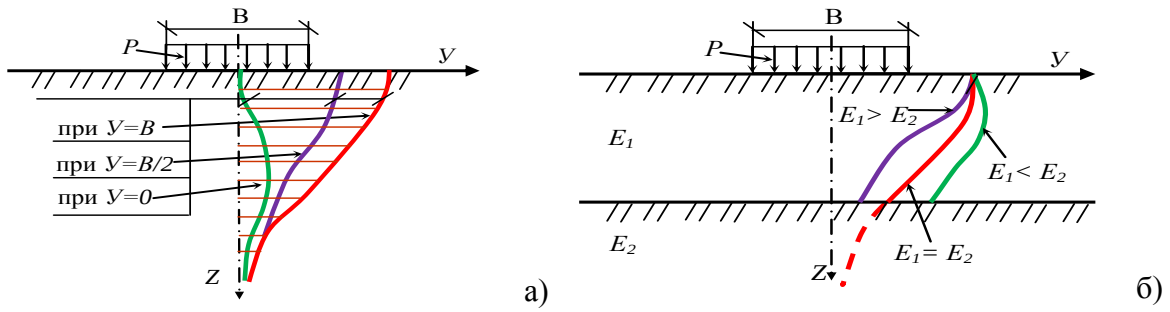
деформування під впливом діючих зусиль. Основною особливістю цього процесу є відсутність розривів суцільності (утворення тріщин). Прикладом таких процесів може слугувати сама колія, яка утворюється під дією руху колеса, як на поверхні ґрунту земляного полотна так і на покритті асфальтобетонного шару. Реологічні процеси, що протікають як в ґрунтах, так і в асфальтобетоні, описуються близькими математичними моделями, з різницею в кількісному вираженні реологічних та розрахункових характеристик.

3) крива накопичення залишкових деформацій для асфальтобетону має всі ті самі характерні ділянки, що і при повзучості ґрунтів, про що може свідчити однаковий математичний опис емпіричними рівняннями наростання сумарної деформації від кількості числа прикладених навантажень або часу дії навантаження обох матеріалів.

4) Розподілення напружень в багатошарових системах основане на методі еквівалентності шару, що було розроблено проф. Покровським Г.І., в тому числі і на основі проведених випробувань різно-шаруватих ґрунтів. Проф. М.М. Іванов застосував цю залежність не тільки для ґрунтів, а й для інших шарів дорожнього одягу, в тому числі і асфальтобетонів. Це відображено в нині діючому нормативному документі [41]. Таким чином, виходячи з концепції цього методу асфальтобетонний шар певної товщини може бути замінений еквівалентним шаром ґрунту.

Важливим фактором при розгляді взаємодії колеса з асфальтобетонним покриттям є вплив присутності квазінедеформованих поверхонь (залізобетонної основи мосту). Аналіз порівнянь зміни напружень в середовищі, при різній відстані до недеформованого об’єкту дає підстави стверджувати, що присутність близько розташованої недеформованої поверхні змінює значення напружень в асфальтобетоні, причому збільшуючи їх на границі контакту. При цьому дія деформацій розповсюджується на глибину активної зони. Ця зона становить 3-3,5 діаметра штампа, що передає навантаження [133]. Наявність жорсткої основи у вигляді залізобетонної плити лише викликатиме вирівнювання напружень по товщині асфальтобетонних шарів. Також важливим фактором є швидкість

розповсюдження напружень та деформацій по глибині (рис. 2.2, а), з урахуванням відомого факту, що асфальтобетон розташовуючись на різних шарах має різну розподільчу здатність. З рис. (2.2, б) видно, що, якщо верхній шар матеріалу має більший модуль деформації E_1, то епюра σ_z під навантаженням буде з глибиною швидше затухати (осадка мінімальна). І навпаки, якщо верхній шар матеріалу має менше значення модуля деформації, то епюра σ_z під навантаженням зі зміною глибини проникнення буде затухати повільніше.



а – по глибині; *б* – з різними властивостями матеріалу в шарах

Рисунок 2.2 – Зміна епюри вертикальних стискаючих напружень

Також порівнюючи модуль пружності асфальтобетону при температурі + 50 °С і вище, який становить від 500 МПа до 100 МПа, а грунт в залежності від вологості має аналогічні значення модуля, що відповідає нормативу [41].

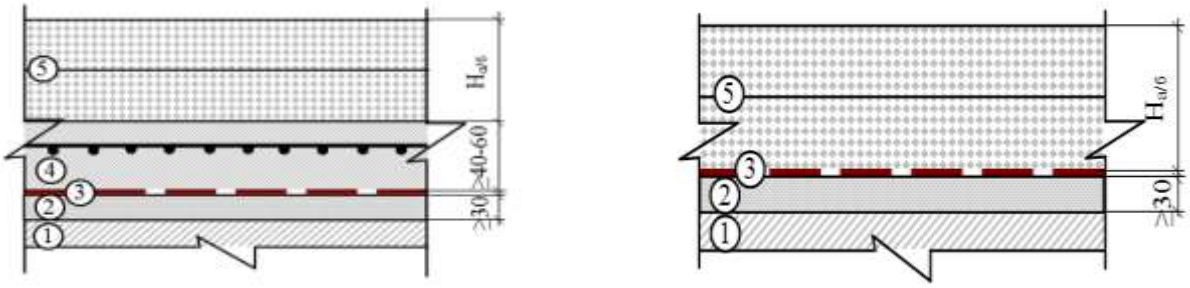
Це дозволяє зробити заключення про те, що відомі теорії Джонсона К. [123] та Ішлінського О.Ю. [125, 126] цілком обґрунтовано можна використовувати, як передумови до розробки математичної моделі утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах.

При виборі розрахункової схеми роботи асфальтобетонного покриття на мостах з точки зору його коліестійкості виходили з найбільш несприятливих для нього умов появи колі – при підвищеній температурі. Приймали до уваги дані багатьох дослідників (розділ 1) [341-352], та власних досліджень (табл. 2.1, табл. 2.2) [353, 354], про причини виникнення колії в асфальтобетонному покритті на мостах [4, 219, 341 – 344]. Для розрахунку асфальтобетонного покриття на мостах приймається два типи конструкцій шарів дорожнього одягу, які широко застосовуються [355 – 357], а саме:

1) покриття, влаштовується по залізобетонній плиті проїзної частини і складається із чотирьох конструктивних шарів (рис. 2.3 а));

2) покриття, влаштовується по залізобетонній плиті проїзної частини, що не має захисного шару, і складається з трьох конструктивних шарів (рис. 2.3 б)).

а) б)



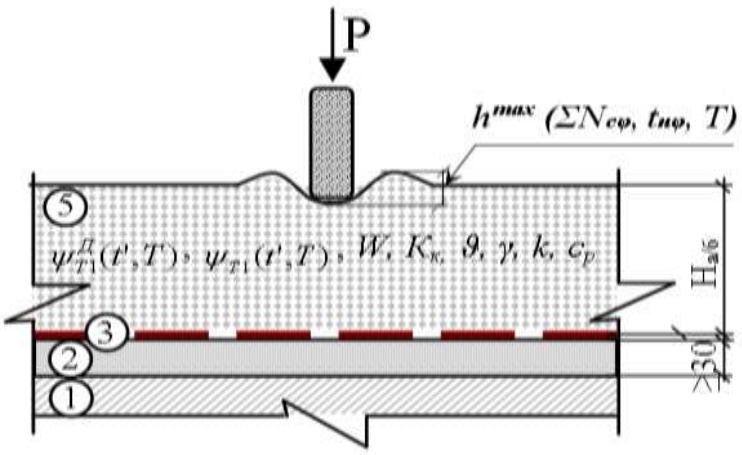
1 – залізобетонна плита проїзної частини; 2 – вирівнюючий бетонний шар; 3 - гідроізоляція; 4 – захисний шар з залізобетону, армованого сталевою сіткою або із дрібнозернистого асфальтобетону; 5 – одно або двошарове асфальтобетонне покриття

Рисунок 2.3 – Конструкції автодорожніх мостів

В той же час, одним із найбільш поширених питань на практиці є таке, коли асфальтобетонне покриття працює сумісно із залізобетонною прогоновою будовою та на його поверхні з'являються колії. Тому, що в зоні контакту покриття та жорсткої основи під дією навантажень виникають значні дотичні напруження, що зумовлені великою різницею жорсткості матеріалів, і це призводить до утворення залишкових деформацій з поступовим утворенням колії та зсувів на поверхні асфальтобетону.

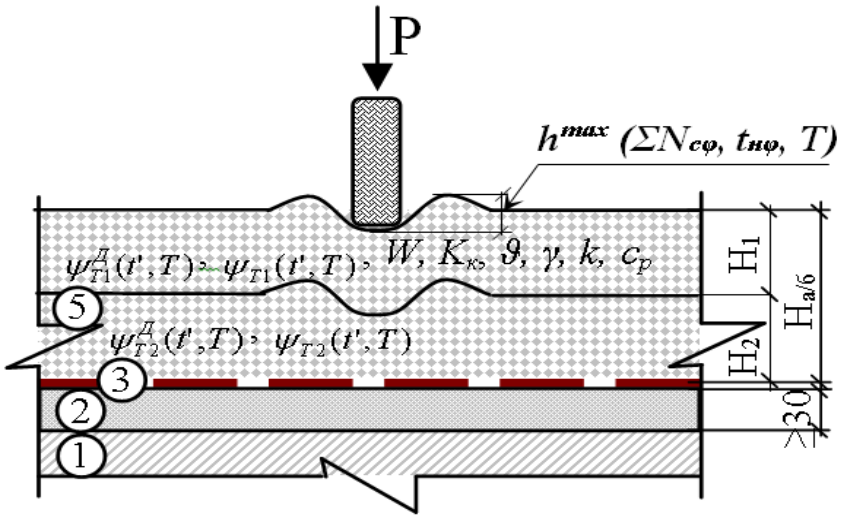
У випадку роботи асфальтобетонного покриття на залізобетонній плиті автодорожнього мосту за схему доцільно прийняти вищенаведену конструкцію (рис. 2.3) з урахуванням фізичних процесів виникнення колії на асфальтобетонному покритті (табл.2.1). Тому приймається, що асфальтобетонне покриття (одно або двошарове) є термов'язкопружнопластичним матеріалом і залежить від термореологічних властивостей асфальтобетону, а саме функції деформації $\psi_T^{Д}(t,T)$, релаксації $\psi_T(t,T)$, яка залежить від часу дії навантаження і змінної температури, а також коефіцієнтів: W – функція, що відображає вплив

комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів (вид функції і параметрів встановлюється експериментально); ϑ, k, γ – параметри, що встановлюються експериментально і відображають вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді N колеса; коефіцієнт бокового деформування $K_к$ та показника пластичності c_p, для різних видів та типів асфальтобетонів. Нижній шар основи (залізобетонна прогонова будова) має не змінний модуль пружності ($E_{ЗБ} = const$). При підвищенні температури асфальтобетонне покриття змінює свою жорсткість, а основа із залізобетону не змінює свої властивості. Тому враховуючи, що на практиці можуть зустрічатись різні випадки зчеплення між асфальтобетонним покриттям і основою з залізобетону, розглядаються найбільш вірогідні варіанти такої роботи з урахуванням різних умов експлуатації покриття на мостах. Перша схема - одношарове асфальтобетонне покриття міцно зчеплене з залізобетонною основою мосту (рис. 2.4). Друга схема двошарове асфальтобетонне покриття міцно зчеплені між собою та залізобетонною основою мосту (рис. 2.5).



h($\Sigma N_{сф}$, $t_{нф}$, T) – максимальна глибина колії в асфальтобетонному покритті, яка залежить від сумарної кількості прикладання розрахункового навантаження ($\Sigma N_{сф}$), часу дії навантаження ($t_{нф}$) та температури (T); $H_{а/б}$ – товщина асфальтобетонного покриття.

Рисунок 2.4 – Схема утворення колії на одношаровому асфальтобетонному покритті, яке міцно зчеплене з основою із залізобетону



H_1, H_2 – товщина верхнього та нижнього асфальтобетонного шару покриття.

Рисунок 2.5 – Схема утворення колії на двошаровому асфальтобетонному покритті, шари яких між собою та із залізобетонною плитою міцно зчеплені

В даній схемах (рис. 2.4, рис. 2.5) навантаження враховує схему режимів дії вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів з урахуванням різних режимів навантаження як короткочасних так і довготривалих.

Важливим елементом розробки теоретичних основ є забезпечення надійної експлуатації асфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах з метою прогнозування втомлюваності покриття з врахуванням процесів їх деградації [315, 353]. Зокрема, це повністю стосується утворення колій в асфальтобетонних покриттях на автодорожніх мостах. Для раціонального прогнозування колії потрібно враховуватись комплексну дію основних факторів: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; температуру асфальтобетону; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантажень. Водночас прогнозування утворення колії повинно ґрунтуватися на аналізі експериментальних даних і спеціально розроблених концептуальних та теоретичних положеннях [82, 117, 119, 120, 125, 320, 321, 353-385].

2.3 Концептуальні положення з прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах

Відповідно до наукової проблеми, розроблено концептуальні положення, з метою підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії, що полягають у наступному:

1. Утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах відбувається від дії циклічного вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах за рахунок накопичення залишкових пластичних деформацій в конструкції мостового полотна, що опирається на жорстку залізобетонну основу з урахуванням комплексного впливу внутрішніх (структурні, конструктивні, технологічні) та зовнішніх (кліматичні, транспортні, експлуатаційні) факторів.

2. Асфальтобетонне покриття повинно бути протягом заданого терміну служби стійким до утворення колії при впливі дії навантаження пневматичних коліс транспортних засобів та високої температури, а також повинно бути забезпечене належне зчеплення з нижнім шаром асфальтобетонного покриття, гідроізоляцією та жорсткою основою автодорожнього мосту.

3. Стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії забезпечується: коефіцієнтом бокового деформування, функції, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів (вид функції і параметрів встановлюється експериментально); параметри, що відображають вплив циклічного навантаження, які отримуються на основі експериментальної перевірки за допомогою розробленої методики (розділ 4) і належним вибором виду матеріалу для асфальтобетонного покриття та встановленням відповідних вимог до нього (розділ 6); натурною, експериментальною перевіркою за допомогою розробленого методу в лабораторії та на кільцевому стенді (розділ 4).

4. Забезпечення належного зчеплення з нижнім шаром асфальтобетонного покриття, гідроізоляцією (зчіпним матеріалом) та цементобетонною основою

здійснюється на основі експериментальної і розрахункової перевірки умови міцності на зсув за допомогою розроблених методів, які наведені у 4 та 6 розділах.

5. Запропоновано схеми та математичну модель для прогнозування колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах базується на основі застосування положень теоріїпружнопластичності при вирішенні задач утворення колії від дії пневматика з урахуванням термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону та на основі експериментального встановлення параметрів цієї моделі в умовах, що відображають особливості роботи покриття.

6. Метод визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні та зменшення загальної товщини покриття, передбачається визначити за допомогою теоретичної та експериментально перевіреної температурної моделі прогрівання покриття на автодорожніх мостах.

7. Прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті залізобетонних автодорожніх мостів базується на феноменологічній моделі, що описує закономірності накопичення залишкових вертикальних деформацій від дії зовнішніх факторів не залежно від виду прояву внутрішніх факторів утворення колії.

8. Пропонується метод розрахунку утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах від дії навантажень транспортних засобів, що дозволяє враховувати комплексну дію основних факторів: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; температуру асфальтобетону; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантажень. Асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах моделюється схемою у вигляді одно та двошарової пластини [121].

Пропонується алгоритм послідовності розрахунку та прогнозування утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах з урахуванням вище зазначених факторів, який складається з різних підсистем (рис.

2.6). Модель комплексно враховує всі підсистеми одночасно, а якщо діє тільки температура то колія на асфальтобетонному покритті не з’являється.

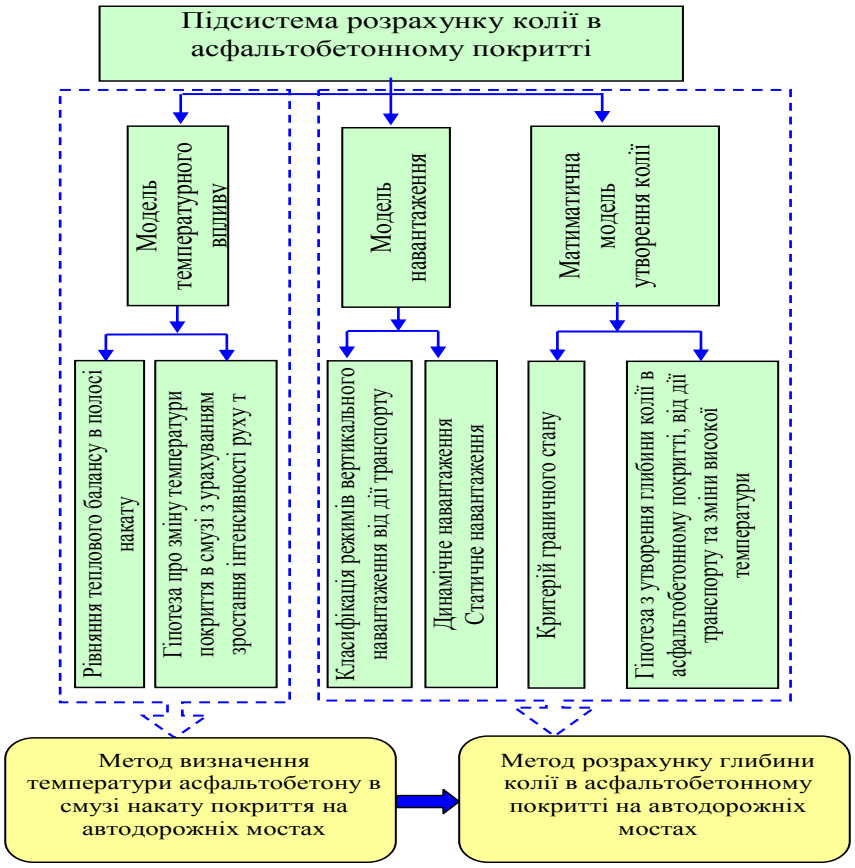


Рисунок 2.6 – Алгоритм розрахунку колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах

2.4 Метод визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні

Фактори розподілу температур в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Температурний баланс в асфальтобетонному покритті залежить від суми теплових потоків, які потрапляють на нього: сонячної радіації, довгохвильового випромінювання атмосфери та самого покриття, конвекційна теплопередача між покриттям та середовищем [298].

Інтенсивність сонячної радіації (прямої та розсіяної) залежить від добового циклу, розташування сонця відносно поверхні, а також кута падіння сонячних променів. Енергетичний баланс на поверхні покриття залежить від сумарного надходження тепла до поверхні покриття при умові, що воно буде відповідати поглинальній здатності асфальтобетону. Напрям конвекційної теплопередачі і теплового випромінювання є функцією різниці температур поверхні покриття та температури середовища. У випадках, коли температура середовища нижча, ніж температура поверхні покриття, охолодження поверхні відбувається незважаючи на надходження сонячної радіації на поверхню. Таким чином, в залежності від величини кожного теплового потоку, відбувається накопичення або втрата тепла покриттям. Для адіабатної поверхні основи можна припустити, що при великій товщині покриття не передбачається теплообмін між покриттям і основою [121]. Крім того, бічні поверхні покриття (поверхня краю) вважаються адіабатичними при достатньо великих горизонтальних поверхнях, так як просторове розширення при зміні температури у вертикальному напрямку, буде набагато більше, ніж горизонтальні зміни на бічній поверхні, і будь-яким теплообміном через бічну поверхню покриття можна знехтувати. На практиці ширина покриття змінюється від 4,0 м (для дороги) до 15 м і більше (для 4–х смугової) [121]. У цьому випадку з достатньою точністю можна розглядати плоску задачу теплового балансу з нескінченною довжиною. Довжина покриття має значення, оскільки вона здійснює безпосередній вплив на конвекційний теплообмін на поверхні [298].

На величину теплових навантажень асфальтобетонного покриття під час експлуатації впливають: розташування та орієнтація автомобільної дороги, які визначаються географічною широтою та азимутом; час року та час доби; атмосферні умови, що виражені даними про зміну температури, швидкості вітру, хмарності, опадами тощо; властивості матеріалів, такі як питома теплоємність, щільність, коефіцієнт поглинання сонячної радіації, коефіцієнт випромінювання, теплопровідність, коефіцієнт передачі теплоти конвекцією; геометричні розміри покриття (ширина, товщина шарів); колір покриття та його зміна в процесі експлуатації [298].

У процесі експлуатації зовнішня поверхня покриття піддається різним зовнішнім тепловим впливам навколишнього середовища [121, 298]. Згідно П.Ф. Швецова основними процесами і явищами в радіаційному балансі поверхневого тіла є: потрапляння на поверхню прямої і розсіяної короткохвильової сонячної радіації, відбивання і поглинання поверхнею сонячних променів і власне довгохвильове випромінювання; конвекційний (турбулентний) теплообмін між поверхнею і приземними шаром повітря, який обумовлюється різницею температур верхнього тонкого шару поверхні і приземного шару повітря, пов'язаного із сонячною радіацією; випромінюванням поверхні Землі; з атмосферною адвекцією, а також циркуляція повітряних мас по тріщинам і пустотам; теплообмін між шарами із різними теплофізичними характеристиками; власне на цей процес мають вплив фазові переходи, але для поверхневих умов, ними зазвичай нехтують; висхідні і горизонтальні теплові потоки внаслідок геотермічних і горизонтальних температурних градієнтів [298].

Розглянемо кількісний бік теплового балансу, при врахуванні найбільш значущих факторів теплообміну. Відомо, що радіаційний баланс рівний різниці між сонячною радіацією, яка поглинається земною поверхнею і ефективним випромінюванням цієї поверхні можна представити у вигляді формули [121, 386, 387]:

$$R = (Q + q) \cdot (1 - \alpha) - I, \tag{2.1}$$

де Q – сума прямої радіації, тобто тієї кількості сонячної радіації, яка доходить до місця спостереження у вигляді паралельних променів;

q – сума розсіяної радіації, тобто тієї кількості сонячної радіації, яка зазнала розсіювання в атмосфері; потрапляє на земну поверхню від всього небесного склепіння;

α – альбедо, тобто відношення сонячної радіації, відбитої від поверхні Землі до радіації, яка потрапляє на її поверхню;

I – ефективне випромінювання (різниця між приходом і витрачанням тепла на земну поверхню, обумовлене власними випромінюванням і противипромінюванням атмосфери).

Провідними факторами теплового балансу поверхні асфальтобетонного покриття є: періодично-змінна температура повітря; сумарна (пряма та розсіяна) сонячна радіація; атмосферне випромінювання і вимушена конвекція повітря.

Для застосування математичної моделі з прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті, запропоновано удосконалити метод визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні. Тепловий баланс поверхні асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах складається із надходження і поглинання сонячної радіації та різних механізмів теплообміну з навколишнім повітрям [298]. Якщо припустити, що нижня поверхня плити проїжджої частини знаходиться в умовах конвекційного теплообміну з повітрям всередині прогонової конструкції та повітрям під плитою проїзної частини мосту, та температура, яка повільно змінюється з часом і не має інших джерел тепла, то тепловий баланс досліджуваної системи $q_{RES}(t)$ буде складатися з адитивних теплових факторів [298]. Запропоновано розглядати уточнене рівняння загального теплового балансу для асфальтобетонного покриття на мостах (рис. 2.7), що складається крім загально відомих складових: теплового потоку сонячної радіації $q_S(t)$; радіаційного теплового потоку $q_R(t)$; конвекційного теплового потоку $q_c(t)$, а також теплового потоку від впливу взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні $q_p(t)$ [298]:

$$q_{RES}(t) = q_S(t) + q_R(t) + q_c(t) + q_p(t) \qquad (2.2)$$

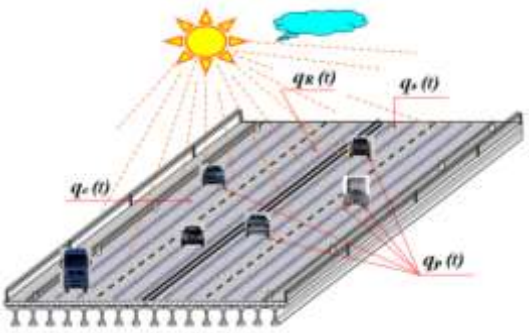


Рисунок 2.7 – Схема теплових потоків, що впливають на температурний режим асфальтобетонного покриття автодорожніх мостів

Тепловий потік сонячної радіації $q_S(t)$. Щільність потоку сумарної сонячної радіації $q_S(t)$, що поглинається горизонтальною поверхнею покриття обраховується [121, 386 – 388] наступним чином:

$$q_S(t) = A_S \cdot Q_{inc}(t), \tag{2.3}$$

Коефіцієнт A_S є змінною величиною і залежить від ступеня деградації поверхневого шару покриття, яка визначається факторами атмосферного впливу: ультрафіолетовою радіацією, вологістю повітря тощо. Величину A_S отримують емпіричним шляхом. Інтенсивність сумарної падаючої на горизонтальну поверхню сонячної радіації $Q_{inc}(t)$ виражається у вигляді суми прямої і розсіяної сонячної радіації. Закон зміни сумарної сонячної радіації $Q_{inc}(t)$ можна апроксимувати залежністю С. Тангітама [121, 386]:

$$Q_{inc}(t) = \begin{cases} 0, 0 \le t \le t_1, \\ Q_{\max} \sin^p \left[\dfrac{\pi(t - t_1)}{t_1} \right], \quad t_1 \le t \le 12, \\ Q_{\max} \sin^q \left[\dfrac{\pi(t - t_2)}{t_2} \right], \quad 12 \le t \le t_3, \\ 0, t_3 \le t \le 24, \end{cases} \tag{2.4}$$

де $Q_{\max t_1}$, t_2 – середньомісячне значення максимальної інтенсивності сумарної сонячної радіації, яка досягається опівдні, час від півночі до сходу Сонця і тривалість світлового дня;

t_3 – час заходу Сонця;

p, q – постійні форми.

Апроксимація експериментальних даних за модифікованою двочленною формулою С. Тангітама [121, 386] досягається за рахунок введення двох постійних форм p та q, що дає можливість адекватно описати несиметричний щодо періоду часу в 12 годин характер зміни функції $Q_{inc}(t)$. У разі $p = q$ отримуємо одночленну формулу С. Тангітама. Інший спосіб оцінювання приросту тепла від сонячної радіації $q_S(t)$ можливий через підрахунок сукупності сонячного випромінювання, що поглинається поверхнею покриття і визначається формулою [386 – 388]:

$$q_S(t) = \alpha_П I, \tag{2.5}$$

Коефіцієнт поглинальної здатності змінюється у залежності від кута падіння сонячних θ променів, обумовленого емпіричної залежністю Дюфіта Бемана [121, 386-388]. Коефіцієнт $\alpha_П$ є змінною величиною і залежить від ступеню деградації поверхні покриття, яка визначається факторами атмосферного впливу та часу, ультрафіолетовою радіацією, вологістю повітря, вмістом кисню та низкою інших параметрів. Величину $\alpha_П$ отримують емпіричним шляхом.

Модель також враховує пряме I_d і розсіяне I_b сонячне випромінювання [121, 386]:

$$I = I_b \cos\Theta + I_d \tag{2.6}$$

Радіаційній тепловий потік $q_R(t)$. Результуючий радіаційний тепловий потік між абсолютно чорним тілом неба і дифузійно-сірою поверхнею покриття представляється у вигляді залежності [121, 386]:

$$q_R(t) = \varepsilon \cdot S_b \cdot (T_{sky}^4 - T_{s,0}^4), \tag{2.7}$$

при чому [121, 386]

$$T_{sky}(t) = \left\{1 - c_1 \exp\left[-c_2 \cdot (273{,}1 - T_{a,0}(t))^2\right]\right\}^{0,25} T_{a,0}(t), \tag{2.8}$$

де $T_{s,0}$ – температура зовнішньої поверхні дорожнього одягу;

T_{sky} – еквівалентна температура неба;

$c_1 = 0{,}261$; $c_2 = 0{,}771 \times 10^{-3}, K^{-2}$;

$T_{a,0}(t)$ – закон зміни добової середньомісячної температури.

Закон зміни добової середньомісячної температури можна представити у вигляді [121, 386]:

$$T_{a,0}(t) = \overline{T}_{a,0} + a\cos(\omega \cdot t - b), \tag{2.9}$$

де $\overline{T}_{a,0}$ – середнє значення температури;

a, b, ω – відповідно амплітуда, фазовий кут і кругова частота.

Вважається, що максимальна денна температура навколишнього повітря протягом доби досягається приблизно о 14 годині, а мінімальна - о 4 годині.

Випромінювання неба $\varepsilon_н$ визначається у залежності від атмосферного тиску, температури і вологості повітря:

$$\varepsilon_H = \frac{P}{101.3}\left(0.60 + 0.06\sqrt{\varepsilon_{ВП}}\right), \tag{2.10}$$

Тиск водяної пари обчислюється [298, 386]:

$$\varepsilon_{ВП} = \frac{R_H}{100} \cdot \left(1.831 \cdot 10^{-9}\right) \cdot T_{абс} \exp\left(0.06 \cdot T_{абс}\right), \tag{2.11}$$

Розрахунок короткохвильового випромінювання, що походить від сонячного випромінювання та дифузійного розсіювання від неба.

Кут зеніту Сонця – $\mu \cos\Theta$, де норма μ розраховується за виразом [298, 386]:

$$\mu = \sin\left(\Theta_{Nlat}\right)\sin\left(\delta_{Nlat}\right) + \cos\left(\Theta_{Nlat}\right)\cos\left(\delta_{Nlat}\right)\cos\left(\pi \frac{t_l - 12}{12}\right), \tag{2.12}$$

Кут нахилу Сонця [298, 386]:

$$\delta_{СОН} = \delta_{\max} \cos\left(360 \frac{J - 173}{365}\right), \text{ град}, \tag{2.13}$$

Залежність між місцевим (сонячним) часом, який визначає полудень в даній місцевості та UTC [386]:

$$t_l = UTC + \frac{\varphi}{15}, \tag{2.14}$$

Сонячна постійна S_0 є функцією висоти сонцестояння, яка змінюється протягом року [386]:

$$S_0\left(J\right) = \bar{S}_0 \cdot \left\{1 + 0.338 \cos\left[\frac{2\pi\left(J - 3\right)}{365}\right]\right\}. \tag{2.15}$$

Конвекційний тепловий потік $q_c(t)$. Нагрівання потоком падаючого випромінювання на поверхню асфальтобетонного покриття автодорожнього

мосту в денні години охолоджується повітрям, який є причиною вимушеного конвекційного теплообміну. Конвекційний теплообмін покриття з навколишнім повітрям залежить від швидкості вітру і висоти автодорожнього мсту. Щільність конвекційного теплового потоку знаходиться за законом Ньютона [121, 386, 387]:

$$q_{c,\text{верх}}(t) = \alpha_{c,0} \cdot [T_{a,0}(t) - T_{s,0}], \tag{2.16}$$

де $q_{c,\text{верх}}(t)$ – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі між навколишнім повітрям і зовнішньою верхньою поверхнею;

$\alpha_{c,0} = 5{,}8 + 4{,}1 \cdot V$, V, V_m – середня швидкість вітру на висоті H_a і висоті флюгера H_m (що фіксується параметром $V = V_m (H_a / H_m)^n$, n - параметр, що характеризує ступінь нерівності місцевості ($n = 0{,}15$ - рівна відкрита місцевість; $n = 0{,}29$ - невелике місто і околиця великого міста; $n = 0{,}45$ - забудови центру міста [298, 388]).

Нижня поверхня плити проїжджої частини знаходиться в умовах конвекційного теплообміну з повітрям всередині коробчастої прогонової будови або повітрям під плитою проїзної частини мосту, і тому щільність теплового потоку, також визначається законом Ньютона [121, 386, 388]:

$$q_{c,\text{ниж}} = \alpha_{c,i} \cdot (T_{a,i} - T_{s,i}), \tag{2.17}$$

де $\alpha_{c,i}$ – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі;

$T_{a,i}$ – температура повітря всередині коробки прогонової будови або повітря під плитою проїзної частини моста;

$T_{s,i}$ – температура внутрішньої поверхні плити проїжджої частини.

Коефіцієнт конвекції $\alpha_{c,i}$ є функцією числа Нуссельта N_u. Існує кілька емпіричних залежностей для визначення коефіцієнту конвекції в залежності від

форми асфальтобетонного покриття (дорожнього одягу). Для асфальтобетонного покриття, найбільш відповідними є залежності, які використовуються для горизонтальної плоскої пластини. У випадку вільної конвекції N_u є функцією від числа Релея R_e. У випадку вихідних теплових потоків вільної конвекції над горизонтальною плоскою поверхнею, число Релея буде становити близько 10^7. Таким чином, маємо дві залежності для визначення числа Нуссельта для вільної конвекції з нагрівом або охолодженням пластини, що запропоновано Інкроперою і Девіттом:

$$Nu = 0.54Ra^{0.25} \quad (10^4<\text{Ra}<10^7, \text{ при ламінарному потоці}) \tag{2.18}$$

$$Nu = 0.15Ra^{0.33} \quad (10^7<\text{Ra}<10^{11}, \text{ при турбулентному потоці}) \tag{2.19}$$

Тоді коефіцієнт конвекції буде розраховуватися [121, 386, 388]:

$$a_{c,i} = \frac{Nu \times k}{L}, \tag{2.20}$$

У випадку примусової теплової конвекції N_u корелює з числом Рейнольдса R_e і Прандтля R_r. Для зовнішньої примусової конвекції на плоскій пластині критичне число Рейнольда становить близько 10^5. Таким чином, маємо дві емпіричні залежності числа Нуссельта при примусовій конвекції над покриттям, що описано Інкроперою і Девіттом [121]:

$$Nu = 0.664\text{Re}^{0.5}\,\text{Pr}^{0.33} \text{ (при ламінарному потоці)}, \tag{2.21}$$

$$Nu = 0.15\text{Re}^{0.8}\,\text{Pr}^{0.33} \text{ (при змішаному та турбулентному потоці)}. \tag{2.22}$$

Результати експериментальних досліджень показують асфальтобетонне покриття в смузі накату прогрівається на 3 ^{o}C - 5 ^{o}C вище від впливу сонячної

радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні[286, 292]. Тому є необхідність врахувати тепловий потік від взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні $q_p(t)$, якій дозволить більш точніше визначити температури асфальтобетону в смузі накату [298].

Потік тепла, що формується при контакті шини з покриттям $q_p(t)$ виникає внаслідок проковзування протектора шини в області контакту [286, 292]. При коченні колеса у зоні контакту температура підвищується, сягаючи максимуму на виході із контакту, де спостерігається максимальне проковзування. Лінія накату, в якій відбувається теплогенерація розподілена у вигляді неперервної одномірної лінійної смуги. При виборі такої моделі можна застосувати різні підходи щодо кількісних методів їх оцінки.

Тепловий потік від шини, що потрапляє на покриття і спричиняє його нагрів [286], можна визначити за допомогою закону Ньютона-Рахмана, згідно якого кількість тепла, що передається одиниці поверхні тіла в одиницю часу, пропорційна різниці температури дотичних поверхонь [286]:

$$q = \alpha \cdot \left(t_ш - t_п\right), \tag{2.23}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі шини (α визначається із серії виразів, що описують зміну коефіцієнту теплопровідності, при контакті протектора шини із асфальтобетонним покриттям);

$t_ш$ – температура поверхні шини, ^{o}C;

$t_п$ – температура поверхня покриття, ^{o}C.

Допущення до моделі теплового потоку від взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні. Модель теплообміну контакту протектора шини з покриттям пропонується, як контакт двох конвергентних поверхонь [286]. Відповідно, у наближенні нескінченно однорідної пластини коефіцієнт пропорційності K між двома поверхнями описується наступним чином:

$$K = \left(\frac{2 \cdot \delta}{\pi} \right)^2 \qquad (2.24)$$

де K – коефіцієнт пропорційності;

δ – товщина пластини.

Оскільки коефіцієнт теплопровідності гуми дуже малий, то в якості товщини пластини при коченні колеса можна розглядати товщину шини, так як сама шина є джерелом тепла. В такому випадку значення параметру δ буде знаходитися у межах 4-12 см в залежності від розміру шин.

Відповідна швидкість охолодження при контактному теплообміну m є функцією коефіцієнту тепловіддачі, площі безпосереднього контакту і величини теплоємкості охолоджуваного тіла [286]:

$$m = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot S_{\phi}}{C} ,. \qquad (2.25)$$

де m – відносна швидкість (темп) охолодження гуми;

ψ – коефіцієнт нерівномірності розподілу температури у межах охолоджуваної частини шини.

Встановлення темпу охолодження гуми, зазвичай нескладне, оскільки має лінійну залежність від температури. Покладаючи величину ψ в 1 дозволяє проводити обчислення з достатньою величиною точності. Певна варіація величини ψ буде спостерігатися від важкопрогнозованих фізико-механічних властивостей гуми у контакті, характеристик текстури покриття протектора, наявністю вологи в порах матеріалу покриття. Але всі ці особливості вносять незначний внесок в формування теплового потоку у зони контакту, і тому в нашому аналізі ними будемо нехтувати. Теплоємкість пропорційна густині і об’єму тіла [286] :

$$C = C_\rho \cdot \rho \cdot V \tag{2.26}$$

де V – об’єм охолоджуваної частини шини.

Тому коефіцієнт тепловіддачі шини прямо пропорційний теплоємкості і обернено пропорційний товщині пластині.

$$\alpha = \frac{a \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi^2}{4 \cdot \delta} \tag{2.27}$$

Таким чином повний тепловий потік, який потрапляє від шини в покришці у межах зони контакту виражатиметься функцією $q_p(t)$ [286]:

$$q_p(t) = \frac{a \cdot \rho \cdot C \cdot \rho \cdot \pi^2}{4 \cdot \delta} S_\phi \cdot (t_ш - t_n) \tag{2.28}$$

де S_ϕ – площа фактичного контакту;

При підрахунку величини теплового потоку, який генерується тертям шини варто враховувати залежність параметру S_ϕ від швидкості руху автомобіля. Із зростанням швидкості відбувається певне незначне, але монотонне, зростання площі контакту колеса з покриттям [286]. Також, очевидним є вплив на кількість з генерованого тепла, яке додатково потрапляє у смугу руху автотранспорту – кількості, якості та темпу проходження транспортних засобів. Врахування теплового потоку (2.28) у рівняння загального теплового балансу (2.2) дозволить точніше визначати температуру в смузі накату асфальтобетонного покриття за рахунок дії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні. Як відомо [286, 298] покриття в смузі накату за рахунок тертя пневматичних шин транспортних засобів та різної інтенсивності, прогрівається на 2,0 ^{0}C – 5 ^{0}C при відповідній максимальній температурі навколишнього середовища, яка становить понад 25.

Тому температура асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах прогрівається від 55 ^{o}C до 65 ^{o}C, а інколи і вище. Тому уточнення методу визначення температури покриття на залізобетонних автодорожніх мостах з урахуванням рівняння (2.2) дозволить точніше прогнозувати утворення колії асфальтобетону. Чинники теплового впливу, які враховуються у запропонованій моделі несуть характеристики стаціонарності [298], які властиві природнім тепловим полям з довгоперіодичними змінами теплових характеристик.

На основі даного рівняння загального теплового балансу (2.2), використовуючи результати досліджень М.В. Немчинова були отримані уточнені аналітичні залежності для визначення температури на поверхні асфальтобетонного покриття за Законом Ньютона - Рихмана:

$$T(z=0,t)=\frac{q_s}{a_s}+\frac{q_R}{a_R}+\frac{q_c}{a_c}+\frac{2q_p}{\lambda}\cdot\sqrt{\frac{a_a\cdot t}{\pi}}\,, \qquad (2.29)$$

де a_s, a_R, a_c – відповідні коефіцієнти тепловіддачі (встановлюються експериментально), *Вт/м²*;

a_a – коефіцієнт температуропровідності верхнього шару асфальтобетонного покриття, м^2/с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, *Вт/м град*;

z – відповідна глибина шару, м;

t – час, *година/доба*.

Числовий обрахунок температури в асфальтобетонному покритті в довільно заданій глибині з урахуванням сезонного фактору складається із декількох обчислювальних блоків: введення вхідних даних, щодо кліматичних та температурно-часових характеристик для конкретного пункту вимірювання з використанням довідкових даних; введення вхідних даних, щодо конструктивно-технологічних характеристик з урахуванням теплофізичних конструкційних

особливостей; отримання розподілу температури в асфальтобетонному покритті у довільно заданій глибині.

Подібного роду залежність, для визначення розрахункової температури між асфальтобетонним покриттям і прогоновою будовою мосту, запропоновано у методиці [379]. Для вирішення цієї задачі використане рівняння теплопровідності (диференціальне рівняння параболічного типу в часткових похідних), яке описує динаміку температури *T*.

$$\frac{\partial}{\partial t}T = a\frac{\partial^2}{\partial z^2}T \qquad (2.29\ а)$$

де *a* – коефіцієнт температуропровідності.

Як і для більшості нелінійних рівнянь в часткових похідних рішення можливе тільки чисельне. Тому, щоб рівняння мало єдине рішення, необхідно поставити потрібну кількість початкових і граничних умов, і в обчислювальній процедурі здійснити перевірку стійкості застосованої різницевої схеми.

Точне рішення в моделі розповсюдження тепла в однорідній пластині в кінцевих різницях по його товщині на основі відомих рішень Фур'є теорії теплопровідності:

$$T(z,t) = T_c + \frac{4(T_0 + T_c)}{\pi^3}\sum_n \frac{1}{(2n+1)^3} e^{\frac{-(2n+1)^2\pi^2 a\cdot t}{H_{а/б}{}^2}} \sin\left[\frac{(2n+1)\pi\cdot z}{H_{а/б}}\right], \qquad (2.30)$$

де *a* – коефіцієнт температуропровідності, м^2/с;

T_0 – початкова температура поверхні, ^{o}C;

T_c – кінцева температура поверхні, ^{o}C.

2.5 Модель навантаження від дії пневматичних коліс транспортних засобів

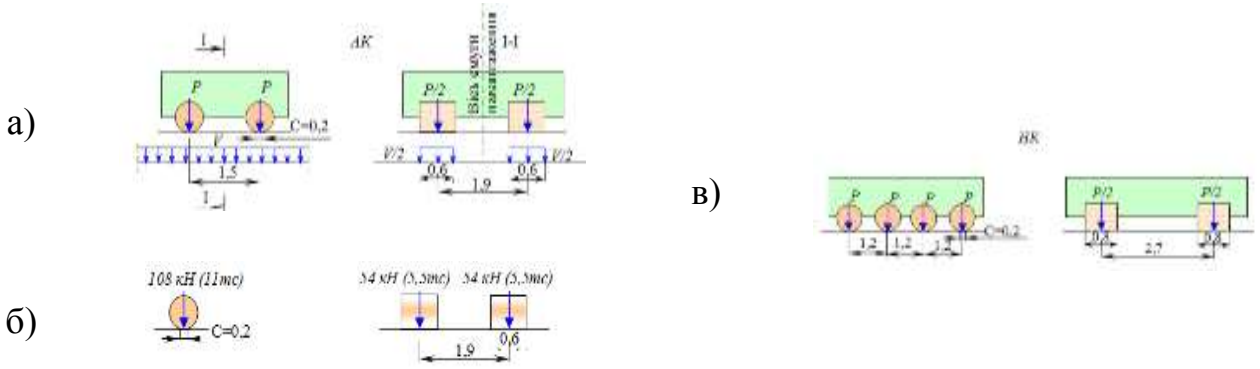
Збільшення розрахункового навантаження від 100 до 115 (130) кН/вісь, ріст загально-вантажопід'ємності і інтенсивності руху транспортних засобів 1,1 для задніх осей причепів) інтенсивність дії навантаження по виступам протектора зросла з 0,4-0,6 МПа до 0,7-1,0 МПа [309-312, 377]. Відомо, що найбільш небезпечним в плані появи колії на асфальтобетонному покритті є ділянки дороги, де відбувається миттєва зміна режиму руху автомобілів. В процесі експлуатації асфальтобетонне покриття на мостах піддається суттєвій дії транспортних потоків, які складаються з різних автомобілів, що відрізняються вантажопідйомністю, габаритами, числом осей та їх розміщенням, навантаженням на вісь і тиском в шинах. На проїзній частині мостів завжди спостерігається більш висока концентрація дії навантаження важкого руху, заборонено обгін, що часто призводить до руху транспорту по одній колії накату на покритті. У зв'язку з цим спостерігається висока щільність руху автомобілів, але склад транспортних потоків відрізняється в залежності від категорії та виду автомобільної дороги і змінюється на протязі часу.

Автодорожні мости проектують і будують відповідно до діючих нормативних документів [37, 356, 362, 363] під нормативне тимчасове вертикальне навантаження від транспортного засобу на всіх автомобільних дорогах загального користування, вулицях і дорогах у міських і сільських населених пунктах, слід приймати за двома альтернативними схемами: рівномірно розподілене смугове навантаження від автотранспортних засобів *АК*, де *К* - клас навантаження; колісне чотиривісне зосереджене навантаження НК - 100 чи НК - 80, в залежності від категорії дороги.

Клас навантаження *К* в залежності від технічної класифікації автомобільних доріг згідно з [364] і вулиць у міських і сільських населених пунктах згідно з [365] слід приймати: 15 – на автомобільних дорогах I, II і III категорій, на міських автомагістралях і магістральних вулицях загальноміського значення, а також на

мостах довжиною понад 200 м незалежно від їхнього розташування; 11 – на всіх інших автомобільних дорогах та вулицях населених пунктів.

Асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах сприймає всі види навантаження від руху транспортних засобів. Крім цього, покриття піддається постійному впливу пневматичних коліс транспортного засобу, що призводить до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії в полосі накату, а також стиранню за рахунок шипованих шин [87, 359, 365]. До впливів, що діють на покриття, відноситься навантаження [5, 34, 44, 85, 111, 121, 123, 184, 260, 320, 323, 340, 367 – 371], а саме нормативна вертикальна сила, яка передається на площину-відбитку пневматичного колеса, найбільший вплив характеризується питомим тиском на асфальтобетонне покриття. Нормативне тимчасове вертикальне навантаження від рухомого складу по покриттю необхідно приймати у відповідності з схемами навантаження, що наведено на рис. 2.8.



а – автомобільне навантаження АК у вигляді смуги рівномірно розподіленого навантаження інтенсивністю *V* і одиничного тандема з тиском на вісь *P*; б – одинична вісь для перевірки проїзної частини мостів, що проектуються під навантаження А-8; в – важке одиночне навантаження НК-80, НК-100.

Рисунок 2.8 – Схеми навантажень від рухомого складу для розрахунку асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах

Необхідно враховувати ймовірність розташування коліс вполосі накату. Від розташування відбитків коліс залежить утворення глибини на асфальтобетонному покритті, а також від різного часу дії навантаження транспортних засобі. Приймається, положення центра відбитку колеса розподілено по нормальному закону [44, 128, 260, 377,] $\varphi(y)$ в даній роботі для аналізу ймовірність наїзду на

гребінь випору асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту приймається ξ=0,2, а в полосі накату ξ=0,6 з урахуванням даних Б.С. Радовського [44, 260, 308]. Тому Для прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті на залізобетонних автодорожніх мостах було запропоновано встановлення параметрів розрахункових навантажень. До них віднесено нормативне статичне навантаження на вісь, нормативне статичне навантаження на поверхню покриття від колеса розрахункового автомобіля, розрахунковий тиск від відбитку протектора шини на опорну поверхню, що залежить від тиску повітря в шині p_o ($p = k_n \cdot p_o$) та коефіцієнта пропорційності k_n, що залежить від типу шин, діаметр відбитку колеса рухомого автомобіля (визначається за чинними нормативними документами), інтенсивність руху, час дії навантаження. Розроблені параметри режимів транспортного навантаження (табл. 2.3, рис. 2.9).

Таблиця 2.3 – Параметри режимів вертикального навантаження від дії пневматичних коліс транспортного засобу

Номер виду режиму навантаження, (φ)	Вид режимів навантаження	Час Навантаження ($t_{нφ}$), с	Інтенсивність дії навантаження даного виду режиму ($N_φ$), авт/доб
1	Міські вулиці і дороги		
1.1	безперервний рух	$t_{1.1}$	$N_{бр}=\delta_{1.1}\cdot N$
1.2	повільний рух	$t_{1.2}$	$N_{пр}=\delta_{1.2}\cdot N$
1.3	гальмування	$t_{1.3}$	$N_{г}=\delta_{1.3}\cdot N$
1.4	зупинка під час затору	$t_{1.4}$	$N_{зпз}=\delta_{1.4}\cdot N$
1.5	розгін	$t_{1.5}$	$N_{р}=\delta_{1.5}\cdot N$
2	Автомобільні дороги загального користування		
2.1	безперервний рух	$t_{2.1}$	$N_{бр}=\delta_{2.1}\cdot N$
2.2	повільний рух	$t_{2.2}$	$N_{пр}=\delta_{2.2}\cdot N$
2.3	гальмування	$t_{2.3}$	$N_{г}=\delta_{2.3}\cdot N$
2.4	зупинка під час затору	$t_{2.4}$	$N_{зп}=\delta_{2.4}\cdot N$
2.5	розгін	$t_{2.5}$	$N_{р}=\delta_{2.5}\cdot N$

У таблиці 2.3 позначено δ_i – доля інтенсивності даного виду режиму навантаження, що встановлюється на основі результатів техніко-економічних результатів дослідження або за довідковими даними. Час дії навантаження визначається на основі швидкості руху транспортних засобів. З метою проведення

розрахунків для найбільш типових комбінацій режимів навантаження розроблено схему режиму дії вертикального навантаження на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини..

Середньодобова перспективна кількість проїздів усіх коліс, що розміщені по один бік транспортного засобу у межах однієї смуги проїжджої частини, приведена до розрахункового навантаження є приведеною розрахунковою інтенсивністю N_p (в одиницях на добу) дії навантаження та визначається згідно з [41].

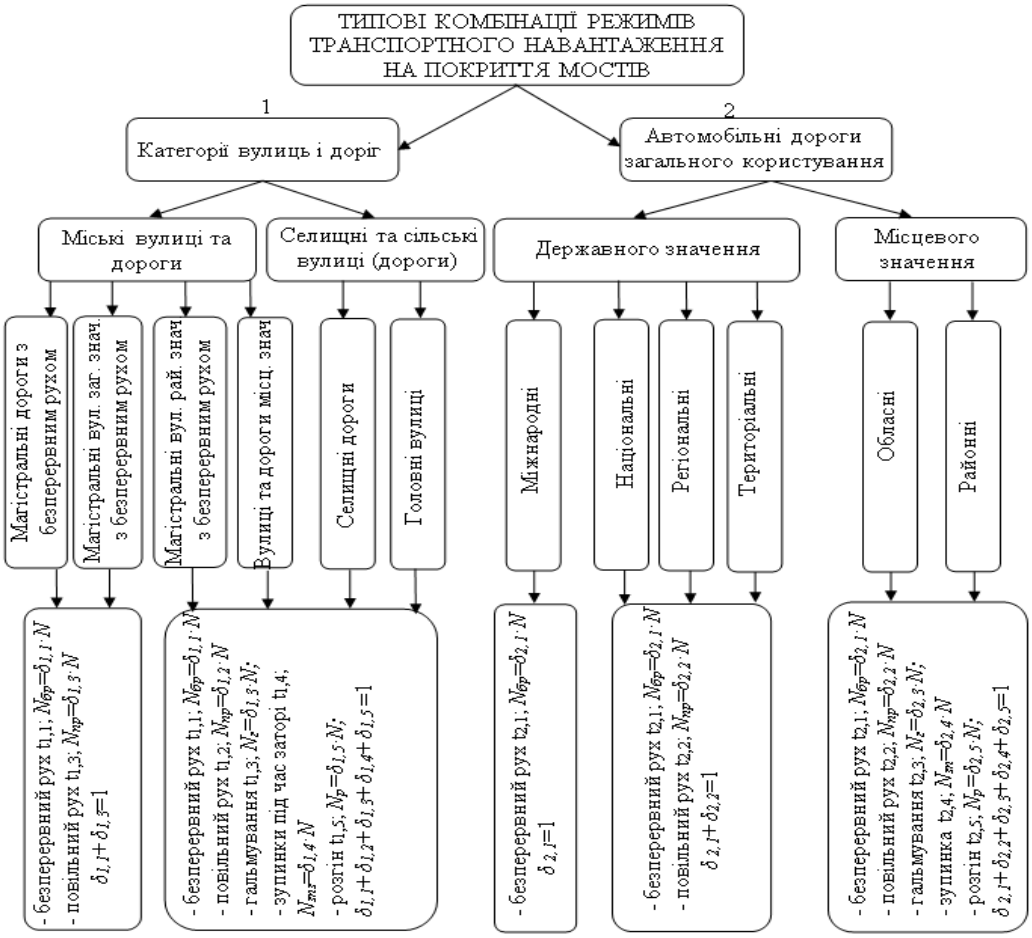


Рисунок 2.9 – Схема режиму дії вертикального транспортного навантаження на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів

В роботі встановлено [41, 368, 372], що повторність навантаження від пневматичних коліс транспортних засобів «слід в слід» у межах ширини відбитку колеса автомобіля (0,4 м) складає 35% від інтенсивності на одну смугу руху

($К_{пов}$=0,35), а на смугу 0,5 м – 47% ($К_{пов}$=0,47). Середнє квадратичне відхилення становить σ=(0,55 – 0,6) м. Відповідно з класифікацією (табл. 2.3) розрахункова інтенсивність руху і-го типу транспортного засобу на добу з урахуванням очікуваної повторності навантаження визначається за залежністю:

$$N_i = K_{пов} \cdot f_{см} \cdot N_g \cdot P_i \qquad (2.31)$$

де $f_{см}$ – коефіцієнт, що враховує кількість смуг руху та розподіл руху транспорту на них відповідно до [41];

$K_{пов}$ – коефіцієнт повторності навантаження, що враховує частину автомобілів транспортного потоку, які проходять по одному місцю ($K_{пов}$ = 0,47);

P_i – доля (частина) і-го типу транспортних засобів у складі транспортного потоку;

N_i – кількість проїздів за добу транспортних засобів і-ої марки, авт./добу;

N_g – середньодобова інтенсивність руху в обох напрямках, авт./добу.

Вхідними даними для руху транспортних засобів є добова інтенсивність руху на дорозі. Для оцінки руху транспортного потоку використовується вираз, [372]. Головні моменти при встановлені напівемпіричного обрахунку добової інтенсивність руху в міських умовах те, що розподіл руху транспортного засобу протягом доби носить бімодальний характер з чітко вираженими екстремальними точками: ранковим і вечірнім максимумом руху, денним і нічним мінімумом (рис. 2.10). Таку бімодальну криву розподілу можна представити у вигляді двох гіперболічних функцій (відповідно для денного і вечірнього руху) у рівнянні зі степеневим наближенням:

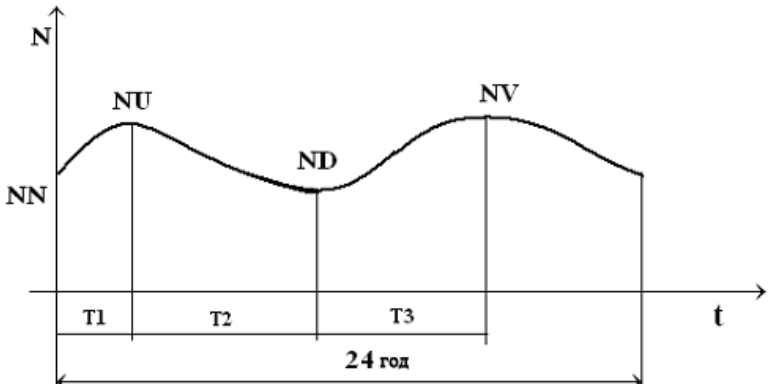
- емпірична функція зміни інтенсивності руху автотранспорту у ранковий час:

$$N_R(T) = N_R \operatorname{sech}\left(\left(\frac{T_2 - T}{T_2}\right) a\tanh\left(\sqrt{1 - \frac{N_D}{N_R}}\right)\right); \qquad (2.32)$$

- емпірична функція зміни інтенсивності руху автотранспорту у вечірній час:

$$N_V(T) = N_V \operatorname{sech}\left(\left(\frac{T_3 - T}{T_3}\right) a \tanh\left(\sqrt{1 - \frac{N_D}{N_V}}\right)\right). \quad (2.33)$$

Для автомобільних доріг державного значення емпіричні функції (2.32, 2.33) не доцільні, а для міських умов доцільно використовувати. Крива опису інтенсивності транспортного засобу, як правило має одно модальний режим.



NU – інтенсивність руху автомобілів в ранковий час пік; NV – інтенсивність руху автомобілів в вечірній час пік; ND – інтенсивність руху автомобілів в денний мінімум, NN – нічний мінімум інтенсивності.

Рисунок 2.10 – Бімодальний режим розподілу інтенсивності руху автомобілів по дорозі протягом доби в умовах міста [372]

Тому середньодобова інтенсивність руху розрахункових (по коліестійкості покриття) автомобілів визначається за залежністю:

$$N_{сер} = \left(\sum_{1}^{n} N_i \cdot K_{\text{пр}}\right) \cdot a_{\text{год}} \quad (2.34)$$

де N_i – середньодобова інтенсивність руху і-го типу транспортного засобу, авт./добу;

$K_{пр}$ – коефіцієнт приведення визначається за методикою [368, 373];

n – кількість повторних навантажень, одиниць;

$a_{\text{год}}$ – коефіцієнт переходу від добової до годинної інтенсивності руху.

Коефіцієнт $a_{\text{год}}$ запропоновано приймати $a_{\text{год}} = 0{,}08 - 0{,}12$, або встановлювати по результатам дослідження руху транспортних засобів [368, 373, 374].

Кількість повторних навантажень n залежить від розрахункового коліє-небезпечного періоду і середньодобової інтенсивності розрахункових транспортних засобів по смузі руху:

$$n = T_{\text{зн}}^{+50} \cdot N_{\text{сер}} \tag{2.35}$$

де $T_{\text{зн}}^{+50}$ – колієнебезпечний період (годин);

$N_{\text{сер}}$ – середнього динна інтенсивність руху розрахункових автомобілів на смугу руху авт./год.

Як відомо [4, 40, 219, 320, 324, 330, 341 – 343, 355, 366 - 369, 373, 374], асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах у теплий період року не постійно знаходиться при розрахунковій нормативній температурі 50^{o}С. В цей період температура покриття коливається від 30^{o}С до 50^{o}С, а інколи (60 – 65) ^{o}С.

Оскільки колієутворення в асфальтобетонному покритті залежить від експлуатаційної температури, для зручності прогнозування колієутворення при різних температурах приводять до розрахункового періоду з розрахунковою температури 50 ^{o}С $T_{\text{зн}}^{+50}$, що запропоновано [368, 369, 373, 374] визначати за формулою:

$$T_{\text{зн}}^{+50} = 3\sum T_{пр}^{ti} \cdot K_{пр} \tag{2.36}$$

де $T_{пр}^{ti}$ – період роботи покриття при конкретній температурі ti, починаючи з 30 ^{o}С і вище, годин.

На підставі розрахунків і аналізу температурних умов роботи асфальтобетонного покриття на мостах у дорожньо-кліматичних районах [41, 375] згідно методики [368, 369, 373, 374] встановлені розрахункові колієнебезпечні періоди роботи асфальтобетонного покриття для районів України (рис. 2.11).

Для визначення кількості повторних навантажень за колієнебезпечний період приводять реальний склад транспортного потоку до розрахункового автомобіля [368, 369, 373, 375] по рівню впливу на утворення колії (рис. 2.12).

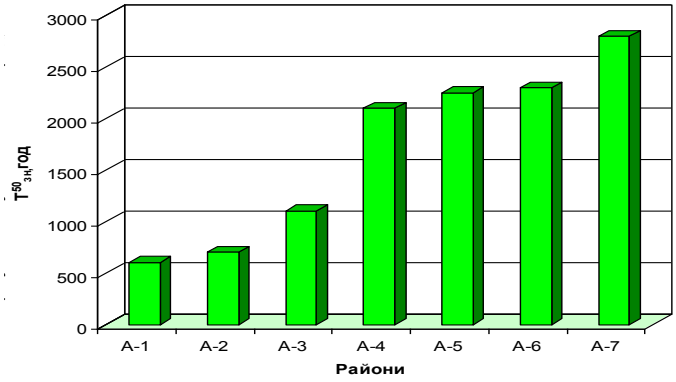


Рисунок 2.11 – Залежність розрахункового колієнебезпечного періоду роботи покриття на мостах взалежності від районування

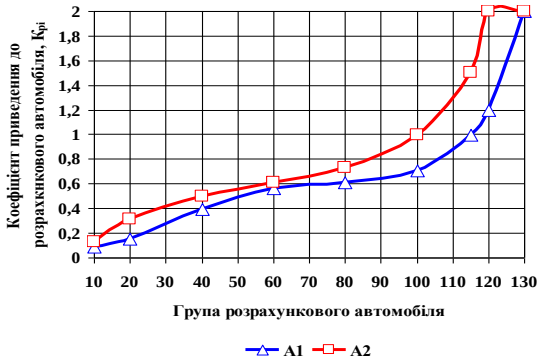


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнта приведення транспортних засобів до розрахункового автомобіля по рівню впливу на колієстійкість

Відповідно до [41] всі транспортні засоби можна розділити на групи по схемам прикладання навантажень на покриття мостів: легкі, середні, важкі, автомобілі з причепами, автомобілі з напівпричепами, автобуси. Навантаження від транспортних засобів можуть бути статичними і динамічними. Статичні навантаження виникають на покритті мостів при зупинці під час заторів $t_{1,4}$ та екстрених зупинок $t_{2,4}$ відповідно до табл. 2.3.

Динамічні навантаження виникають в процесі руху транспортних засобів відповідно до таблиці 2.3, короткочасні і подібні ударним або імпульсним навантаженням. Ударні навантаження виникають при миттєвій зміні рівності покриття на мостах у зоні зсувів і напливів, колійності, деформаційних швів.

Практичні методи розрахунку асфальтобетонних покриттів враховують це явище за допомогою коефіцієнта динамічності $K_{дин}$, який залежить від рівності проїзної частини і швидкості руху автомобілів [41, 44, 260].

Розрахункове навантаження $P_{\text{розр}}$, що передається колесом на поверхню покриття використовуємо згідно з [41]:

$$P_{\text{розр}} = Q_{дн} = K_{дин} \cdot Q_н \tag{2.37}$$

де $Q_{дн}$ – номінальне динамічне навантаження визначається за паспортними даними на транспортні засоби, з урахуванням розподілення статичних навантажень на кожну вісь [41];

$K_{дин}$ – динамічний коефіцієнт, приймається рівним 1,3;

$Q_н$ – номінальне статичне навантаження на колесо даної осі.

При визначенні номінального динамічного навантаження для багатовісних транспортних засобів необхідно визначати величину навантаження, з урахуванням впливу коліс сусідніх осей, розташованих на відстані, меншій за 2,5 м один від одного [41, 44, 260]:

$$P_{\text{розр}} = Q_{дн} = K_{дин} \cdot Q_{нj} \cdot (g_{n-1} + 1 + g_{n+1}) \cdot K_q \tag{2.38}$$

$$K_q = q_{j-1} + 1 + q_{j+1} \tag{2.39}$$

де $Q_{нj}$ – номінальне статичне навантаження на j-і колесо (з одиночними чи спареними шинами) *n*-ї осі;

g_{n-1}, g_{n+1} – коефіцієнти, що характеризують відповідно вплив попереду і позаду коліс, що рухаються, на напружено-деформований стан покриття під даним колесом *n*-ї осі і визначається за [41] у залежності від відношення відстані *L* між осями до діаметра $D_д$ сліду даного колеса;

q_{j-1}, q_{j+1} – коефіцієнти, що характеризують додатковий вплив інших коліс *n*-ї осі і визначаються за [41]. При $1 < l / D_д < 2$ приймають $q(l) = 1$.

Результатом навантаження від пневматичних шин коліс транспортних засобів розподіляється по площі контакту у виді еліпсу. В центрі еліпса питома вага (контактний тиск), максимальна, а по периметру рівна нулю. Площа контакту залежить від навантаження на колесо, що підтверджено багатьма дослідниками [34, 41, 44, 58, 74, 85, 87, 111, 116, 119 – 121, 123, 125, 128, 133, 184, 260, 286, 292, 315, 323, 326, 358, 365 – 369, 376 – 378]. При проектуванні дорожніх одягів в якості розрахункових приймають навантаження, відповідно граничним навантаженням на вісь розрахункового двовісного автомобіля. Подібний підхід обґрунтовано в роботах [34, 41, 44, 58, 74, 85, 87, 111, 116, 119 – 121, 123, 125, 128, 133, 184, 260, 286, 292, 315, 323, 326, 338, 358, 365 – 369, 376 – 379] та прийнято у нормативних документах для проектування дорожніх одягів згідно з [41, 260, 368, 379]. В Україні основними розрахунковими навантаженнями від автомобілів є навантаження групи А і Б від автомобіля з статичним навантаженням на задню вісь відповідно 130, 115, 100 і 60 кН і питомим тиском, рівним, 0,9, 0,8, 0,7 і 0,5 МПа згідно з [41, 324, 344, 354, 363, 368, 369, 371, 378 – 380].

Як відомо, існує ряд теоретичних рішень підрахунку тиску при коченні коліс по в'язко-пружній основі покриття [34, 44, 74, 111, 116-125, 128, 129, 133, 286, 320, 321 – 323, 336, 340, 350, 352, 367, 376, 377, 380 – 385]. Обчислення розподілу тиску в умовах виникнення в'язко-пружних явищ при коченні пневматика виконується рядом послідовних операцій і має аналітичне вираження показане у [125]. Дослідженням цієї моделі займалися Гупта [381, 382], Барович [383], осєсиметричне рішення було знайдене за допомогою перетворень Хенкеля [123]. Формальний зв'язок обговорювався Гладуелом [384] та Маккорміком [385].

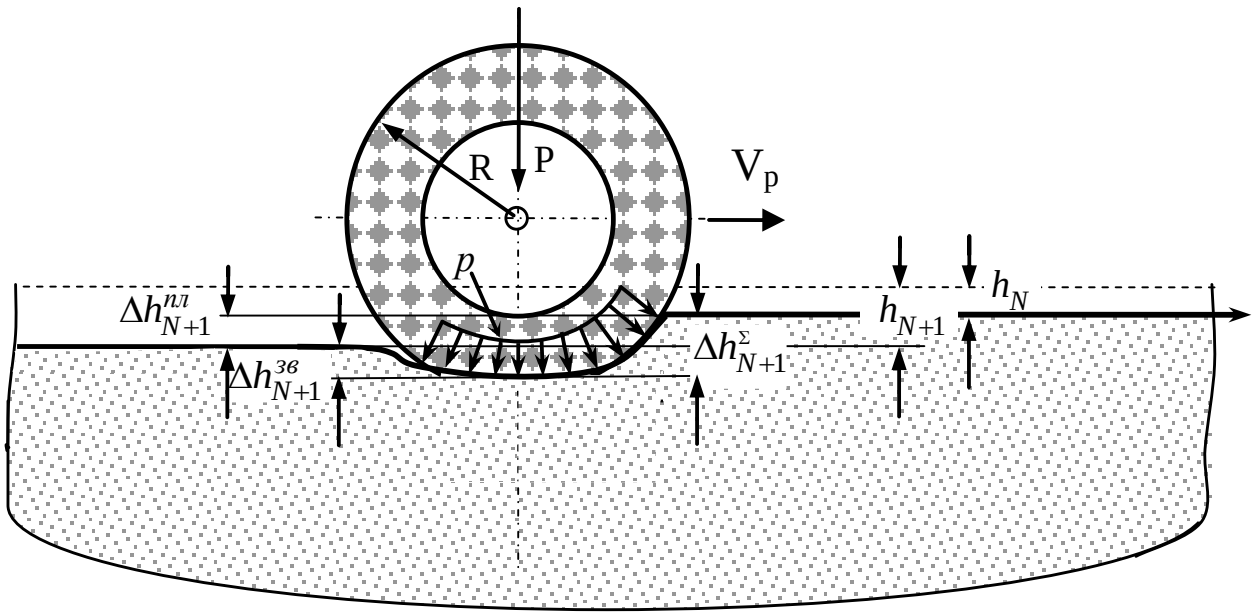
Найбільш розповсюдженим підходом є модель кочення жорсткого циліндру по в'язко-пружній основі, в якій виділяється дві ділянки області контакту: 1) – передня ділянка звернута назустріч руху, в якій проявляються найвищий тиск і

генерується найбільший моменту опору руху; 2) – задня ділянка, в якій простежується згасання тиску поступово до кінця області контакту [123, 320]. В роботах [123, 125, 325] наведено розподіл тиску з урахуванням в'язкопружньої поведінки в передній області контакту пневматика.

Дана модель навантаження враховує схему режимів дії вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів на асфальтобетонне покриття залізобетонних автодорожніх мостів з урахуванням різних режимів навантаження, а також час дії навантажень як короткочасний так і довготривалий.

2.6 Математична модель прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини

У відповідності до робочої гіпотези при розробці математичної моделі для прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини (рис. 2.13) розглядається її формування за рахунок накопичення залишкових деформацій при позитивних літніх температурах в асфальтобетонних шарах покриття на жорсткій основі (рис. 2.4, 2.5). Асфальтобетон, з урахуванням відомих результатів досліджень А.Г. Батракової, А.М. Богуславського, В.А. Веренька, Л.Б. Гезенцвея, В.К. Жданюка, В.О. Золотарьова, В.П. Матуа, А.В. Мішутіна, Б.С. Радовського, А.В. Руденського, та Б.Б. Телтаєва та інших вчених, розглядається як термов'язкопружнопластичне тіло, властивості якого запропоновано описувати такими основними показниками: функція релаксації (в'язкопружна характеристика) асфальтобетону $\psi_T(t,T)$, яка залежать від часу дії навантаження і температури; функція деформації $\psi_T^{Д}(t,T)$ (в'язкопружнопластична характеристика) асфальтобетону, яка залежать від часу дії навантаження і температури; характеристика пластичності асфальтобетону $c_p(t',T)$.



R – радіус пневматичного колеса; *P* – навантаження від колеса на опорну поверхню; *p* – тиск від відбитку протектора шини на опорну поверхню; V_p – швидкість руху колеса; h_N – глибина колії після попереднього *N-го* проходу колеса; h_{N+1} – глибина колії після наступного *N+1* проходу колеса; Δh^{Σ}_{N+1} – приріст повної деформації ($\Delta h^{пр}_{N+1} + \Delta h^{в/п}_{N+1} + \Delta h^{пл}_{N+1}$) після *N+1* проходу колеса; $\Delta h^{пл}_{N+1}$ – приріст пластичної деформації після *N+1* проходу колеса; $\Delta h^{зв}_{N+1}$ – приріст зворотної деформації після *N+1* проходу колеса; $\Delta h^{пр}_{N+1}$ – приріст пружної деформації після *N+1* проходу колеса; $\Delta h^{в/п}_{N+1}$ – приріст в'язкопружної деформації після *N+1* проходу колеса.

Рисунок 2.13 – Схема утворення залишкових вертикальних деформацій від прокочування пневматичного колеса транспортних засобів по асфальтобетонному покритті

Постановка задачі. Асфальтобетонне покриття розглядається як обмежений горизонтальними площинами термов'язкопружнопластичний шар безкінечної протяжності. У відповідності з розглянутою схемою (рис.2.13) висунуті наступні припущення.

Прийняті припущення зводяться до наступного Усі шари асфальтобетонного покриття та залізобетонної основи мають постійну товщину, їх власною вагою можна знехтувати у порівнянні з впливом зовнішнього навантаження; вертикальне переміщення поверхні покриття під час руху пневматичного колеса (рис. 2.13) враховує всі стадії деформування (пружні, в'язкопружні, пластичні); розглядається різний час дії навантаження

пневматичного колеса на поверхню покриття, що відповідає різній швидкості руху транспортного засобу Vp; температура на поверхні асфальтобетонного покриття в межах смуги накату додатково підвищується за рахунок взаємодії пневматичних шин транспортних засобів при їх контакті з поверхнею; тиск від пневматика розглядається як середньо-інтегральний за площею його відбитку і для розрахунків приймається рівним тиску від відбитку протекторів шини *p*.

Також пропонується застосувати коефіцієнт бокового деформування, який дозволяє враховувати умову міцності зчеплення асфальтобетонного покриття з основою мосту і встановлюється експериментально. При чисельних розрахунках пропонується увести коефіцієнт, який враховує жорсткість залізобетонної основи $K_{ж} = 1 - E_{сер}^{АБ} / E^{ЦБ}$ ($E_{сер}^{АБ}$ – середньоарифметичне значення модуля пружності асфальтобетонного покриття, $E^{ЦБ}$ – модуль пружності залізобетонної основи, приймається постійним) коефіцієнт коливається від 0,97 до 0,99 із збільшенням температури асфальтобетону цей коефіцієнт наближається до 1.

Розрахунок утворення колії ведеться тільки в асфальтобетонних шарах покриття з урахуванням того, що жорсткість залізобетонної будови під ним суттєво більша за жорсткість асфальтобетону. В даному випадку розглядається розрахункова схема, коли асфальтобетонні шари розташовані на абсолютно твердій основі. При русі пневматичного колеса транспортного засобу виникає мінімальна y_0 і максимальна y деформація у пневматику, а в асфальтобетонному покритті товщиною H утворюється глибина колії на величину h_N, після (N-го) проходу колеса.

При цьому відстань a залежатиме від найбільш віддалених передніх точок поверхні контакту колеса з покриттям від тієї ж вертикальної площини. Контакт пневматичного колеса з асфальтобетонним покриттям буде зупинятися по заду цієї вертикалі площини на деяку відстань a' від неї, при цьому глибина колії h_{N+1}, після проходу пневматичного колеса транспортного засобу пов’язана з величинами h_N, a і a' співвідношенням (рис. 2.13) [320]. Відстань l від границі, яка розділяє цю межу, до вертикальної площини, що проходить через вісь

пневматичного колеса, може бути визначена за відомим рівнянням [125]. Відповідно до моделей (рис. 2.13) міцність зчеплення забезпечується умовою коефіцієнта бокового деформування $K_к \leq 1$. Характер кривої колії залежить від типу гранулометрії асфальтобетону і визначається за допомогою коефіцієнту пропорційної глибини колії K_{PRD}, який визначається експериментально.

Запропонована математична модель є системною бо вона подібна до натурних досліджень розбіжність її повинна не перевищує 25 %. Об'єктом пізнання в цій моделі є прогнозування утворення колії на автодорожніх мостах і слугує джерелом інформації стосовно впливу внутрішніх і зовнішніх факторів (рис. 2.1). Охоплюється максимальна кількість факторів, які мають впливати на утворення колії, що підтверджує системність моделі (додаток Б).

З урахуванням вищенаведених припущень закони деформування матеріалу [125, 320], можуть бути використані для розробки моделі з прогнозування глибини колії для асфальтобетону. З процесами утворення колії у асфальтобетоні тісно пов'язане з механічними його властивостями, що підтверджується в багатьох роботах [4, 28, 40, 47, 58, 68, 72, 74, 82, 111, 116, 127 – 131, 134, 153, 173, 320, 322 – 324, 351, 358 – 361, 388-427]. Не дивлячись на те, що механіці асфальтобетонів присвячено велику кількість досліджень, ми не маємо до теперішнього часу достатньо простих і задовільних законів, які описують деформацію асфальтобетону при дії навантаження. Так наприклад, закон Герстнера [125] і закон Прандля [125], хоча і є доволі простими, але не описують деформації матеріалу в часі з урахуванням температури [125].

Як відомо, якщо штамп давить з деякою силою на асфальтобетон, то деформація асфальтобетону змінюється на протязі часу [47, 85, 116, 173]. При цьому вдавлювання штампу в асфальтобетонне покриття відбувається більш інтенсивно, чим більший тиск на асфальтобетон. Якщо тиск постійний і не дуже великий, то переміщення асфальтобетону під штампом на протязі часу прагне до деякої границі. Приймається в подальшому, що граничні значення переміщення пропорційні відповідній силі тиску, тобто закон Герстнера справедливий для граничних переміщень, якщо тільки вони не перевищують деякого критичного

значення δ. Приймаємо при цьому, що тиск p і переміщення x зв'язані між собою диференційною залежністю [125, 320]. Вказана диференційна залежність справедлива, поки в процесі зміни p і x швидкість зміни переміщення dx/dt залишається позитивною, а саме переміщення менше деякої характерної для асфальтобетону постійної δ.

Якщо $x < \delta$, але p становиться в процесі зміни менше ніж cx, тоді деформація асфальтобетону припиняється і залежність [125] замінюється умовою постійного переміщення:

$$x = x_1 \ (p < cx, x < \delta), \tag{2.38}$$

де x_1 – переміщення, відповідає моменту переміни знаку різності $p - cx$, тобто моменту звернення dx/dt в нуль (максимальне переміщення), після повторної зміни знаку рівності $p - cx$ (тобто при $p > cx$) знову опиняється справедливою диференційна залежність [125] з початковою залежністю $x = x_1$.

Якщо $x > \delta$, то при достатньо великих деформаціях асфальтобетону, залежність [125] замінюється наступними виразом:

$$p = k + \nu \frac{dx}{dt}, \ k = c\delta, \ \nu = \mu\delta. \tag{2.39}$$

Тут мається на увазі , що $p > k$. Якщо в процесі зміни тиску p стає менше κ, то деформування асфальтобетону зупиняється і таким чином:

$$x = const \ \text{ при } \ p < k, \ x > \delta. \tag{2.40}$$

Пропонується наглядна механічна модель [125, 320], деформування якої слідує вказаним вище закономірностям. В роботі [320] наведено розподілення областей значень p і x, що відповідає закономірностям[125].

Розглянемо в якості прикладу деформацію асфальтобетону під дією постійного навантаження $p = p_0$. Якщо $p_0 < \kappa$, то звертаючись до диференційного співвідношення, що наведено в [125, 320] отримаємо:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p_0 - cx}{\mu x}, \tag{2.41}$$

Звідки, після розділення перемінних і інтегрування маємо [125]:

$$\frac{ct}{\mu} = \frac{p_0}{c} \ln \frac{p_0}{p_0 - cx} - x. \tag{2.42}$$

Постійна інтегрування визначена із умови $x = 0$ при $t = 0$. При $t \to \infty$ не складно отримати із співвідношення (2.42) вираз $p = c \cdot x$. Таким чином, для граничних навантажень виявляється справедливим закон Герстнера [117, 125, 320, 321]. Геометричне співвідношення, що пов'язує осадку x якої-небудь точки покриття на відстані ξ від вертикальної площини, що проходить через вісь колеса має вигляд:

$$p = \beta \cdot y, \tag{2.43}$$

де y – деформація пневматика.

Застосована диференціальна форма закону Герстнера [117, 125, 321], в якій допускається пропорційність між граничними значеннями осадки і сили тиску.

У першому наближенні можна говорити про два динамічно-реологічні стани процесу кочення пневматика. Перший, умовно можна назвати "доущільнення" в

якому справедливий вираз [125] для умови $c \to \delta$ і $\frac{dx}{dt} > 0$. У цьому стані процес осадки прогресивно триває, доки x не зрівняється із δ - деякою граничною величиною осадки матеріалу. Власне отримання величини c можливе із розгляду деформаційної моделі під дією постійного навантаження $p = p_0$.

У цьому випадку швидкість осадки описується (2.41), після інтегрування по часу і розділення змінних(2.41). Якщо покласти $x = 0$ і $t = 0$, то маємо вираз близький до [125]:

$$p_0 = cx. \tag{2.44}$$

Якщо покласти $x \to 0$ і $t \to 0$:

$$\frac{ct}{\mu} = \frac{p_0}{c}\ln\left(1 - \frac{cx}{p_0}\right) - x \approx -\frac{p_0}{c}\left(-\frac{cx}{p_0} + \frac{c^2x^2}{p^2{}_0}\right) - x = \frac{cx^2}{2p_0}. \tag{2.45}$$

Таким чином з (2.45):

$$x \approx \sqrt{\frac{2p_0 \cdot t}{\mu}}. \tag{2.46}$$

Як наслідок, з формули (2.46), встановлено, що при $x \to 0$ швидкість зміни вертикального переміщення $\frac{dx}{dt}$ значно зростає, а вираз тиску набуває вигляду:

$$p \approx \mu x \frac{dx}{dt}. \tag{2.47}$$

Порівняння формули [125] і (2.47) вказує на те, що при умові $x \to 0$ величина осадки майже не залежить від параметру *c*. Це власне і є другий динамічно-реологічний стан процесу кочення пневматика. Визначення параметру δ, який може виступати критерієм розрізнення станів викладено у [125].

Деформація покриття почнеться відразу ж з моменту контакту його з колесом, тобто у точці де $\xi=a$, а закінчиться при $\xi=0$ [123, 320]. Співвідношення між геометричним місцем точок області контакту пневматика з механічними характеристиками і тиском [117 – 120, 125, 320, 321]:

$$y + x = \frac{a^2}{2R} - \frac{\xi^2}{2R}. \tag{2.48}$$

Вираз (2.48) у термінах тиску:

$$\left(\frac{1}{c} + \frac{1}{\beta}\right) p = \frac{a^2}{2R} - \frac{\xi^2}{2R}. \tag{2.49}$$

Початкова деформація пневматика у точці проекції осі на поверхню ($\xi=0$):

$$y_0 = \frac{1}{\beta} p_0 = \frac{c}{c+\beta} \frac{a^2}{2R}. \tag{2.50}$$

Сумарна початкова деформація пневматика разом із глибиною утворення колії таким чином становитиме:

$$h + y_0 = \frac{a^2}{2R}. \tag{2.51}$$

Після перетворення величина питомого параметру встановлюється:

$$h = \frac{a^2}{2R} - \frac{a'^2}{2R}. \tag{2.52}$$

де a' – у задній частині області контакту.

Як ми бачимо, для пошуку глибини осадки (основного параметру, що формує колію) необхідно ввести значення геометричних характеристик контакту

колеса, діаметра колеса та значення тиску. Але фактично приведена залежність є непридатною для отримання величини глибини осадки, оскільки містить погано прогнозовані параметри a та a'. Тому для перетворення рівняння і отримання доступних параметричних показників необхідно тиск колеса, визначати через серію послідовних перетворень із використанням інтегрування окремо по частинам області контакту [117, 125, 320, 321]:

$$\frac{1}{b}P = \int_{-a'}^{0} p d\xi + \int_{0}^{a} p d\xi . \tag{2.53}$$

Після підстановки (2.53) і інтегрування:

$$\frac{1}{b}P = \beta \frac{-a'^3}{3R} + \frac{c\beta}{c+\beta}\frac{a^3}{3R}. \tag{2.54}$$

Враховуючи, що $a' = a\sqrt{\frac{c}{c+\beta}}$ [125, 320]:

$$\frac{1}{b}P = \beta \frac{a^3}{3R} + \frac{c\beta}{c+\beta}\left(1+\sqrt{\frac{c\beta}{c+\beta}}\right). \tag{2.55}$$

Вже в виразі (2.56) відсутня величина a'. Після заміни геометричних параметрів на механічні в області контакту маємо рівняння зв'язку питомого тиску пневматика з параметрами колеса і покриття.

Для отримання формули для глибини колії, що утворилася після першого проходу колеса [125, 320]: використовуючи вираз (2.52) із заміною відповідного блоку у (2.56):

$$h = \frac{a^2}{2\times R} - \frac{a'^2}{2\times R} = \frac{c\times\beta}{c+\beta}\frac{a^3}{3\times R}. \tag{2.56}$$

Як наукову передумову для розробки математичної моделі з прогнозування утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, було використано: теоретичні положення та рішення задач кочення пневматичного колеса по пластичним та в'язкопружнопластичним середовищах О.Ю. Ішлінського та К. Джонсона; методологічні розробки застосування теорії термов'язкопружності для прогнозування поведінки асфальтобетону В.О. Золотарьова, В.В. Мозгового, Б.С. Радовського, Б.Б. Телтаєва та інших дослідників, при зміні температури та часу дії навантаження.

Для визначення глибини колії h після першого проїзду пневматичного колеса було використано рішення О.Ю. Ішлінського у вигляді [125]:

$$h = \frac{1}{2}(c \times \beta \times R)^{-\frac{1}{3}} \left[\left(\frac{3 \times P}{b} \sqrt{\frac{c+\beta}{c \times \beta} - 1} \right) \right]^{\frac{2}{3}}. \qquad (2.57)$$

де β – постійна пневматика, Па/м;

R – радіус пневматичного колеса, м;

b – ширина пневматика, м;

c – характеристика пластичних властивостей матеріалу, Па/м;

P – навантаження від колеса на опорну поверхню, Па.

При цьому використовували підходи О.Ю. Ішлінського стосовно врахування кількості проїздів пневматичного колеса на кінцеву вертикальну деформацію h_{N+1}, а також рішення для визначення навантаження від колеса на опорну поверхню P як функції часу дії навантаження t та швидкості руху колеса Vp і в'язкопластичних характеристик матеріалу μ, c, a: P = f(β, μ, c, a, R, t, Vp) – за рішеннями О.Ю. Ішлінського та в'язкопружних характеристик К, Θ, Т, а: P = f(К, Θ, Т, R, t, Vp) – за рішенням К. Джонсона.

Кочення колеса по пружній поверхні викликає її деформацію, після проходження колеса наступає відновлення матеріалу або релаксація [44, 85, 111,

260, 320]. Для в'язко-пружних матеріалів, протягом часу вимірювання, набагато більшого, ніж час релаксації, колісне навантаження (в еквіваленті) викликає незворотні пластичні деформації, як то кажуть, що такі матеріали володіють реономними властивостями [40, 44, 111, 128 – 130, 320, 323, 325]. Асфальтобетон становить собою матеріал з яскраво вираженими пружно-в'язко-пластичними властивостями. Характерною особливістю цих матеріалів є залежність деформації не тільки від величини діючого навантаження, але і від тривалості її дії [5, 44, 58, 74, 82, 85, 87, 111, 116, 119 – 121, 123, 128 – 130, 173, 260, 315, 320, 322, 325, 350, 376, 377, 427].

В'язко-пружний матеріал має початковий динамічний відклик на навантаження з модулем $K(1+\beta)$, але вже при статичних умовах релаксації – модуль К, що діє протягом часу t. Тому справедливо для в'язко-пружного матеріалу пружний модуль K замінити функцією релаксації ψ [5, 44, 85, 111, 260, 320, 350]. Рівняння стану напруження у в'язко-пружному елементі у точці x дається рівністю:

$$p(x,t) = -\sigma = -\int_o^t \Psi(t-t')\frac{\partial\varepsilon(t')}{\partial t'}dt' \qquad (2.58)$$

При усталеному коченні, для деформацій маємо $\frac{\partial\varepsilon(t')}{\partial t'} = \frac{v\alpha}{Rh}$, замінюючи t на x отримуємо:

$$p(x) = -\frac{1}{Rh}\int_{-x}^{x} x'\Psi(x-x')dx' \qquad (2.59)$$

Вибір функції релаксації лімітується набором матеріалу в якій перебуває дослідницька модель. Зазвичай розглядають дві прості моделі:

1) модель запізнення;

2) модель сталої повзучості.

Якщо функція релаксації відповідає умовам запізнення пружності, то функція релаксації відповідає загальній формі:

$$\Psi(t) = K\left(1 + \beta e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \tag{2.60}$$

де $K(1+\beta)$ – початковий динамічний пружний відклик;

τ – час дії навантаження.

При статичних умовах, коли діють процеси релаксації, змінюємо t на x і виконуючи інтегрування, отримуємо вираз для розподілу тиску. Ця модель набагато ефективніше описує стан механічного контакту у динамічній фазі взаємодії та дозволяє відійти від величин навантажень використовувати значення тиску, що приводить до простішого аналітичного вирішення. Рівняння цієї моделі ґрунтується на заміні часу x з наступним інтегруванням [123].

На початкових моментах часу взаємодії пневматика з матеріалом покриття діють пружні умови, матеріал володіє пружною реакцією, що відповідає модулю $K(1+\beta)$. Подібна реакція відбувається при низьких швидкостях кочення, коли час проходження області контакту більше часу релаксації матеріалу $(\xi_0 << 1)$. При статичних умовах, матеріал проявляє релаксаційні властивості, для опису якого необхідно враховувати не тільки K, але і час релаксації t (відповідно в розглянутій моделі і швидкість кочення). Число Дебори у такому випадку перебуває в значенні ($\xi_0 \sim 1$), коли час проходження пневматиком області контакту рівне часу релаксації матеріалу. Як граничний випадок, при дуже високих значеннях швидкості кочення $(\xi_0 >> 1)$, розподіл тиску і навантаження знову наближаються до випадку пружності, але вже з динамічним модулем пружної матеріалу основи $K(1+\beta)$ [125]. Введення у модель числа Дебори De, дозволяє спростити її шляхом скорочення обчислювальних параметрів.

Відповідно до існуючих положень про термореологічні показники асфальтобетонного покриття [5, 44, 58, 85, 111, 350, 370], механічна поведінка асфальтобетону значною мірою залежить від часу, то така поведінка називається в'язко-пружністю і проявляється по-різному: повзучість при постійному напружені; релаксація напружень при постійній деформації; згасання динамічних ефектів; залежність діаграми напруження-деформація від швидкості навантаження [5, 85]. У багатьох випадках, приклад коли потрібно враховувати деформаційну поведінку матеріалу чи встановити співвідношення між його в'язко-пружними характеристиками, бажано мати у своєму розпорядженні аналітичне представлення в'язко-пружних характеристик. Аналіз представлення в'язко-пружних характеристик асфальтобетону у залежності від часу дії навантаження, температури, функції релаксації, функції температурно-часової аналогії та різної гранулометрії асфальтобетону і виду бітумного в'яжучого, наведено в роботах [5, 44, 58, 85, 86, 111, 260, 350, 370, 401]. Тому як відомо, що функція релаксації асфальтобетону залежить від часу дії навантаження і температури. Збільшення температури негативним чином спричиняється на деформаційних властивостей асфальтобетонного покриття, приводить до збільшення часу релаксації, що перевищує середній час впливу транспортного засобу. Збільшення на кожні 10 °С температури еквівалентно збільшенню транспортного потоку в 1,2 рази. Основним компонентом, що визначає температурну чутливість є органічне в'яжуче [5, 44, 58, 85, 86, 111, 260, 350, 370, 401]. Функція релаксації $\Psi(t)$ відіграє ту саму роль, що модуль пружності E у законі Гука, але залежить від проміжку часу $(t-\tau)$, а функція повзучості $\Pi(t)$ аналогічно пружній податливості $1/E$, але також залежить від часу $(t-\tau)$. Для однозначного формулювання зв'язку між напруженням, деформацією і часом достатньо використати будь-яку із функцій $\Psi(t)$ або $\Pi(t)$, так як із роботи [86] слідує [86], що вони зв'язані між собою точною рівністю [350].

У даній роботі для визначення функції релаксації по даним випробування на повзучість використано співвідношення [85] на основі різних підходів Д. Феррі [402] і Р. Шепері [403] установлена наближена рівність $\Psi(t)$ [86].

За результатам визначення модуля пружності [5, 85], при різному часі дії навантаження рівність (2.61) має такий вигляд, причому похибка цієї рівності для асфальтобетонів становить 14%.

$$\psi(T) \approx E(t) \tag{2.61}$$

де $E(t)$ – модуль пружності асфальтобетону при часу дії навантаження t.

Відповідно, функцію релаксації $\Psi(t)$ можна з достатньою точністю визначити по відомим апробованим методикам, розробленим для визначення модуля пружності $E(t)$ і використовувати існуючі експериментальні дані значень $E(t)$ для асфальтобетонів різних складів. З цією метою можуть бути також використані результати випробувань зразків при установлених гармонічних коливаннях [62, 85, 404 – 406]. Якщо використовувати наступне наближене співвідношення [58, 85, 111, 358, 398, 406], що пов'язує $E(t)$ з діючою E' та уявленою E'' складовою комплексного модуля пружності у дослідженнях з різними гармонічними коливаннями ω:

$$E(t) = E'(\omega) - 0{,}4 \times \omega + 0{,}014 \times E''(10\omega), \quad t = 1/\omega. \tag{2.62}$$

У роботах [5, 85, 86, 370, 390, 394, 396, 397] наведено результати експериментальної перевірки використання цих наближених виразів до асфальтобетону. Тому можемо отримати за експериментальними даними числові значення функції релаксації $\Psi(t)$. Для розрахунку колії в асфальтобетонному покритті, функцію релаксації потрібно описувати математичним виразом, як функція часу.

Високої точності описання експериментально установленої функції $\Psi(t)$ дозволяє досягти її представлення у вигляді суми експонент:

$$\Psi(t) = E_{ДГ} + \sum_{i=1}^{n} a_i \exp\left(-t / b_i\right) \tag{2.63}$$

де $E_{ДГ}$, a_i, b_i – постійні. Але для достатньої точності апроксимації приходиться у виразі (2.63) використовувати суму з 10 – 15 членів.

Більш простим і доволі точним являється модифікований степеневий закон [5, 44, 58, 62, 85, 86, 111, 173, 260, 320, 350, 358, 370, 390 – 401, 407, 427 та ін.], який успішно використовують для опису функції релаксації асфальтобетонів:

$$\Psi_T(t) = E_{ДГ} + (E_{МТ} - E_{ДГ}) \times \left[1 + t/\eta\right]^{-\lambda}, \tag{2.64}$$

де $E_{ДГ}$ – модуль пружності довготривалий;

$E_{МТ}$ – модуль пружності миттєвий;

t – час релаксації;

η – нижній кут нахилу релаксаційної кривої;

λ – верхній кут нахилу релаксаційної кривої.

При вивченні пружно-в'язко-пластичної моделі для розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті, варто використовувати функцію релаксації з урахуванням функції температурно-часової аналогії. Це дозволить адекватно описувати розподіл напружень у тілі асфальтобетонного покриття, а отже дозволяє будувати коректні розрахункові схеми, для опису пружно-в'язкого характеру взаємодії пневматичного колеса з урахуванням температури, тому правомірна температуро-часова аналогія. Функція релаксації асфальтобетону при

даному його складі повинна бути функція двох перемінних $\Psi_T(t,T)$: часу t і температури T.

Відомий принцип [86] дає можливість об'єднати вплив температури і часу шляхом ведення поняття приведеного часу. Нехай існуючий проміжок часу випробування (час дії навантаження або час спостереження) при температурі T рівний t. Тоді при іншій температурі Q йому буде відповідати проміжок часу ζ у тому розумінні, що при одних початкових умовах по завершенню цих часових проміжків напружено-деформований стан в'язко-пружного тіла при цих температурах будуть співпадати [86].

У зацікавленому нас температурному діапазоні при будь-яких T і Q для даного в'язко-пружного матеріалу можна по даним t визначити ζ, то такий матеріал називають термореологічно простим і використовують формулу $\zeta = t/a(T,Q)$. Прийнявши деяку температуру Q, за базову, можна знайти приведений час, який прирівнюється до конкретної температури, для різних проміжків фактичного часу t при інших постійних температурах T. Якщо температура змінюється на протязі часу $T = T(t)$, то приведений час ζ при базовій температурі, яку можна визначити так $\zeta(t) = \int_0^t dt/a(T(t)Q)$. Тому, у нашому випадку, використовуємо функцію релаксації за залежністю (2.64).

Для визначення функції релаксації асфальтобетону для будь-якої температури $\Psi_T(t,T)$, достатньо знати функцію релаксації, при заданій температурі $\Psi_T(t,T)$ та коефіцієнт температурно-часового зміщення $a(T)$. Тоді можна записати:

$$\Psi_T(t,T) = \Psi_T(\zeta, T_1), \tag{2.65}$$

де ζ – приведений час;

T_1 – поточна температура.

$$\zeta = \int_0^t \frac{dt}{a(T)}, \tag{2.66}$$

де $a(T)$ – коефіцієнт температурно-часового зміщення, який залежить від температури (має з розмірністю [1/^{o}C]).

Залежність $a(T)$ від температури T встановлюється експериментально для кожного конкретного матеріалу. Тому, коефіцієнт $a(T)$ являє собою зсув за шкалою $\lg t$ функції релаксації, якщо $\lg \alpha = 0$, то властивості матеріалу не залежать від температури [5, 85, 370]. Тобто, чим більше значення $\lg \alpha$, тим сильніше змінюються властивості матеріалу зі зміною його температури.

Температурно-часовий зсув α у загальному випадку для асфальтобетону є нелінійною функцією від температури, що отримано з результатів експериментальних досліджень [5, 44, 58, 62, 85, 86, 111, 173, 260, 320, 350, 358, 370, 390 – 401 та ін.]. Функцію температурно-часової аналогії описували виразом [5, 44, 58, 62, 85, 86, 111, 173, 260, 320, 350, 358, 370, 390 – 401 та ін.]:

$$a(T,Q) = e^{-p(T-Q)}, \tag{2.67}$$

де p – постійна, що визначається експериментально;

T, Q – температура відповідно поточна та приведена.

Залежність $\theta(T)$ (коефіцієнт температурно-часової аналогії) від температури T встановлюється експериментально для кожного конкретного матеріалу.

Дану залежність можна встановити в координатах:

$$\lg \theta(T) - (T(t) - T_s), \tag{2.68}$$

де $T(t)$ – поточна температура;

T_s – температура приведення.

Встановлені вимоги задовольняє залежність:

$$a(T) = \frac{1}{e^{p[T(t)-T_s]}}, \tag{2.69}$$

де p – деякий експериментальний параметр з розмірністю [1/°C].

Отже, визначивши даний параметр, можна з більшою точністю розраховувати колію в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах.

У тому випадку, коли реологічні властивості асфальтобетону залежать від температури, можна скористатися температурно-часовою суперпозицією для розрахунку колії, яка застосовується для термо-реологічно простих матеріалів [5, 44, 58, 62, 85, 86, 111, 173, 260, 320, 350, 358, 370, 390 – 401 та ін.]. Для прогнозування колії в асфальтобетоні при змінних властивостях від змінної температури необхідно у функції релаксації час t та t_1 замінити на відповідні приведення:

$$\zeta = \int_0^t \frac{dt}{a\,[T(t)]}, \tag{2.70}$$

$$\zeta' = \int_0^{t_1} \frac{dt}{a[T(\tau)]}, \tag{2.71}$$

або

$$t - t_1 \quad на \quad \zeta - \zeta' = \int_{t_1}^t \frac{dt}{a\,[T(t)]}, \tag{2.72}$$

Таким вимогам задовольняє залежність:

$$a(T) = e^{-P(T_0 + k\ t - T_S)}, \tag{2.73}$$

де k – швидкість нагрівання;

Підставимо знайдену залежність (2.73) в рівняння (2.67) та після проведеного інтегрування [5, 85, 370, 394, 396, 397] отримаємо:

$$\zeta - \zeta' = -\frac{e^{P(T_0 + k \cdot t - T_S)}}{P \cdot k}\left(e^{-P \cdot k \cdot (t - t_1)} - 1\right). \tag{2.74}$$

Отже, визначивши даний параметр (коефіцієнт температурно-часового зміщення), можна з більшою точністю прогнозувати глибину колії в асфальтобетонному покритті.

З урахуванням (2.74) отримаємо остаточний вираз функції релаксації у такому вигляді:

$$\Psi_T(\zeta - \zeta') = E_{ДГ} + (E_{МТ} - E_{ДГ}) \times \left(1 + \frac{\frac{e^{P \cdot (T_0 + k \cdot t - T_S)}}{P \cdot k}\left(e^{-P \cdot k \cdot (t - t_1)} - 1\right)}{\eta}\right)^{-\lambda} \tag{2.75}$$

Застосування принципу температурно-часової аналогії до функції релаксації полягає у проведенні температурного нормування модулів пружності по всьому практично застосованому температурному діапазоні (від -10°С до +70°С). У вираз (2.75) пропонується ввести коефіцієнт $K_{УТ}^{\Psi_T}(П, T_p, ІП)$, який дозволить уточнити функції релаксації асфальтобетону за рахунок пенетрації $(П)$, температури розм'якшеності (T_p) та індексу пенетрації $(ІП)$ бітумного в'яжучого за залежністю:

$$\Psi_T(t,T) = E_{ДГ} + (E_{МТ} - E_{ДГ}) \times K_{УТ}^{\Psi_T}(П,T_p,ІП) \times \left(1 + \frac{\frac{e^{P\cdot(T_0+k\cdot t-T_S)}}{P\cdot k}\left(e^{-P\cdot k\cdot(t-t_1)}-1\right)}{\eta}\right)^{-\lambda} \qquad (2.76)$$

де $K_{УТ}^{\Psi_T}(П,T_p,ІП)$ – уточнюючий коефіцієнт функції релаксації асфальтобетону, який залежить від пенетрації, температури розм'якшеності та індексу пенетрації бітумного в'яжучого і визначається за залежністю:

$$K_{УТ}^{\Psi_T}(П,T_p,ІП) = \left(-\vartheta \times \gamma \times e^{-d\times П(T_p,ІП)} \times \left(g \times П(T_p,ІП) - f\right)\right) \qquad (2.77)$$

де $\vartheta, \gamma, d, g, f$ – експериментальні параметри, які залежать від виду в'яжучого є постійними і приймаються такі значення $\vartheta = 9$, $\gamma = 560$, $d = 0{,}03488$, $g = 0{,}0000136$, $f = 0{,}0028807$;

$П(T_p, ІП)$ – функція пенетрації бітумного в'яжучого, визначається за залежністю.

$$П(T_p,ІП) = 10^{\frac{ІП\times(T_p+120)-20\times T_p+1952}{500+50\times ІП}} \text{ або } П(T_p,ІП) = 10^{\frac{(ІП-20)\cdot(T_p-25)}{50\cdot(ІП+10)}} + 2{,}9031 \qquad (2.78)$$

Пропонується визначати функцію деформації з урахуванням виразу (2.76) за залежністю:

$$\Psi_T^{Д}(t,T) = E_{ДГ}^{Д} + (E_{МТ}^{Д} - E_{ДГ}^{Д}) \times K_{УТ}^{\Psi_T}(П,T_p,ІП) \times \left(1 + \frac{\frac{e^{P_Д\cdot(T_0+k\cdot t-T_S)}}{P_Д\cdot k}\left(e^{-P_Д\cdot k\cdot(t-t_1)}-1\right)}{\eta_Д}\right)^{-\lambda_Д} \qquad (2.79)$$

де $E_{ДГ}^{Д}$ – модуль деформації довготривалий, МПа;

$E_{МТ}^{Д}$ – модуль деформації миттєвий, МПа;

$P_Д$, $\eta_Д$, $\lambda_Д$ – параметри функції деформації.

Методика визначення функції релаксації та деформації наведено в розділі 4

Для здійснення переходу виразу, що описує отримання глибини колії, що утворилася, після першого проходу колеса з формули (2.57) у модель в'язко-пружності, згідно принципу [349]:

$$\gamma_t = \gamma_{ПР} + \gamma_{ПВ} + \gamma_{ВП} \tag{2.80}$$

Де γ_t – показник деформації;

t – повна;

$\gamma_{ПР}$ – пружна;

$\gamma_{ПВ}$ – в'язко-пружності;

$\gamma_{ВП}$ – в'язко-пластична.

З урахуванням принципу (2.79) необхідно виконати відповідні перетворення у нього фіктивних сил навантаження і релаксації. Для цього використаємо залежність [123]:

$$P = \int_{-a}^{b} p(x)dx = \frac{Ka^3}{RH} Fp(\beta, De), \tag{2.81}$$

де K – пружний модуль;

H – товщина покриття;

$Fp(\beta, De)$ – параметр функції релаксації.

Пропонується у рівнянні (2.57) значення P замінити залежністю (2.81) з урахуванням модуля K [320]:

$$h = \frac{1}{2} \times (\beta \times c \times R)^{-\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \times K \times a^3}{b \times R \times H} \times Fp \times \left(\sqrt{\frac{c+\beta}{c \times \beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \tag{2.82}$$

Беручи за основу вище наведені теоретичні положення та відомі підходи стосовно застосованих методів квазіпружної апроксимації у вирішенні в'язкопружніх задач на основі відомих пружних рішень (метод Р. Шепері) та застосовуючи аналогічні підходи у вирішенні в'язкопружнопластичних задач, базуючись на рішеннях пружнопластичності розроблені математичні моделі прогнозування тиску p^*, за якого не буде утворюватись колія, а також отримано рівняння прогнозування глибини колії h_{N+1} на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів після *N*+1 проїзду пневматичних коліс транспортних засобів.

$$p^* < \frac{16 \cdot \overline{\Psi}_T^{Д}(t',T) \cdot b}{3 \cdot \pi \cdot Д^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \overline{\Psi}_T^{Д}(t,T) \cdot R}{\beta}}, \qquad (2.83)$$

Після підстановки функції релаксації $\Psi_T(t,T)$ та коефіцієнта пластичності c_p у формулу (2.82) з урахуванням робіт [123, 125, 338] маємо наступний вигляд :

$$h_{N+1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\beta \cdot c_p \cdot R\right)^{-\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{\overline{\Psi}_T(t',T) \cdot a_1^{\,4}}{H_{а/б} \cdot R \cdot b} \cdot \left(\sqrt{\frac{c_p + \beta}{c_p} - 1}\right)\right]^{\frac{2}{3}} \cdot \left[1 + \vartheta \cdot (N-1)^k\right]^{\gamma} \cdot W \cdot K_{к}, \qquad (2.84)$$

$$t' = \frac{t}{a_T(T)}, \qquad (2.85)$$

$\overline{\Psi}_T(t)$ – середньо-інтегральне значення функції релаксації, яке визначається за залежністю:

$$\overline{\Psi}_T(t,T) = \left(\sum_{i=1}^{n} \Psi_{T\,абі}(t,T) \times H_{абі}\right) \div \sum_{i=1}^{n} H_{абі}, \qquad (2.86)$$

де $\Psi_{T\,абі}(t,T)$ – функція релаксації і-го шару асфальтобетонного покриття;

n – кількість шарів асфальтобетонного покриття (n=2);

$H_{абі}$ – товщина і-го шару асфальтобетонного покриття (і=2).

Постійні c і β, як правило, встановлюються експериментальним шляхом. Згідно принципу [320] показник c несе функцію не пружної реакції покриття при дії тиску під час кочення. Для практичних розрахунків більш правильним є корегування c показником, що враховував термов'якопружнопластичну складову матеріалу c_p. З цією метою вводиться безрозмірне відношення K_0, причому $c_p = K_0 \cdot c$:

$$K_0 = \frac{\Psi_T(t,T)}{\Psi_T^{Д}(t,T)} \tag{2.87}$$

$$c_p = \frac{\Psi_T(t',T)}{\Psi_T^{Д}(t',T)} \cdot c, \tag{2.88}$$

$$a_1 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \pi}{8} \cdot \frac{R \cdot p_0 \cdot Д^2}{\beta \cdot b}}, \tag{2.89}$$

де $\overline{\psi}_T(t',T)$, $a_T(T)$ – відповідно середньоінтегральне значення по товщині функції релаксації (*Па*) та температурно-часової аналогії асфальтобетону;

Д – діаметр кола, рівновеликого за площею відбитку колеса, м; p_0 – тиск повітря в пневматичній шині, Па;

W – функція, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів (вид функції і параметрів встановлюється експериментально);

ϑ, k, γ – параметри, що встановлюються експериментально і відображають вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді *N* колеса.

У отриманій математичній моделі (2.82) використовується функція релаксації $\psi_T(t,T)$ асфальтобетону, яка уточнена за рахунок коефіцієнту, що залежить від властивостей бітумного в'яжучого, а саме: пенетрації, температури розм'якшення та індексу пенетрації. Вид функції релаксації та її параметри

визначаються на основі випробувань асфальтобетонних зразків. Параметри ϑ, k, γ встановлюються на основі результатів визначення глибини колії при циклічному навантаженні зразка асфальтобетонного покриття при відомих значеннях функції релаксації та температурно-часової аналогії. Вид і параметри функції W встановлюється на основі результатів визначення глибини колії при певній комбінації причин колієутворення від внутрішніх факторів з використанням відомих значень функції релаксації та температурно-часової аналогії та параметрів ϑ, k, γ. Перевірка адекватності математичної моделі здійснюється за результатами експериментального визначення глибини колії з використанням зразків асфальтобетонного покриття за допомогою коліємірa, а також на основі натурних обстежень.

Дана математична модель дозволяє прогнозувати утворення колії в асфальтобетонному покритті, що опирається на жорстку залізобетонну основу від різного часу дії циклічного вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах, яка включає в себе параметри термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону (визначаються на основі експериментальних методів).

2.7 Висновки по розділу

1. На основі літературного аналізу розроблена класифікація причин утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, що дозволило більш повно врахувати внутрішні (рецептурно-структурні, конструктивні, технологічні) і зовнішні (кліматичні, транспортні, експлуатаційні) фактори при розробці математичної моделі та методу прогнозування утворення колії.

2. Відповідно до наукової ідеї, розроблено концептуальні положення з аналітичного розрахунку утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, з метою

підвищення його довговічності, яка включає в себе експериментальні, теоретичні та практичні підходи.

3. Удосконалено метод визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні, що дозволяє врахувати додаткове нагрівання покриття за рахунок його взаємодії із пневматичними колесами транспортних засобів.

4. На основі проведеного дослідження режимів транспортного навантаження на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів, для оцінки їх стійкості до утворення колії розроблена класифікація режиму транспортного навантаження, що відображає основні види режимів навантаження і характеризується часом дії t_i та інтенсивності навантаження N_i. Розроблено типову комбінацію режиму дії вертикального навантаження від транспортного засобу на асфальтобетонне покриття залізобетонних автодорожніх мостів.

5. Розроблено математичну модель, яка дозволяє прогнозувати глибину утворення колії в асфальтобетонному покритті, що опирається на жорстку залізобетонну основ, від дії циклічного вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах, яка включає в себе наступні параметри: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону (визначаються на основі експериментальних методів), параметри конструкції мостового полотна, дії вертикального навантаження та зміни температури.

6. Уточнено функціє релаксації та деформації асфальтобетону за рахунок коефіцієнту, який залежить від властивостей бітумного в'яжучого, а саме: пенетрації, температури розм'якшення та індексу пенетрації.

Основні результати досліджень другого розділу висвітлено в роботах автора: [5, 219, 298, 313, 320, 340, 341, 343, 353, 374, 409, 410, 412- 418, 421, 423 426, 427].

РОЗДІЛ 3
МЕТОД РОЗРАХУНКУ СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТІ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ ПЛИТОЮ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ

3.1 Постановка проблеми оцінки стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії

В рамках проблеми підвищення довговічності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах однією з найважливіших задач вважають збереження рівності покриття у часі. Аналіз (розділ 1) досліджень стану асфальтобетонного покриття показує, що утворення колії небезпечної глибини складає від 20 до 35 % всіх причин зниження транспортно-експлуатаційної якості автодорожніх мостів та доріг. Тому попередження утворення колії є надзвичайно важливою задачею, яка постає перед науковцями-дорожниками. Істотним недоліком українських нормативних документів з проектування мостів, зокрема [37, 356], є відсутність розділів з прогнозування стану асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах в процесі його служби. Кінець розрахункового терміну служби ніяк не пов'язується з обсягом руйнувань, простіше кажучи, невідомо, яка буде середня глибина колії. Тому в даному розділі запропоновано метод з прогнозування залишкових пластичних деформацій в асфальтобетоні, які проявляються у вигляді колії на покритті автодорожніх мостів від дії пневматичних коліс транспортних засобів та температури.

Базуючись на вітчизняних [40, 63, 72, 153, 260, 358, 368, 369], власних [219, 341, 342, 353, 354, 412 – 443] та зарубіжних [74, 87, 111, 121, 129, 130, 184, 322, 323, 355, 359 – 361, 444, 445] дослідженнях утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах обумовлені спільним впливом основних факторів: 1. Накопичення залишкових (пластичних) деформацій в асфальтобетоні під дією вертикального тиску пневматичного колеса, в першу чергу, вантажних транспортних засобів у жаркий літній період року. Цей фактор діє в основному на

правих полосах проїзної частини мосту, де перевищений рух великовагових транспортних засобів. Особливо значний вплив цього фактору в південній частині України, де суттєво діє довготривала висока літня температура, що призводить до прогрівання покриття. Температура покриття в полосі накату підвищується за рахунок тертя пневматичного колеса транспортного засобу із збільшенням інтенсивності руху. 2. Спільна дія удару виступів протектора обертаючої пневматичної шини і стирання асфальтобетону при проковзуванні деформованої шини в площині її контакту з покриттям. Стирання асфальтобетону резиновими шинами, як правило, супроводжується додатковим абразивним стиранням асфальтобетону твердими дрібними частинками бруду і продуктів зносу матеріалу покриття, в тій чи іншій кількості присутніми на поверхні покриття. Враховуючи, порівняно малу ефективність удару еластичною резиною у порівнянні зі стиранням (спільне стирання резиною та абразивне стирання), у співвідношенні цього фактору правомірно говорити не про знос, а переважно про стирання асфальтобетону не шипованими резиновими шинами транспортних засобів усіх типів. Цей фактор діє постійно, на всіх полосах руху і в різних кліматичних умовах. Інтенсивність стирання асфальтобетону залежить не тільки від його складу, а також від температури. 3. Знос асфальтобетону шипованими шинами в зимових умовах у результаті спільної дії удару металевих шипів по асфальтобетону при обертанні шини, стирання асфальтобетону шипами при проковзуванні деформованої шини в площині її контакту з покриттям і розколюючого точкового тиску шипів на асфальтобетон в зоні контакту шини з покриттям. Цей фактор діє переважно на лівих полосах проїзної частини, де переважає рух легкових транспортних засобів, які мають шиповані пневматичні колеса. Інтенсивність зносу асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах металевими шипами залежить не тільки від його складу, а також від температури. 4. Утворення інтенсивної колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах також відбувається через недостатнє зчеплення між асфальтобетонними шарами, а також між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляцією і бетонною основою. 5. Неякісне врахування матеріалознавчих, конструктивних та

технологічних факторів при проектуванні асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах призводить до зниження довговічності покриття в період експлуатації.

3.1.1 Загальні підходи до вирішення задачі з розрахунку глибини колії в асфальтобетонному покритті

Ідеєю методу є оцінка стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на стадії проектування та під час його експлуатації з врахуванням особливостей конструкції дорожнього одягу, що зумовлюють напружено-деформований стан покриття за рахунок взаємозв’язку покриття з жорсткою основою автодорожнього мосту і залежать від термореологічних властивостей асфальтобетону та параметрів впливу транспортного і кліматичного факторів. Запропонований метод ґрунтується на теоретичних основах (розділ 2) колієутворення в асфальтобетонних покриттях на автодорожніх мостах, що враховує вищенаведені фактори. Оцінювання колійності полягає в аналітичному прогнозуванні утворення колійності у часі на основі математичної моделі, параметри якої встановлюються експериментально та корегуються на основі вимірювання параметрів колійності в процесі експлуатації.

В основі теорії колієутворення використовується функціональне ядро рівняння стану [125], що зв’язує геометричні розміри плями контакту розподілу тиску, реакцію пневматика і основи в пружних матеріалах. Теоретичний аналіз розвитку процесів пластичного деформування тіл з в'язкою реологією показав свою корисність для розробки відповідної теорії для асфальтобетону, а перехід від моделі пружності до моделі в'язко-пружності здійснюється через встановлення відповідної функції релаксації. Незворотні деформації враховуються при заміщенні модулів пружності показниками, які описують пластичну реакцію середовища. Для врахування температурного впливу на в'язко-пружні характеристики матеріалів виконується адаптація функції релаксації т.з. температуро-залежною функцією релаксації на принципах температуро-часової аналогії. Всі вказані моменти дають змогу реалізувати аналітичну модель щодо

прогнозу глибини колії в заданих режимах експлуатації асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах, температурних полів, характеристик складу і інтенсивності транспортного потоку. Температурно часові умови деформування асфальтобетонного покриття визначають кліматом регіону і характером інтенсивності руху транспортних засобів. Інтенсивність впливу транспортних засобів на асфальтобетонне покриття мостів характеризується приведеною інтенсивністю дії рухомого навантаження або сумарним розрахунковим числом приведеного розрахункового навантаження (автомобілів за добу), що очікується на полосі накату, за строк служби покриття.

Порушення поперечної рівності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах у вигляді утворення колії призводить до небезпечних умов для руху транспортних засобів [344, 82, 354, 355, 72, 68, 87, 376, 445 – 447], а саме: 1. Підвищується ризик втрати управління транспортним засобом при виїзді з колії або в'їзді в колію в час виконання маневру. 2. У разі відсутності кута нахилу вздовж чи поперек асфальтобетонного покриття на мосту призводить до застоювання води в колії, що може призвести до аквапланування колеса транспортного засобу і як наслідок до втрати управління транспортним засобом. Крім зниження безпеки руху, застій води в колії призводить до більш інтенсивного розвитку колії. 3. В зимовий період погіршується ефективне видалення з колії сніжно-льодового відкладення, що збільшує зимову слизькість в полосі накату, а також погіршується безпечність руху.

У зв'язку з небезпечною глибиною колії установлені обмеження для асфальтобетонного покриття по параметру допустимої глибини колії [68, 72, 82, 87, 344, 354, 355, 376, 445 – 447]. Для розрахунку колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах пропонуються значення гранично допустимої глибини колії, що наведено в таблиці 3.1

Асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах з глибиною колії більше гранично допустимих значень відноситься до небезпечних для руху транспортних засобів і вимагає негайного проведення ремонтних робіт по усуненню колії. Тому в якості граничного стану асфальтобетонного покриття

прийнята гранично допустима глибина колії. Це означає, що утворена за розрахунковий строк служби максимальна глибина колії в асфальтобетонному покритті не повинна перевищувати граничного значення.

Таблиця 3.1 – Вимоги до гранично допустимої глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах

Шифр району	Гранично допустима $h_{Г.Д.}$ глибина колії на різних категоріях дороги, мм/ розрахункова швидкість руху, км/год			
	I/120	II/100	III/80	IV-V/60
А-1; А-2 А-3; А-4 А-5; А-6 А-7	15	20	25	30

Для оцінки інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону в якості граничного стану запропоновано, що накоплена за розрахунковий строк служби залишкова деформація як сума площ максимальної глибини колії в покритті не повинна перевищувати граничного значення. Пропонується оцінювати за теорію ймовірності процеси колієутворення в асфальтобетонному покритті з метою встановлення граничних станів деградації покриття на автодорожніх мостах.

3.1.2 Принципи розрахунку асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах

Проектування дорожнього одягу на мостах являє собою єдиний процес конструювання і розрахунку асфальтобетонного покриття на колієстійкість, довговічність з техніко-економічним обґрунтуванням варіантів з метою вибору найбільш економічного за даних умов.

Розрахунок асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах здійснюється за групами навантаження на одну найбільш завантажену вісь

дорожньо-транспортного засобу відповідно до [363, 379] з урахуванням технічної категорії автомобільної дороги.

Розрахунок асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах містить в собі: обґрунтування гідроізоляційного матеріалу, а саме наплавна, розпилювальна, оклеювальна, мастикова, бітумно-полімерна або іншого виду; вибір асфальтобетону в залежності від його гранулометрії та матеріалу; призначення кількості шарів асфальтобетону, розміщення шарів у конструкції і попереднє призначення їх товщини; оцінка необхідності призначення заходів з підвищення колієстійкості конструкції покриття.

При конструюванні асфальтобетонного покриття необхідно керуватись наступними принципами: а) конструкцію дорожнього одягу та вид асфальтобетонного покриття призначають виходячи з транспортно-експлуатаційних вимог, інтенсивності руху та складу транспортного потоку, кліматичних умов району проектування, вимог безпеки та комфортності руху, б) асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах повинно забезпечити колієстійкість і експлуатаційну надійність, економічність; задовольняти вимогам до транспортно-експлуатаційного стану покриття автодорожніх мостів автомобільної дороги відповідної категорії (табл. 2.3 та рис. 2.9) з очікуваним у перспективі складом й інтенсивністю руху, з урахуванням зміни інтенсивності протягом заданого строку служби і передбачуваних умов ремонту й утримання; в) конструкція покриття, товщина та матеріали шарів повинні забезпечувати суцільність, колієстійкість, рівність та шорсткість покриття під впливом нормативного розрахункового навантаження та природно-кліматичних факторів протягом розрахункового терміну служби; г) конструкція дорожнього одягу на автодорожніх мостах може бути прийнята типовою [448] чи розроблена індивідуально або прийнята згідно рис. 2.4, 2.5, та рис. 2.13. При виборі конструкції дорожнього одягу на мостах, перевагу варто віддавати перевіреній на практиці в даних умовах типовій конструкції.

Вихідні дані для розрахунку та конструювання дорожнього одягу на автодорожніх мостах повинні бути наступними: а) при новому будівництві:

інтенсивність та склад руху; категорія автомобільної дороги; дорожньо-кліматична зона району проектування; наявність місцевих дорожньо-будівельних матеріалів; б) при реконструкції чи капітальному ремонті додатково: технічні характеристики автодорожнього мосту, що знаходиться в експлуатації; інформація щодо ремонтних заходів асфальтобетонного покриття на даному автодорожньому мосту; існуюча конструкція асфальтобетонного покриття (вид асфальтобетону, товщина, та стан асфальтобетонних шарів) на автодорожньому мосту.

Вибір виду асфальтобетону в якості застосування його як покриття на автодорожніх мостах залежить від інтенсивності руху, складу транспортного потоку, вимог безпеки, комфорту руху, природних умов та техніко-економічних розрахунків. Покриття може бути одношарове, двошарове або тришарове і містити декілька однорідних шарів. Покриття повинно бути стабільно міцним, рівним, шорстким, протистояти накопиченню пластичних деформацій у вигляді колії при позитивних температурах. Для тривалого збереження шорсткості матеріал покриття повинен бути стійким до стирання.

Вибір матеріалів шарів асфальтобетону для автодорожніх мостів здійснюється відповідно до положень та вимог державних стандартів та галузевих нормативних документів та типового альбому [142, 363, 448 – 452], а також з урахуванням науково-практичного досвіду (застосування нових дорожньо-будівельних матеріалів, визначення та уточнення розрахункових характеристик).

При виборі матеріалу шарів покриття необхідно керуватися основними положеннями: асфальтобетон та асфальтобетонне покриття необхідно оцінювати з позиції матеріалознавчих, конструктивних та технологічних заходів, відповідно до розділу 7; асфальтобетонне покриття повинно витримувати розрахункове навантаження відповідно вимогам [142, 137 – 140] до фізико-механічних властивостей асфальтобетону, бути водо-, і термостійкими; для забезпечення коліємстійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах від дії руху великовагових транспортних засобів, слід влаштовувати: покриття з коліємстійких асфальтобетонів (щебенево-мастикові суміші, суміші типів А, Б та суміші литі

«Гусасфальт», обов’язково всі види сумішей на бітумі, модифікованому полімерами, а також з використанням мікроармуючих добавок) [449 – 452].

Товщину асфальтобетонного покриття слід призначати такою, щоб глибина колії, яка виникає від дії пневматичних коліс транспортних засобів та температури, не перевищувала допустимих значень (табл. 3.1). Для забезпечення цієї вимоги функція релаксації суміжних шарів повинна відрізнятись не більше, ніж в 2 рази. При конструюванні необхідно забезпечити надійне зчеплення між асфальтобетонними шарами шляхом раціонального підпору матеріалів шарів і підґрунтовки відповідно до конкретних умов руху. Перевіряють умови зчеплення на контакті шарів згідно (розділу 4) [343, 415, 453 – 466]; міцність між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляцією та плитою проїзної частини мосту при зсуві перевіряють за умовою міцності згідно (розділу 7) [379, 467]. Мінімальна товщина асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах призначається у відповідності (розділу 7) та [379, 448].

3.2 Розрахунок зміни температури в асфальтобетонному покритті від інтенсивності руху транспортних засобів

Суть розрахунку полягає у визначенні температурного поля в асфальтобетонному покритті, що формується під дією багатьох чинників, а саме: сонячної радіації, довгохвильового випромінювання атмосфери та самого покриття, конвекційної теплопередачі між покриттям та середовищем та ряду менш значущих [5, 298, 313, 320, 374, 416].. Як правило, кожен із складових температурного балансу чітко залежить від кліматично-метеорологічних факторів, теплофізичних характеристик конструкційних матеріалів і добре апроксимується математичними моделями за допомогою аналітичних рішень. Температурне поле конструкції асфальтобетонного покриття автодорожнього мосту в реальних умовах несе всі ознаки нестаціонарності (або квазістаціонарності), яке відрізняється тим, що температура будь-якої її точки змінюється з часом. В диференціальному записі

рівняння теплопровідності Фур'є-Кірхгофа у випадку нерухомого середовища і відсутності внутрішніх джерел тепла має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\nabla^2 T\,, \tag{3.1}$$

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ та ∇^2 – оператор Лапласа, записаний в прямокутній (або іншій циліндричній, сферичній) системі координат.

Це рівняння встановлює залежність між температурою, часом і координатами тіла в елементарному об'ємі, тобто поєднує часові і просторові зміни температури тіла. Оскільки температура тіла в загальному випадку нестаціонарного теплового поля є функцією координат і часу, то початкові умови, тобто розподіл температури в тілі на початковий момент, задається у вигляді $f(x,y,z,t) = f_0(x,y,z,t)$, де f_0 – відома функція, яка необов'язково повинна бути задана аналітично, а може бути представлена чисельно або графічно. При періодичній зміні падаючого теплового потоку на поверхню асфальтобетонного покриття і власного випромінювання поверхні формуються змінні температурні поля. Ці коливання передаються вниз конструкції і бувають, у певному наближенні, добовими, річними тощо. Визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс транспортних засобів з асфальтобетонним покриттям при їх коченні за виразом (2,29, 2.30).

3.3 Розрахунок фактичної сумарної кількості прикладення навантажен від дії транспортних засобів

Визначення фактичної сумарної кількості прикладення навантажень $N_{c\varphi}$, яка базується на запропонованих параметрах режимів вертикального

навантаження від дії пневматичних коліс транспортного засобу (табл. 2.3, рис. 2,9)

Аналітичний вираз (2.31, 2.39) певною мірою передає ідеалізовані умови кочення пневматичного колеса транспортного засобу і не враховує багато реальних моментів, які мають вплив на процеси колієутворення. Насамперед, необхідно враховувати добову і річну зміну навантаження, що прикладається на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів, вплив смуговості руху тощо. З цією метою використовується спосіб введення в аналітичний вираз (розділ 2) ряд нормуючих поправок [41]. Середньодобова перспективна кількість проїздів усіх коліс, що розміщені по один бік транспортного засобу в межах однієї смуги проїжджої частини, приведена до розрахункового навантаження і є приведеною розрахунковою перспективною інтенсивністю N_p (в одиницях на добу) дії навантаження:

$$N_p = f_{смуг} \times \sum_{m=1}^{n} N_m \times S_{m\ сум} \tag{3.2}$$

або середньодобова кількість проїздів у перший рік усіх коліс, що розміщені по один бік транспортного засобу в межах однієї смуги проїжджої частини, приведена до розрахункового навантаження і є приведеною розрахунковою інтенсивністю N_{1p} у перший рік (в одиницях на добу) дії навантаження:

$$N_{1p} = f_{смуг} \times \sum_{m=1}^{n} N_{1m} \times S_{m\ сум} \tag{3.3}$$

де $f_{смуг}$ – коефіцієнт, що враховує кількість смуг руху та розподіл руху транспорту на них, визначається згідно з [41];

n – загальна кількість марок транспортних засобів у складі транспортного потоку;

m – кількість розрахункових років служби асфальтобетонного покриття;

N_m – перспективна кількість проїздів за добу в обох напрямках автомобілів *i*-ї марки в один. за добу;

N_{1m} – середньодобова інтенсивність руху в обох напрямках автомобілів *i*-ї марки в перший рік служби в один. за добу;

$S_{мсум}$ – сумарний коефіцієнт приведення дії на дорожній одяг транспортного засобу *i*-ої марки до розрахункового навантаження ($Q_{розр}$).

Інтенсивність руху приведена до розрахункового навантаження (автомобілів за добу) розраховується за формулою порічно із врахуванням коефіцієнтів приведення (перший, другий, десятий, п'ятнадцятий роки) [41], тому сумарну кількість проїздів розрахункового навантаження за термін служби асфальтобетонного покриття визначають за формулою:

$$\sum N_p = 0{,}7 \times T_{рдр} \times K_n \times K_c \times f_{смуг} \times \sum_{m=1}^{n} (N_{1m} \times S_{m\ сум}), \tag{3.4}$$

де $\sum N_p$ – сумарна кількість прикладення навантажень;

$T_{рдр}$ – кількість розрахункових діб за рік, що мають вплив на колієутворення асфальтобетонного покриття [41];

K_n – коефіцієнт, що враховує ймовірність відхилення сумарного руху від середнього, що очікується і значення його наведено в [41];

K_c – коефіцієнт суми, що визначається за формулою [41]:

$$K_c = \frac{q^{T_{сл}} - 1}{q - 1} \tag{3.5}$$

де $T_{сл}$ – розрахунковий строк служби (приймається відповідно до [356, 363]);

q – показник змін інтенсивності руху даного типу автомобіля за роками; встановлюється за результатами техніко-економічних вишукувань або за іншими даними (може змінюватися від 0,80 до 1,10).

За відсутності інших даних значення $T^m_{рдр}$ наведено в таблиці [41].

Для врахування сумарної кількості прикладення навантажень $\sum N_р$ враховують середньодобову інтенсивність руху в обох напрямках автомобілів в заданий рік служби N_{1m} та коефіцієнт $s_{мсум}$, що виконує приведення дії пневматичних коліс на асфальтобетонне покриття транспортного засобу різних типів автомобілів до розрахункового навантаження (табл. 3.2).

Розрахунок кількості колієнебезпечних днів у році $T_{рдр}$ здійснюється наближено з урахуванням нормативних документів [41, 368, 369, 379] та залежностей (2.35, 2.36). Наближене визначення кількості колієнебезпечних днів у році $T^m_{рдр}$ для дорожньо-кліматичних регіонів України (індекс У) можливе за [41, 368, 369, 379]. Точне визначення кількості колієнебезпечних днів у році $T^ф_{рдр}$ з врахуванням розподілу температур потребує встановлення середньорічної позитивної температури повітря даного регіону і наступного визначення показника $T^ф_{рдр}$. Тому величину середньорічної позитивної температури повітря пропонується визначати з метою оцінювання кількості колієнебезпечних днів в році для асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах [87] за формулою:

$$T^+_{срч} = \frac{\sum_{i=1}^{n_м} T_{ср_i}}{n_м} \tag{3.6}$$

де $n_м$ – кількість місяців у році зі стійкою позитивною температурою (використати табл. 5);

$T_{ср_i}$ – середня температура i-го місяця (обирається за довідковими матеріалами), °С [41, 368, 369, 379].

Таблиця 3.2 – Розрахункові показники кількості проїздів за добу в обох напрямках транспортних засобів

Тип автомобіля	Рік експлуатації				S_i	$S_i*N_i(1)$	$S_i*N_i(3)$	$S_i*N_i(7)$	$S_i*N_i(15)$
	1-й	3-й	7-й	15-й					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Легкові автомобілі	4000	4100	4200	4300	0,005	20	20,5	21	21,5
Легкі вантажні автомобілі вантажопідйомністю від 1 до 2 т	200	210	215	220	0,2	40	42	43	44
Середні вантажні автомобілі вантажопідйомністю від 2 до 5 т	300	310	315	315	0,7	210	217	220,5	220,5
Важкі вантажні автомобілі вантажопідйомністю від 5 до 8 т	120	125	130	140	1,25	150	156,25	162,5	175
Дуже важкі вантажні автомобілі вантажопідйомністю більше 8 т	500	600	700	800	0,7	350	420	490	560
Автобуси	200	210	220	230	1,25	250	262,5	275	287,5
Тягачі з причепом	200	220	240	240	0,7	140	154	168	168
Сума	5520	5775	6020	6245	4,805	1160	1272	1380	1477
Примітка. Розрахунок коефіцієнту N_{pm} здійснюється за табл. 1, де m – розрахунковий рік, p – опорний рік відліку, зазвичай p=1).									

Пропонується для розрахунку колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах визначати фактичне сумарне число прикладення навантажень $N_{сф}$, яке базується на запропонованій класифікації режимів вертикального навантаження від дії транспортного засобу (табл. 2.3 та рис. 2.9), а також з урахуванням залежностей (розділ 2) за формулою:

$$N_{сф} = \sum_{j=1}^{m} \sum_{\varphi=1}^{k_\varphi} N_\varphi \times t_{н\varphi} \qquad (3.7)$$

де $\sum_{j=1}^{m}\sum_{\varphi=1}^{k_\varphi} N_\varphi$ – сумарна інтенсивність дії навантаження даного виду режиму (табл. 2.3);

$t_{н\varphi}$ – час дії навантаження (табл. 2.2);

j – номер температурного періоду.

3.4 Умова граничного стану показника стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії

Метод розрахунку стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, в основі якого використано теоретичні положення та аналітичні залежності, що отримані у другому розділі [313, 320, 374, 416, 426]. Запропоновано умову граничного стану показника стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії, яка перевіряється за сумарною залишковою пластичною деформацією у вигляді колії, накопиченою за розрахунковий строк служби асфальтобетонного покриття

$$h^{\max}(\sum N_{c\varphi},\, t_{н\varphi}, T) \le h_{ГД}\ , \qquad (3.8)$$

де $h^{\max}(\sum N_{c\varphi}, t_{н\varphi}, T)$ – максимально глибина колії в асфальтобетонному покритті, яка залежить від сумарної кількості прикладання розрахункового навантаження, часу дії навантаження та температури, м;

$\sum N_{c\varphi}$ – розрахункова сумарна кількість прикладання розрахункового навантаження, одн. навант.;

$h_{Г.Д}$ – гранично допустима глибина колії за нормативними документами, м.

Асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах з глибиною колії більше гранично допустимих значень ($h_{Г.Д.}$) відносяться до небезпечних для руху

автомобілів і вимагають негайного проведення робіт по усуненню колії та підсиленню конструкції.

3.5 Розрахунок глибини колії в асфальтобетонному покритті

Суть методу полягає у розрахунку глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах від дії пневматичних коліс та температури з урахуванням тертя шини.

Базуючись на теоретичних основах (розділі 2) пропонується методика для розрахунку глибини колії, яка складається з декількох блоків: Послідовність методу розрахунку складається з таких етапів. Визначення температури асфальтобетону в смузі накату з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс транспортних засобів з асфальтобетонним покриттям при їх коченні за виразом. Визначення фактичної сумарної кількості прикладення навантажень $N_{c\varphi}$, яка базується на запропонованих параметрах режимів вертикального навантаження від дії пневматичних коліс транспортного засобу (табл. 2,3, рис. 2.9). Визначається розрахункова глибина колії за математичною моделлю, визначається з урахуванням вихідних даних загальна глибина колії, визначається максимальна глибина колій, перевіряється умова.

Асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах з глибиною колії більшою гранично допустимих значень, відноситься до небезпечних для руху транспортних засобів і вимагає негайного проведення ремонтних робіт по усуненню колії. Тому, в якості граничного стану для асфальтобетонного покриття прийнята гранично допустима глибина колії. Це означає, що утворена за розрахунковий строк служби максимальна глибина колії в асфальтобетонному покритті не повинна перевищувати граничного значення $h_{Г.Д.}$ Визначення загальної глибини колії $h_{заг}^{сер}$ в асфальтобетонному покритті, з урахуванням підходів А.П. Васильєва, встановлюються за залежністю:

$$h_{заг}(\sum N_{c\varphi}, t_{н\varphi}, T) = h_p(\sum N_{c\varphi}, t_{н\varphi}, T) + h_\tau(N_{c\varphi}) + h_\Delta + h_{вип}\ , \qquad (3.9)$$

де $h_p(\sum N_{сф}, t, T)$ – розрахункова глибина колії в асфальтобетонному покритті, яка визначається за рівнянням (2.82), або (2.10) м [320];

$h_\tau(N_{сф})$ – знос покриття в смузі накату, який залежить від інтенсивності руху транспортних засобів та строку служби асфальтобетонного покриття, м;

h_Δ – глибина колії внаслідок доущільнення асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах приймається для розрахунків 2 мм.

ття, м;

$h_{вип}$ – висота випору колії (приймається відповідно додатку Г), м.

для асфальтобетонного покриття, яке складається з одного шару (рис. 2.4)

$$h_{N+1} = \frac{1}{2}\cdot\left(\beta\cdot c_p\cdot R\right)^{-\frac{1}{3}}\times\left[\frac{3\cdot\pi}{4}\cdot\frac{\psi_T(t',T)\cdot a_1^{\,4}\cdot}{H_{а/б}\cdot R\cdot b}\cdot\left(\sqrt{\frac{c_p+\beta}{c_p}}-1\right)\right]^{\frac{2}{3}}\cdot\left[1+\vartheta\cdot(N-1)^k\right]^{\gamma}\cdot W\cdot K_к\ , \qquad (3.10)$$

де ϑ, k, γ – параметри, що встановлюються експериментально і відображають вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді *N* колеса. Параметр ϑ змінюється в межах від 0,1 до 0,8, а k від 1 до 2 та γ від 0,01 до 0,08.

W – функція, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів (вид функції і параметрів встановлюється експериментально (розділ 4) або приймається для розрахунків за таблицею 3.3, (додаток Б)) (3.11).

$$W = \sum_{j=1}^{n}\frac{(h_{ij}-h_{0j})}{(n\cdot H)}\ . \qquad (3.11)$$

де h_{ij} – деформація в точці після 10000 циклів, мм;

h_{0j} – початковий вимір в точці;

H – товщина зразка, мм;

N – кількість вимірів глибини колії.

Таблиця 3.3 – параметр, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів

Різновиди асфальтобетонів	параметр *W*, в залежності від внутрішніх факторів
Тип Г	0,092
Тип В-10	0,085
Тип В-20	0,052
Тип Б-10	0,078
Тип Б-20	0,049
Тип А-10	0,061
Тип А-20	0,036
ЩМА-10	0,058
ЩМА-20	0,023
ГА-10	0,067
ГА-15	0,045

В якості вихідних величин задаються наступні параметри: β – постійна пневматика, Па/м; b – ширина пневматика, м; c_p – пластична постійна, Па/м, R – радіус колеса, м, H – товщина покриття, м. коефіцієнт бокового деформування $K_к$. У разі відсутності даних $K_к$ для розрахунку приймають значення, яке рівне одиниці. Пластичну постійну $c_p = K_0 \cdot c$ визначають з урахуванням залежності K_0 або приймають значення 0,018 Па/м..

Знос покриття можливо розрахувати за виразом:

$$h_\tau(N_{сф}) = \left(A \times N_{сф} + B\right) \cdot T_p \qquad (3.12)$$

де A, B – параметри зносу асфальтобетонного покриття від дії шипованих пневматичних коліс транспортних засобів, параметри приймаються [87]: $A = 0{,}00009$; $B = 0{,}143$, мм;

T_p – строк служби покриття, роки.

У разі використання автоматизованого модуля обчислення глибини колії, в якості вихідних параметрів додається ряд характеристик пневматичного колеса, тип асфальтобетону, вид в'яжучого, параметри функції релаксації. Ці вхідні дані використовувалися для побудови альбому прогнозування колії в асфальтобетоні, приклад наведено на (рис.3.1) та в додатку В.

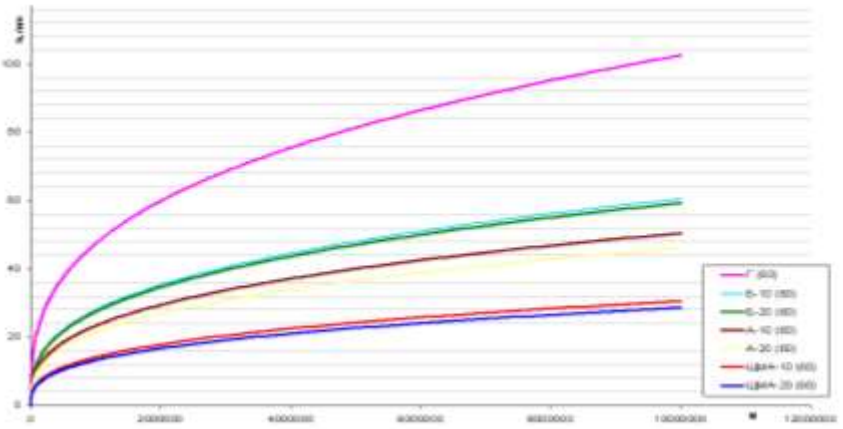


Рисунок 3.1 – Прогнозування глибини колії в асфальтобетонному покритті із заданими параметрами кочення: бітум модифікований полімером БМПА 40/60-57, тиск 0,5 МПа, температура 60 °С, товщина покриття 7 см, інтенсивність руху пневматичного колеса транспортного засобу - 60 км/год.

Розрахунок загальної глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах в залежності від інтенсивності транспортних засобів, температури, різного тиску та товщини покриття за розрахунковою моделлю (рис.2.13). Використання аналітичних розрахунків закладених у метод дозволяє встановити середню величину загальної глибини колії для заданих параметрів руху автомобільного транспорту. Гнучкість методу полягає в охопленні широкого кола параметрів, що мають вплив на формування колії в асфальтобетонному покритті, до них можна віднести такі як: термореологічні, рецептурно-структурні, конструктивні, технологічні, дорожньо-кліматичні, різна інтенсивність руху, навантаження тощо. Натомість, для більшості практичних задач для отримання

наближеної оцінки максимальної глибини колії зручнішим є номограмний спосіб (рис. 3.2 , 3.3).

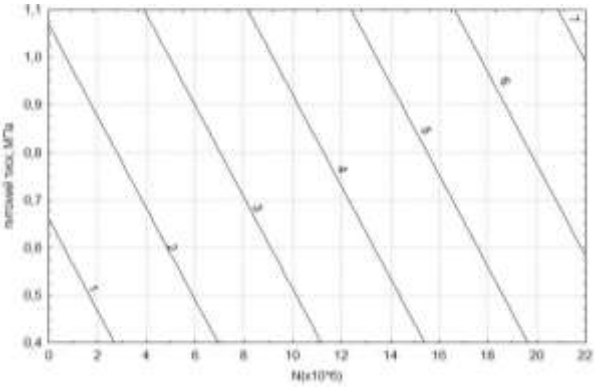


Рисунок 3.2 – Прогноз колії $h_p(\sum N_{сф})$ (в мм – показані значення колії на ізолінії) для асфальтобетону типу Б-10

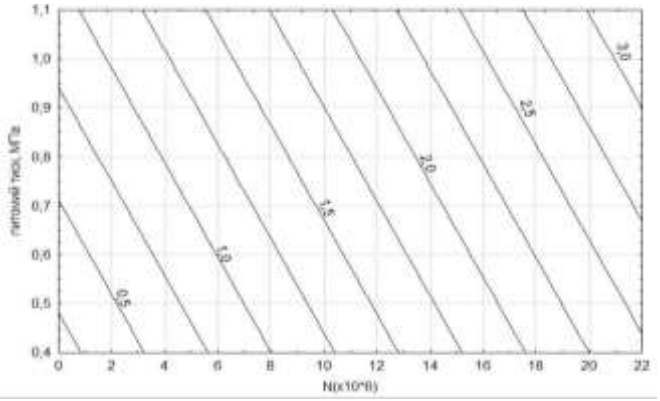


Рисунок 3.3 – Прогноз колії $h_p(\sum N_{сф})$ (в мм – показані значення колії на ізолінії) для асфальтобетону типу ЩМА-20

Останній підхід передбачає, що дослідник вибирає із альбому необхідну номограму із заданими параметрами асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту, який експлуатується в конкретній дорожньо- кліматичній зоні, а потім шляхом лінійної інтерполяції відшуковує питому величину колії. Для випадку температури поверхні 60 °С, марки в'яжучого, БМП 40/60-56 на номограмі (рис. 3.2, 3.3) винесені максимальні величини колії (в ізолініях від 1 мм до 14 мм). Це стосується окремих типів асфальтобетону: Г, Б-10, Б-20, А-10, А-20, ЩМА-10, ЩМА-20, з максимальною крупністю зерен щебеню (10, 20 мм). У випадку використання асфальтобетону з крупністю зерен 15 мм необхідно прийняти як середнє значення глибини колії між максимальною крупністю зерна 10 мм та 20 мм даних типів асфальтобетону [468 – 470]. Глибина колії для асфальтобетону типу В займає середнє значення глибини колії між асфальтобетоном типу Г та типу Б. Визначення глибини колії полягає в суперпозиції від ефективного числа прикладення навантажень N та тиску p.

Також пропонується лінійне рівняння з довірчою апроксимацією (R^2=0,99), на основі, якого отримані номограми (рис. 3.2 – 3.3) для прогнозування глибини

колії в асфальтобетонному покритті в залежності від інтенсивності і дії навантаження за залежністю:

$$h_p = A + B \cdot N_{c\varphi} + C \cdot s \qquad (3.13)$$

Де A, B, C – параметри апроксимації наведені в таблиці 3.7;

s – безрозмірний параметр, який залежить від питомого тиску ($s = p/g$);

g – перевідний параметр (рівний 1, МПа);

p – питомий тиск необхідно приймати за таблицею 3.4, МПа;

Таблиця 3.4 – Розрахункові параметри для прогнозування колії (3.15)

Різновиди асфальто-бетону	Параметри апроксимації, мм			Нормативне статичне навантаження на вісь, кН	Питомий тиск p, МПа	Категорія автомобільної дороги
	A	B	C			
Тип Г	-1,254	0,000480	4,988	100	0,6	V
Тип В-10	-1,054	0,000407	4,0436	100	0,6	IV, V
Тип В-20	-1,020	0,000230	3,943	115, 100	0,6	III, IV, V
тип Б-10	-0,6156	0,000236	2,4486	115, 100	0,8, 0,6	II, III
тип Б-20	-0,5703	0,000218	2,2685	115, 100	0,8	I, II, III
тип А-10	-0,5375	0,000206	2,138	130, 115,	0,9, 0,8	I, II, III
тип А-20	-0,3593	0,000138	1,4291	130, 115	0,9, 0,8	I, II, III
ЩМА-10	-0,2726	0,000104	1,0845	130, 115	0,9, 0,8	I, II, III
ЩМА-20	-0,2656	0,000102	1,0565	130	1,0, 0,9	I, II

Використовуючи залежність (3.9), максимальне значення глибини колії в асфальтобетонному покритті з відповідною забезпеченістю визначається за формулою:

$$h^{\max}(\sum N_{c\varphi}, t_{н\varphi}, T) = h_{заг}(\sum N_{c\varphi}, t_{н\varphi}, T) \cdot (1 + t_{дй} \cdot C_v), \qquad (3.14)$$

де $t_{дй}$ – коефіцієнт довірчої імовірності;

C_v – коефіцієнт варіації глибини колії (приймається за табл. 3.5).

Коефіцієнт варіації глибини колії на асфальтобетонному покритті C_v встановлений на основі літературних даних та власних досліджень з урахуванням автомобільних доріг різних категорій.

Таблиця 3.5 – Значення коефіцієнтів варіації

Значення коефіцієнта C_v для різних категорій доріг				
I	II	III	IV	V
0,23	0,25	0,26	0,29	0,30

Отримано за формулою (12) значення максимальної глибини колії h^{max} порівнюють за умовою (3.8) (табл. 3.1). При виконанні умови (3.8) асфальтобетонне покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини задовольняє умові довговічності за критерієм забезпечення поперечної рівності.

3.6 Висновок по розділу

1. Запропоновано принципи розрахунку асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах;

2. Для розрахунку стійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини запропоновано умову граничного стану, яка перевіряється за сумарною залишковою деформацією у вигляді колії, накопиченою за розрахунковий строк служби асфальтобетонного покриття.

3. Отримане за допомого математичної моделі лінійне рівняння з довірчою апроксимацією (R2=0,99) за допомогою якого можна отримувати номограми для визначення глибини колії в асфальтобетонному покритті в залежності від інтенсивності і дії навантаження та питомого тиску, а також відповідної категорії автомобільних дорог.

4. Розроблений метод розрахунку стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, від дії вертикальних навантажень пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє враховувати комплексну дію основних факторів, а саме: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; температуру асфальтобетону; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантажень.

5. Основні результати досліджень третього розділу висвітлено в роботах автора: [5, 298, 313, 320, 374, 416, 426].

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ КОЛІЇ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ

Метою експериментальних досліджень є: перевірка адекватності розроблених теоретичних моделей (розділ 2, 3) та отриманих результатів теоретичних досліджень реальним процесам зміни температури та колієутворення в асфальтобетонному покритті, від дії транспорту; аналіз дефектів асфальтобетонного покриття мостів, на автомобільних дорогах загального користування, отриманих з бази даних АЕСУМ; натурні дослідження по вивченню колієутворення в асфальтобетонному покритті та зміни температури на мостах; експериментальне визначення функції релаксації та температурно-часової аналогії досліджуваних асфальтобетонів в залежності від часу дії навантаження і температури; виконання лабораторних та стендових досліджень з визначення інтенсивності колії в асфальтобетонному покритті; оцінка міцності зчеплення покриття з основою при зсуві; аналіз впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетоні.

У даному розділі наведені методи, що дозволяють встановлювати фізичні, деформаційні (накопичення залишкових деформацій у вигляді колії) та міцнісні характеристики матеріалів покриття, що є складовою методу розрахунку коліестійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах (розділ 3, 6).

Даний розділ базується на результатах дослідження автора [5, 341-343, 370, 394, 409, 410-419, 421-425, 428-431, 433-438, 440-443, 454].

4.1 Натурні дослідження асфальтобетонного покриття автодорожніх мостів

4.1.1 Визначення глибини колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів

Суть методики полягала у візуальному обстеженні поверхні асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах та характер колієутворення

на їх поверхні, а також глибину колії з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів. При обстежені також на деяких об’єктах виконували відбір проб асфальтобетону з послідуючим їх випробуванням. Обстеження здійснювалось на різних характерних ділянках асфальтобетонних покриттів автодорожніх мості в різних кліматичних умовах, з різною інтенсивністю руху.

Виконане дослідження асфальтобетонних покриттів на мостах свідчить, що на даний час одним з найбільш розповсюджених видів дефектів являється колійність. Встановлений характер утворення колії і особливості подальшої інтенсивності накопичення колії в асфальтобетонному покритті від різних факторів відповідають отриманим раніше результатам різних дослідників [474]. Проведено аналіз колійності на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів в розрізі областей, адміністративного значення різних технічних категорій автомобільних доріг, що фіксуються в базі даних АЕСУМ.

Слід зауважити, що кількість обстежених мостів на дорогах державного значення станом на 01.06.2015 складає 3806 мостів (59 % від кількості мостів на дорогах державного значення), кількість обстежених мостів на дорогах місцевого значення – 1110 (11,5 % від кількості мостів на дорогах державного значення), в цілому на дорогах загального користування – 4916 од. (30,43% від загальної кількості). Розподіл кількості обстежених мостів наведений в науково-дослідній роботі [474].

4.1.2 Дослідження зміни добової літньої температури в покритті

Суть методики полягала у вивченні зміни температури по глибині асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту в залежності від зміни температури навколишнього середовища, а також дослідження інтенсивності транспортних засобів в полосі накату (колії) покриття на підвищення температури. Є припущення, що покриття в колії прогрівається більше і швидше за рахунок зростання інтенсивності руху транспортних засобів та зменшення загальної товщини покриття, за рахунок встановленої температурної залежності

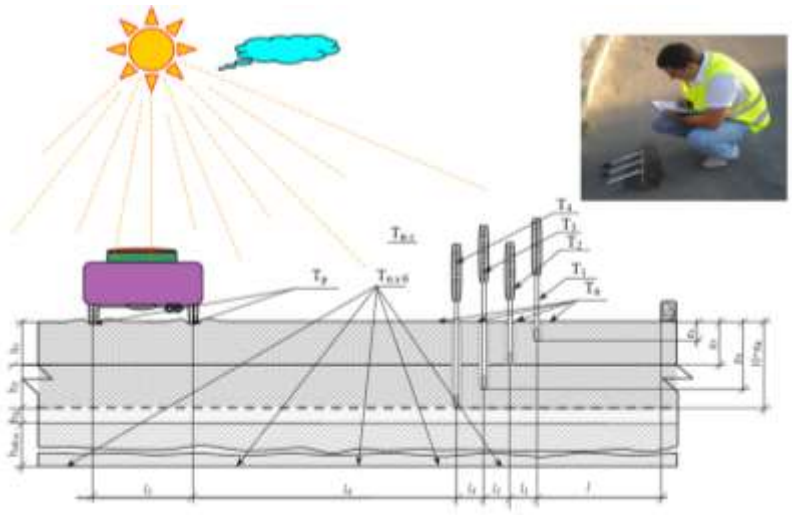
прогрівання, що передбачено здійснювати на основі експериментальної перевірки.

Засоби випробувань і допоміжне обладнання: термометр інфрачервоний для вимірювання температури з діапазоном вимірювань -32 ^{o}C до 400 ^{o}C; термометр хімічний ртутний скляний, що забезпечує вимірювання температури до 100 °С з ціною поділки шкали 1 °С згідно з ГОСТ 400-80; тепловізор; електродрель; фотоапарат цифровий.

Порядок підготовки до проведення випробувань. При вивченні зміни температури в асфальтобетонному покритті по глибині в якості об'єкта дослідження прийнято два автодорожні мости в місті Києві, а саме: Автодорожній міст (шляхопровід) при перетині вул. Кіквідзе із залізничною станцією «Київ-Московський»; Південний мостовий перехід через річку Дніпро на естакадній частині. Перед випробуванням виконувались роботи із буріння отворів в асфальтобетонному покритті діаметром 8 мм за допомогою електродрилі на різну глибину. В кожен із отворів наливається вода з температурою не нижче 20 ^{o}C на глибину 15-20 мм, через 20 хв в дані отвори закладаються термометри у відповідності до схеми (рис.4.1) та таблиці 4.1.

Конструкція дорожнього одягу на проїзній частині шляхопроводу: 1 – залізобетонна плита; 2 – вирівнюючий бетонний шар; 3 – обмазочна гідроізоляція «Ребіт»; 4 – дрібнозернистий щільний асфальтобетон типу Б з максимальною крупністю зерен 20 мм на бітумі, модифікованому полімером «Kraton D1101» - 4,8%, «Ребіт» - 1,6% та 0,3% Адгезивна добавка, від маси бітуму.

У відповідності схеми (рис. 4.1) та таблиці 4.1 необхідно визначати вплив інтенсивності транспортних засобів на підвищення температури в полосі накату асфальтобетонного покриття за допомогою термометра інфрачервоного або тепловізора [41, 292, 386, 475].



$T_{н.с}$ – температура навколишнього середовища; $T_п$ – температура поверхні покриття; T_1, T_2 T_3 T_4 – температура покриття на відповідній глибині; $T_{н.з/б}$ – температура низу залізобетонної плити; $T_р$ – температура поверхні покриття в полосі накату (колії); z_1, z_2, z_3, z_4 – глибина закладання термометрів хімічних ртутних скляних; h_1, h_2 – товщина асфальтобетонних шарів; h_3 – товщина вирівнюючого бетонного шару; $h_{з/б.п}$ – товщина залізобетонної плита; Н – загальна товщина дорожнього одягу; l – відстань бордюру чи бар'єрного огородження; l_1, l_2, l_3 – відстань між отворами закладання термометрів; l_4 l_5 – відстань до поверхні покриття полоси накату (колії).

Рисунок 4.1 – Схема дослідження температури в конструкції дорожнього одягу на проїзній частині шляхопроводу

Таблиця 4.1 – Технічні дані по вимірюванню температури в покритті

Показники	**Один. вим.**	**Опис досліджень**	**Джерело методів дослідження**
Температура навколишнього середовища, $T_{н.с}$	^oC	Випробування проводять весною, літом але при температурі $T_{н.с}$ не нижче 25 ^oC	[41, 292, 386, 475]
Температура поверхні покриття, $T_п$	^oC	Вимірюється за допомогою термометра інфрачервоного та тепловізора	[41, 292, 386, 475]
Температура покриття на відповідній глибині, T_1, T_2, T_3, T_4	^oC	Вимірюється за допомогою термометра хімічний ртутний скляний що забезпечує вимірювання температури до 100 °С з ціною поділки шкали 1 °С	ГОСТ 400-80
Температура низу залізобетонної плити, $T_{п.з/б}$	^oC	Вимірюється за допомогою термометра інфрачервоного або тепловізора	[41, 292, 386, 475]
Температура поверхні покриття в полосі накату (колії), $T_р$	^oC	Вимірюється за допомогою термометра інфрачервоного або тепловізора	[41, 292, 386, 475]
Глибина закладання термометрів хімічних ртутних скляних, z_1, z_2, z_3, z_4	мм	Глибина залежить від загальної товщини Н. z_1=0,25·Н, z_2=0,5·Н, z_3 = 0,75·Н, z_4= Н.	-
Товщина асфальтобетонних шарів, h_1, h_2	мм	Назначається у відповідності нормативних документів або за окремими рекомендаціями.	[41, 355, 356, 448]

Порядок проведення випробувань. Виміри температури асфальтобетонного покриття в полосі накату $T_р$ та на його поверхні $T_п$ виконували за допомогою інфрачервоного термометра і тепловізора, а температури $T_{н.с}$, T_1, T_2 T_3 T_4 на різній глибині за допомогою скляних ртутних термометрів (таблиця 4.1), а температуру $T_{н.з/б}$ низу залізобетонної плити автодорожнього мосту $T_р$ за допомогою інфрачервоного термометра і тепловізора визначали на протязі доби. Результати вимірювань температур записувались до робочого журналу через кожні дві години. Дані дослідження по вимірюванню температури в покритті виконували в травні, червні і серпні 2013 р. та 2014 р.

Обробка результатів. Визначення середньої температури покриття в полосі накату $T_р$ та на поверхні $T_п$, $T_{н.с}$, а також на різній глибині T_1, T_2 T_3 T_4 і температуру $T_{н.з/б}$ низу залізобетонної плити автодорожнього мосту, а значення загальної нерівності обчислюють, як приклад для температури покриття $T_п$ за формулою:

$$\overline{T_П} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_П}{n}, \qquad (4.1)$$

де $\overline{T_{н.с}}$ – загальна температура навколишнього середовища;

$\overline{T_р}$ – загальна температура поверхні покриття в полосі накату (колії);

$\overline{T_П}$ – загальна температура поверхні покриття;

$\overline{T_1}, \overline{T_2}, \overline{T_3}, \overline{T_4}$ – загальна температура покриття на відповідній глибині;

$\overline{T_{н.з/б}}$ – загальна температура низу залізобетонної плити.

Середньоквадратичне відхилення загальної температури як приклад для поверхні покриття обчислюється за формулами:

$$\sigma_{П} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(T_{П} - \overline{T_{П}}\right)}{n-1}}, \quad (4.2)$$

Розрахункове значення температур з урахуванням формул (4.1, 4.2):

$$T_{П}^{роз} = \overline{T_{П}} + t \cdot \sigma_{П}, \quad (4.3)$$

4.2 Об’єкти експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводили на асфальтобетонах різної гранулометрії, а саме: традиційні асфальтобетони (стандартні) піщані і дрібнозернисті асфальтобетони (тип Г, В, Б, А), щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА) та асфальтобетон литий (ЛА). Для приготування асфальтобетонів різних видів використовувався гранітний щебінь кубовидної форми «Гайворонського» спецкар’єру, відсів подрібнення гранітної гірської породи Кременчуцького кар’єроуправління «Кварц» та вапняковий мінеральний порошок. Асфальтобетони виготовлені з використанням щебеню розміром 10 мм, 15 мм, 20 мм. Зернові склади вихідних мінеральних матеріалів, що призначені для приготування вище наведених асфальтобетонів, були визначені методом ситового аналізу і наведені в додатку Б. Асфальтобетонне покриття на залізобетонних мостах та шляхопроводах України, кільцевий стенд ДП «Дорожній контроль якості».

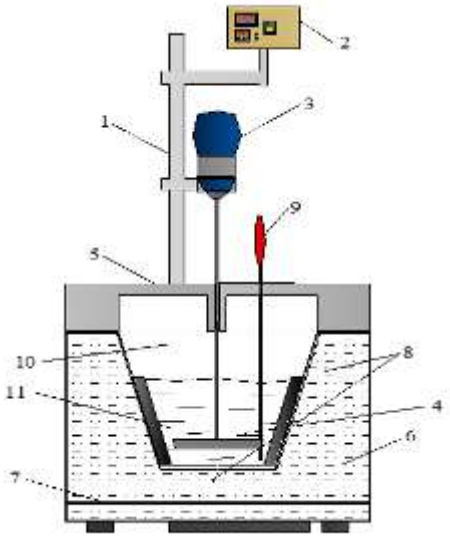
Досліджувані асфальтобетони на бітумах дорожніх марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130 та бітумах, модифікованих полімерами марок: БМПА 40/60-57, БМПА 60/90-53, що модифіковані полімерами – термоеластопластами, терполімерами; гідроізоляція - використовувалась рулонна, мастикова та напиляєма. Мінеральні матеріали за дослідженими показниками фізико-механічних властивостей відповідають вимогам чинних в Україні нормативних документів і можуть бути використані для приготування досліджуваних асфальтобетонів. В якості стабілізуючої волокнистої добавки використовували

«АРОН-БВ». Опис досліджуваних асфальтобетонів та фізико - механічні властивості і бітумних в’яжучих наведено в додатку Б.

4.3 Методи визначення властивостей об’єктів досліджень

4.3.1 Метод приготування бітуму модифікованого полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки

Для виконання поставленої задачі, в умовах науково-дослідної лабораторії «Технології матеріалів і конструкцій транспортного будівництва» ім. проф. Г.К. Сюньї, при кафедрі дорожньо-будівельних матеріалів і хімії Національного транспортного університету, за допомогою лабораторної лопатевої мішалки (рис.4.2).



1 – штатив; 2 – блок управління; 3 – електродвигун; 4 – лопатева мішалка; 5 – масляний термостат; 6 – масляний резервуар; 7 – електротен; 8 – термопара в масляному термостаті; 9 – термопара для модифікованого бітуму; 10 – металева ємність згідно ДСТУ 3277; 11 – бітумне в’яжуче.

Рисунок. 4.2 – Схема лабораторної лопатевої мішалки

Даний метод розроблено за участю автора і знайшов використання при розробці стандарту організації України [476]. Він призначений для приготування в лабораторних умовах за допомогою лабораторної лопатевої мішалки, бітуму,

модифікованого полімерами та адгезивами з метою підбору його складу і встановлює вимоги до технологічного процесу перемішування.

Запропоновано в методі послідовність операцій приготування бітумів, модифікованих полімерами та адгезивами з використанням лабораторної лопатевої мішалки. Запропоновано методику визначення моменту часу завершення процесу модифікації бітуму полімерами та адгезивами при різних технологічних параметрах (температурі, швидкості перемішування та вмісту модифікатору) до повної стабілізації властивостей та гомогенізації бітумного в'яжучого. Встановлення з певною періодичністю зміни характеристик від часу модифікації t: умовної в'язкості при 25 °С пенетрації $П_{25}$, еластичності Е, бітумного в'яжучого та їх коефіцієнта варіації $К_в^{П}$; $К_в^{Е}$.

Обґрунтовано момент часу завершення модифікації бітумного в'яжучого встановлюється за ознаками як повної стабілізації властивостей так і досягнення його однорідності.

Метод приготування складається з: засобів та допоміжного пристрою; методики модифікації.

Засоби та допоміжні пристрої [5, 432, 437, 476]: – термометр хімічний ртутний скляний з ціною поділки шкали 1°С; термопара; шафа електрична сушильна, що забезпечує температуру до плюс 200 °С з похибкою ± 1 °С. Лабораторна лопатева мішалка для приготування модифікованого бітуму (рисунок 4.2) та технічні параметри лопатевої мішалки наведені в [476]. Особливості методики модифікації наведено в стандарті [476].

Відібрані проби бітуму випробовують та визначають середнє значення пенетрації та еластичності, а також на основі результатів випробувань трьох відібраних проб визначають коефіцієнти варіації визначених величин, як показник однорідності модифікованого бітуму (розділ 6). Результати модифікації наведено в додатку Б. Час завершення модифікації бітуму полімером визначають за методикою, що наведена в додатку Б, застосовуючи режим відбору проб згідно з [476]. Момент часу завершення модифікації бітуму полімером приймався початком модифікації адгезивом. Адгезивна добавка водиться в бітумне в'яжуче в

кількості, 0,3 % від маси в'яжучого згідно програми експерименту, зі швидкістю 7-15 г/хв. Загальний час модифікації бітумного в'яжучого адгезивом до 2 год. Час завершення модифікації бітумного в'яжучого встановлюється за методикою (розділ 6 та додатку Б). Після закінчення модифікації бітуму модифікованого полімером, в'яжуче випробовували згідно [477].

4.3.2 Визначення стандартних фізико-механічних властивостей асфальтобетону

Проектування зернових складів і приготування асфальтобетонних сумішей та зразків використовували стандартне та спеціальне обладнання лабораторії, а також випробували зразки відповідно до [142, 449, 451, 452, 477 – 484].

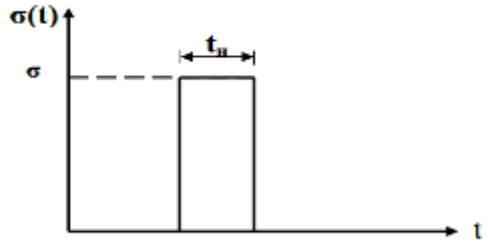
4.3.3 Визначення функції деформації та релаксації асфальтобетону

Опис методу. Полягає **у** визначенні модулів пружності слід враховувати характерні залежності їх властивостей від часу дії навантаження. Вплив часу дії навантажень від транспортних засобів на напружений стан асфальтобетонного покриття враховується у відповідності з [41] шляхом урахування в'язко-пружних властивостей матеріалів в залежності від особливостей роботи покриття. Модулі пружності визначають при часу дії навантаження на зразок, що відповідає розрахунковій тривалості навантаження від транспортних засобів в умовах експлуатації асфальтобетонного покриття.

При розрахунку асфальтобетонного покриття використовують значення модуля пружності, використовуючи дві розрахункові схеми за часом навантаження – динамічну при тривалості дії навантаження $t_н = 0.1$ с і статичну при тривалості дії навантаження $t_н = 600$ с згідно схеми, приведеної на рис.4.3.

Для визначення короткочасного модуля при динамічному навантаженні (при температурах 0 ^{0}С та 10 ^{0}С для асфальтобетону) застосовується методика [41] випробування, що полягає у моделюванні дії розтягуючих горизонтальних нормальних напружень, які виникають при згині монолітних шарів від впливу

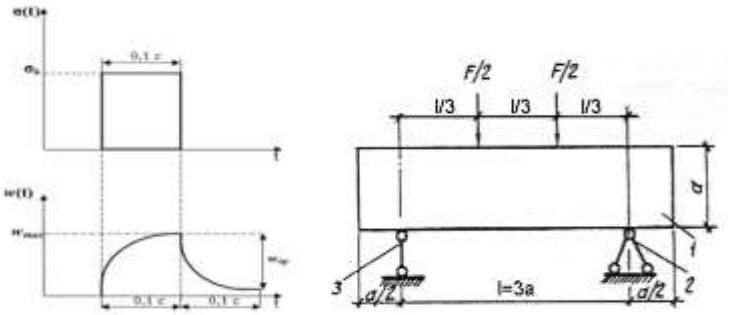
транспортних засобів за допомогою розрахункової схеми у вигляді статично визначеної балки на двох опорах, завантаженої двома зосередженими силами.



σ(t) – горизонтальні нормальні напруження величина яких залежить від часу дії навантаження; $σ_к$ – горизонтальні нормальні напруження які виникають при тривалості дії навантаження $t_н$

Рисунок 4.3 – Схема режиму навантаження зразка під час випробування

Такі випробування виконують у режимі одноразового прикладання навантаження з часом його дії 0,1 с, за схемою згідно [484], що наведена на рис. 4.4, вимірюючи прогин зразка в середині прогону. Випробування асфальтобетонних зразків-призм [484] розмірів: 40 мм × 40 мм × 160 мм, що готували шляхом вирізання із асфальтобетонних плит, які отримані у лабораторних умовах на секторному пресі згідно [482].



1 – зразок; 2 – шарнірна нерухома опора; 3 – шарнірна рухома опора; w(t) – пружний прогин, величина якого залежить від часу дії навантаження; w_{max} – максимальний прогин при тривалості дії навантаження 0.1 с; $w_{пр}$ – пружний прогин

Рисунок 4.4 – Схема прикладання навантаження на зразок при визначенні модуля пружності

Функція температурно-часової аналогії розглядає температурно-часову суперпозицію, що зв'язує властивості матеріалу до температури.

Найбільш проста і однозначно трактуюча характеристика властивостей матеріалу при різних режимах навантаження відповідає лінійній області його механічної поведінки, коли деформації досить малі, щоб дотримувалася пропорційність між деформаціями і напруженнями. Аргументи T і t для термореологічно простих матеріалів взаємопов'язані принципом температурно-часової аналогії. Це дозволяє в величезному масштабі розширити часові діапазони визначення ізотермічних в'язко - пружних функцій на основі експериментів, що проводяться при різних температурах (метод суперпозиції), характеризувати весь комплекс в'язко - пружних властивостей матеріалу за допомогою двох функцій - ізотермічної залежності в'язко - пружних властивостей і температурної залежності фактора приведення, встановлювати взаємну відповідність між результатами термомеханічних випробувань, що проводяться в неізотермічних умовах навантаження, і ізотермічними в'язко - пружними функціями.

За визначенням функція температурно-часового зміщення $a_T(T)$ відображає температурну чутливість зміни в’язко - пружних властивостей асфальтобетону, а логарифм її значення чисельно дорівнює довжині відрізка вздовж логарифмічної шкали часу на яку необхідно змістити паралельні між собою криві релаксації (або повзучості) одну відносно іншої, отриманих експериментально при різних постійних температурах T_1 і T_2 до їх суміщення [44, 86 394, 468, 469]:

$$\lg a_T(T) = \lg t(T_1) - \lg t(T_2) \qquad (4.4)$$

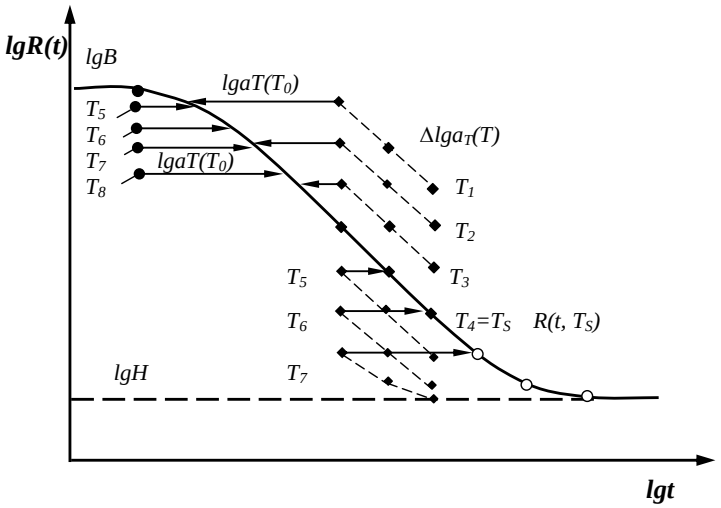
Схема побудови повної кривої функції релаксації та встановлення значень функції температурно-часового зміщення показано на рис. 4.5.

Для апроксимації експериментальних значень функції температурно-часового зміщення використовують залежність виду:

$$a_T(T) = e^{-P_1(T_0 + Kt - T_S)} \tag{4.5}$$

Встановлені вимоги задовольняє залежність:

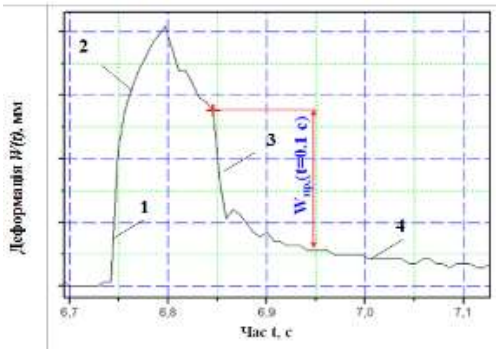
$$a(T) = \frac{1}{e^{p[T(t) - T_s]}}, \tag{4.6}$$

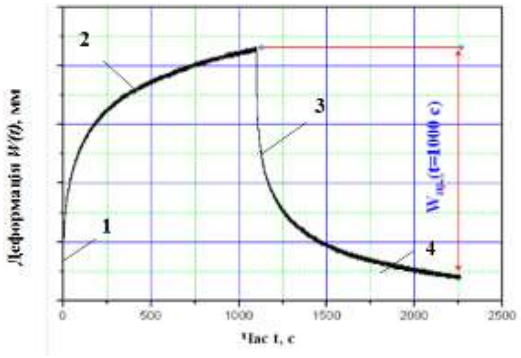


• – при прозвучуванні ультразвуком; ▪ – при випробуванні в умовах короткочасної повзучості; о – те ж в умовах тривалої повзучості

Рисунок 4.5 – Схема побудови повної кривої модуля пружності асфальтобетону на підставі застосування принципу температурно-тимчасової аналогії за результатами експериментів

Тензометрія – сукупність експериментальних методів визначення напружено-деформованого стану матеріалу елементів конструкції [485]. Базується на вимірюванні деформацій у зразках за допомогою тензодатчиків та реєструвальної апаратури або визначенні змін інших параметрів матеріалу, викликаних механічним напруженням у ньому. Під час проведення випробувань досліджуваних асфальтобетонів за допомогою маятникового приладу [5, 394, 468, 469] визначають пружні прогини при часу дії навантаження: t = (0,1 – 0,001) с – динамічний прогин (рис.4.6), а при t = (1 – 1000) с – статичний прогин (рис.4.7).



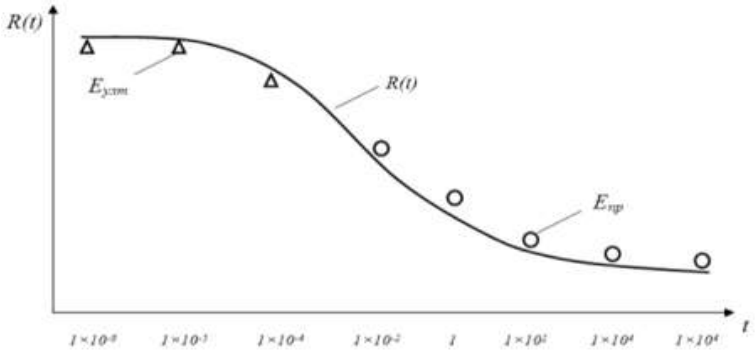


1 – навантаження зразка зі сталою швидкістю від нуля до розрахункового значення навантаження; 2 – дія сталого розрахункового навантаження; 3 – зменшення навантаження від розрахункового значення до нуля; 4 – зворотній прогин після знімання навантаження

Рисунок 4.6 – Характерні ділянки реологічної діаграми

Рисунок 4.7 – Характерні ділянки реологічної діаграми

Схема визначення функції релаксації за допомогою експериментальних точок, модулів пружності отриманих різними методами (рис. 4.8).



Δ – модуль пружності, що визначається за допомогою ультразвуку ($E_{улт}$); О – модуль пружності, що визначається за допомогою маятникового приладу ($E_{пр}$); *R(t)* – функція релаксації

Рисунок 4.8 – Схема визначення модулів пружності за допомогою різних приладів

Визначення модуля пружності. Постійна, що зв'язує напруження та пружну відносну деформацію, називається модулем пружності (модулем Юнга) і є найважливішою деформаційною характеристикою пружних властивостей матеріалу. Із закону Р. Гука витікає, що модуль пружності – відношення поздовжнього нормального напруження σ_z до поздовжньої відносної пружної

деформації $\varepsilon_Z^{(e)}$, що викликана напруженням в умовах одноосьового напруженого стану:

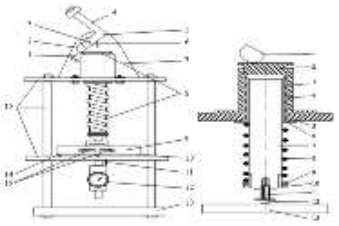
$$E_e = \frac{\sigma_Z}{\varepsilon_Z^{(e)}}. \qquad (4.7)$$

Модуль пружності E_e має розмірність напружень. Для ідеально пружнього тіла E_e є одним із констант, що дає всю інформацію про деформаційні властивості тіла, необхідну для розрахунку напружень, переміщень та деформацій, що виникають в ньому при будь-якому навантаженні. Вихідна залежність (4.7) використовується в теорії пружності та опорі матеріалів для вирішення різноманітних задач про напружено-деформований стан суцільного середовища.

Модуль пружності при температурі від 0 °С до 30 °С визначають за результатами випробувань короткочасно діючими навантаженнями зразків-балочок. Модуль пружності при підвищених температурах (30 °С – 60 °С) визначають за температурно-часовою аналогією.

Визначення розрахункового модуля пружності на зразках-балочках за допомогою маятникового приладу. Для визначення модуля пружності використовували пристрій, що забезпечує можливість багаторазового прикладання навантаження тривалістю дії 0,001 с – 0,1 с, з паузами між навантаженнями, що не менше ніж у 10 разів перевищують тривалість дії навантаження. Для проведення випробування використовували маятниковий прилад ДерждорНДІ [5, 41, 44, 86, 394, 468, 469]. Статичний модуль пружності асфальтобетонних зразків при тривалості навантаження 1с – 10^6 с визначали за методикою яка описана в роботах [86, 394].

Прилад ДержшляхНДІ (рис. 4.9, 4.11) являє собою маятник у вигляді важеля 4, жорстко закріпленого за допомогою кронштейна 7 на каркасі із сталевих стержнів 15 і станини 13. До верхньої площадки каркаса прикріплено механізм навантаження 8, а на середній площадці каркаса розміщено рухому 10 та нерухому 14 опори під зразок-балочку 9.



1 – сферична частина ексцентрика; 2 – головка; 3 – вісь; 4 – важіль; 5 – різьбовий валик; 6 – шайба; 7 – кронштейн; 8 – механізм навантаження; 9 – зразок-балочка; 10 – рухома опора; 11 – фіксатор; 12 – індикатор годинникового типу; 13 – станина; 14 – нерухома опора; 15 – сталеві стержні; 16 – тензодатчики

Рисунок 4.9 – Маятниковий прилад при 4-х точковому випробуванні та механізм його навантаження

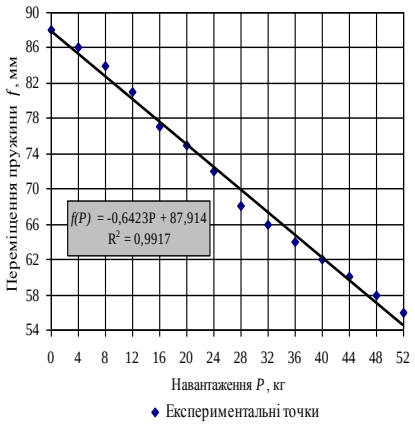


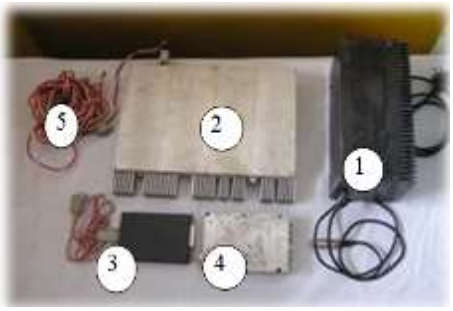
Рисунок 4.10 – Залежність переміщення пружини від навантаження

Порядок проведення випробування зразків-балочок для визначення модуля пружності такий [5]: зразки-балочки боковою гранню укладають на двох опорах, які знаходяться одна від одної на відстані 12 см (рис. 4.9). Одна з опор – рухома 10, у вигляді шарніра, зокрема, у вигляді шарніра – стійки. Частина опори, на яку опирається зразок-балочка, має циліндричну поверхню радіусом 5мм; для зручності центрування, біля опор доцільно встановлювати фіксатори, що фіксують положення зразка, а подушку, що передає навантаження на зразок, зв’язували з опорною станиною за допомогою важеля та стійки. Навантаження повинне викликати напруження, рівне розрахунковому допустимому для найближчого аналога випробовуваного матеріалу. Воно може бути також прийняте рівним 0,2 – 0,3 від руйнівного навантаження, встановленого раніше випробуванням зразків на міцність [41, 480]. Підготовлений до випробування зразок-балочку навантажують. Рівень навантажень встановлюється таким, щоб на основі випробувань можна було побудувати залежність. Зразки балочки випробують на розтяг при 4-х точковому згині (рис. 4.9, рис. 4.10); вертикальний прогин зразка вимірюють за допомогою індикатора годинникового типу.

Вимірювання деформацій з фіксацією сигналів індикатором годинникового типу допускається при часі дії навантаження 0,1 с; визначення прямої та зворотної деформації вимірюють за допомогою комплексу (рис. 4.11) з використанням тензодатчиків, схема підключення обладнання якого наведена на рис. 4.12.

Програмно-апаратний комплекс є комплектом апаратури, призначеної для одержання і попереднього опрацювання інформації, що надходить із датчиків при проведенні тензометричних вимірів. Під час випробувань асфальтобетонних зразків для вимірювання параметрів (напруження в асфальтобетонних зразках і повзучості) використовувались спеціальні тензометричні датчики (рис 4.13). Отримані дані за допомогою комп'ютера обробляються спеціально розробленими програмами з виведенням результатів на екран (рис. 4.14). Методика та результати тарування тензодатчиків наведено в роботах [86, 394, 486].

Особливістю роботи цих вимірювальних пристроїв є здатність перетворювати вимірюваний параметр в аналоговий сигнал, який потім опрацьовується і фіксується на комп'ютері. Похибка комплексу становить близько 5%.



1 – блок живлення; 2 – концентратор-мультиплексор; 3 – адаптер; 4 – модулі аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП); 5 – з'єднувальні кабелі

Рисунок 4.11 – Програмно-апаратний комплекс

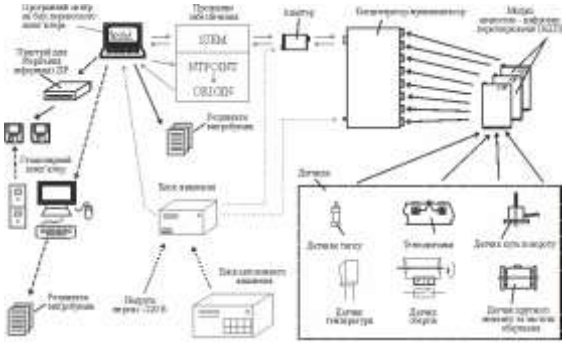


Рисунок 4.12 – Схема підключення обладнання тензометричного вимірювального комплексу

Рисунок 4.13 – Асфальтобетонні зразки з тензодатчиками

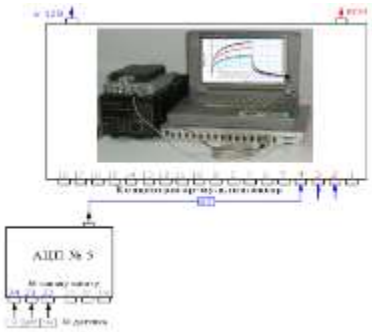


Рисунок 4.14 – Загальний вигляд вимірювальної установки

Обробка результатів випробування. Користуючись ділянками лінійної залежності між зусиллями та деформаціями, обраховують значення динамічних модулів пружності $E_{пр}$ у МПа, який уточнено за участю автора [470] та застосований у нормативному документі [481] за залежністю:

$$E_{np} = k_w \frac{F \cdot l^3}{28{,}174 \cdot \overline{w} \cdot J}, \tag{4.8}$$

де F – довільне значення навантаження;

l – проліт балки;

$\overline{w} = W_{np.}$ – середнє значення динамічного та статичного прогину (повзучість), що відповідає значенню навантаження F на прямолінійній ділянці графічної залежності [481, 470];

k_w – коефіцієнт форми зразка, який визначається за допомогою програми SCAD [470];

J – момент інерції поперечного перерізу зразка ($J = bh^3/12$, де h, b – відповідно висота і ширина зразка).

Оскільки матеріали, що містять органічне в’яжуче, мають в’язко-пружньо-пластичні властивості, то для проведення більш точних розрахунків недостатньо відомостей про модулі пружності цих матеріалів при розрахунковому часі дії

навантаження [5, 394]. Тому, при дослідженнях передбачено визначення функції релаксації на основі визначення модуля пружності як за різних температур так і при різному часі дії навантаження. Для визначення миттєвого значення модуля пружності використовували ультразвуковий імпульсивний прилад СП УК-10ПМС (рис. 4.15) [5, 394].

Визначення розрахункового модуля пружності на зразках-балочках за допомогою ультразвукового приладу. Для визначення модуля пружності при будь-якій температурі перед випробуванням зразки витримують протягом 2 годин при заданій температурі, яку підтримують і в процесі випробування. Перед проведенням випробувань прилад повинен не менше 5 хв. прогріватися. Потім, зразок-балочку боковою гранню укладають на опору приладу і визначають швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль *V (м/с)* в асфальтобетонному зразку, в залежності від частоти коливань ν ($с^{-1}$), яка визначає тривалість дії навантаження (с).

1 – передня і задня панелі; 2 та 13 – обрамлення; 3 – верхня кришка; 4 – опори; 5 – функціональний блок; 6 – ручка; 7 – задня панель; 8 – ніжки; 9 – кришка; 10 – бокові стяжки; 11 та 12 – плати; 14 – стяжки; 15 – перетворювач напруги; 16 – стабілізатор напруги; 17 – вхідне і вихідне рознімання; 18 – клавіатура

Рисунок 4.15 – Ультразвуковий імпульсивний прилад СП УК-10ПМС

Лабораторний модуль пружності при певній частоті коливання $E_{улт}$, МПа, визначають за наступною залежністю:

$$E_{улт} = \rho \cdot V^2 \cdot \kappa_ф , \qquad (4.9)$$

де ρ – середня щільність зразка, кг/м^3;

V – швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль в асфальтобетоні, м/с;

κ_ϕ – коефіцієнт, що є функцією розмірів зразка приймається згідно [5, 394].

Вид функції κ_ϕ визначається співвідношенням між довжиною хвилі λ і розмірами поперечного розрізу зразка в площині (*b* x *h*), перпендикулярній лінії прозвучування.

Величина λ в *см* встановлюється від співвідношення:

$$\lambda = T \cdot V \cdot 10^2, \tag{4.10}$$

де T – період хвилі, *с*;

μ – коефіцієнт Пуассона асфальтобетону, який залежить від температури і встановлюється згідно [5, 394].

Визначення функції релаксації асфальтобетону. Відповідно вище наведеного функцію релаксації *R(t)* згідно з визначенням встановлюють за залежністю:

$$\mathrm{R(t)} = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \tag{4.11}$$

Крім того при визначенні функції релаксації використовується метод [5, 44, 86, 394], який складається з зв'язку між функцією релаксації *R(t)*, функцією повзучості *П(t)* і модулем пружності *E(t)* при тривалості дії навантаження *t*:

$$\mathrm{R(t)} \approx {}^{1}\!\diagup\!_{\Pi(\mathrm{t})} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t)} = E(\mathrm{t}) \tag{4.12}$$

Таким чином для визначення функції релаксації використано прилад і устаткування (рис. 4.11 – 4.14), який забезпечує можливість виконання наступних операцій: проведення експериментів на визначення повзучості (прямої і зворотної (рис. 4.7)) або релаксації [86]; проведення таких експериментів при різних напруженнях, деформаціях і температурах; виконання швидкого безударного навантаження або деформування зразків; здійснення надійної реєстрації результатів вимірювань.

Повні криві релаксації та повзучості охоплюють декілька порядків часу (як правило, від 10^{-10} с до 10^{8} с). Проте існуючі прилади і апаратура, що дозволяють безпосередньо проводити випробування на повзучість і релаксацію, не можуть охопити такого широкого діапазону часу. Тому для випробувань комбіновано застосовують прилади (рис. 4.9, 4.11, 4.15) з різною можливістю реєстрації тривалості навантаження та деформації. Для визначення функції релаксації зразки виготовляють згідно п.п 4.3.2. та [5, 394].

Найбільш зручніше проводити експерименти на повзучість при прикладанні напружень з заданим часом дії навантаження $t_н$ за схемою (рис. 4.3). Одним із доступних і простих методів навантаження зразка у режимі одноразового прикладання зусиль з різним часом його дії, є навантаження за схемою рис. 4.4. На основі одержаних результатів лабораторних досліджень модуля пружності та пружніх прогинів досліджуваних асфальтобетонів при різному часі дії навантаження, та побудованих розрахункових кривих функції релаксації по виразу $R(t)=1/П(t)$, використовуючи принцип тепературно-часової аналогії [44, 86, 394].

Відповідно до (розділу 2) використовуємо, уточнену функцію релаксації у вигляді модифікованого степеневого закону, який дає достатньо точні результати обчислень:

$$\psi(t,T) = E_{дг} + \left(E_{мт} - E_{дг}\right) \cdot П(P,I,T_{роз}) \cdot \left(1 + t/\eta\right)^{-\lambda}, \qquad (4.13)$$

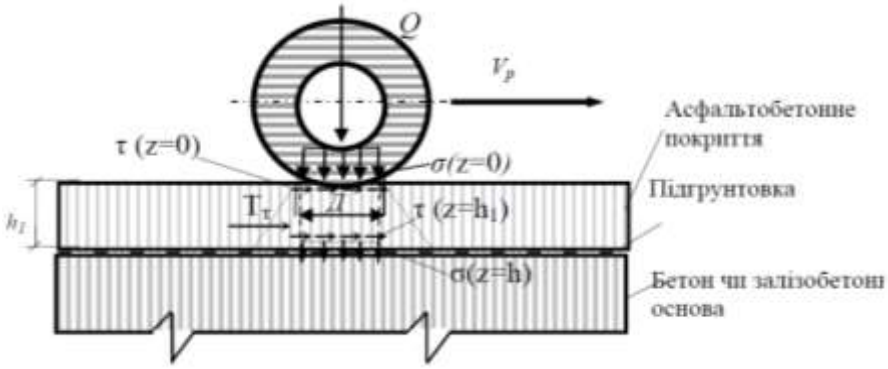
Для визначення функції релаксації матеріалу, для будь-якої температури $R(t,T)=\psi(t,T)$, достатньо знати функцію релаксації при будь-якій температурі $\psi(t,T)$ та коефіцієнт температурно-часового зміщення *a(T)*.

Залежність $a_T(T)$ від температури T встановлюється експериментально для кожного конкретного матеріалу. Отже, коефіцієнт $a_T(T)$ являє собою зсув за шкалою $\lg t$ функції релаксації, якщо $\lg\alpha=0$, то властивості матеріалу не залежать від температури. Тобто, чим більше значення $\lg\alpha$, тим сильніше змінюються властивості матеріалу зі зміною його температури.

Аналогічно визначається функція деформації $\psi_T^{Д}(t,T)$.

4.3.4 Визначення міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям і бетонною основою

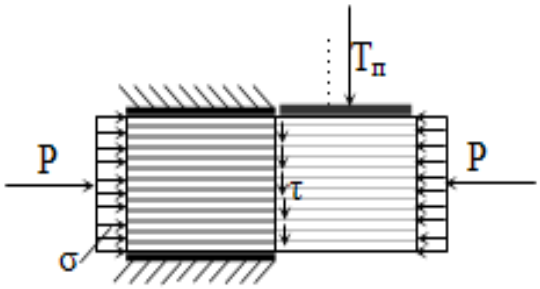
Суть даного методу полягає в оцінці зчеплення між асфальтобетонним покриттям (шарами) та бетонною основою, призначена для перевірки якості влаштування асфальтобетонного покриття. Для встановлення необхідної витрати та раціонального виду підґрунтовки (бітумної емульсії, емульсії, модифікованої полімерами, бітумів в'язких чи рідких, бітумів, модифікованих полімерами, відповідної гідроізоляції: наплавної, напиляємої, клеючої, обмазочної та ін.) між асфальтобетонним покриттям і бетонною основою. Даний метод розроблено за участю автора і реалізовано у вигляді нормативного документу [379. 453]. Отримані експериментальні результати [343, 379, 412, 415, 423, 453, 456, 457] міцності зчеплення необхідні для розрахункового методу, який запропоновано в (розділі 6). Експериментальний метод полягає у визначенні міцності зчеплення асфальтобетонного покриття при дії горизонтальних і вертикальних зусиль, що моделюють дію зовнішнього навантаження на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів при гальмуванні транспортних засобів (рис. 4.16) [456, 457].



Q – вертикальне зусилля, що створює транспортний засіб; T_T – дотичне зусилля на контакті шарів від дії транспортних засобів

Рисунок 4.16 – Схема дії зусиль від колеса транспортного засобу при його гальмуванні

Зразок випробовують за допомогою приладу, що встановлюється на плиту випробувального пресу і дозволяє за допомогою спеціального пристрою створювати напруження σ та створювати між асфальтобетонною і бетонною основою (на далі композит) напруження τ за схемою, що наведена на рис. 4.17.



P – нормальне зусилля, що діє перпендикулярно до торця зразка імітуючи вертикальне зусилля від транспорту; σ – нормальне напруження рівномірно розподіленого по поверхні торців зразка, що імітує контактний тиск від транспортного колеса; $T_П$ – дотичне зусилля, що створює випробувальний прес на контакті шарів зразка імітуючи горизонтальне зусилля від транспорту T_T (рис. 4.16); τ – дотичне напруження між асфальтобетонними шарами, що витримує зразок-керн до порушення зчеплення між ними.

Рисунок 4.17 – Схема випробувань зразків кернів на зчеплення між шарами

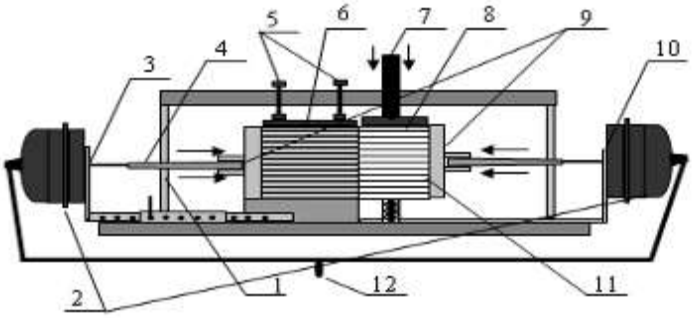
Під час випробування при різних значеннях σ визначають граничне дотичне напруження τ, за якого порушується зчеплення між шарами. Врахування особливостей впливу реологічних властивостей на міцність зчеплення на контакті

між шарами реалізується за рахунок випробування при різних режимах навантаження. Воно проводиться при швидкому режимі навантаження (швидкість переміщення траверси пресу становить 100 мм/хв) та повільному (швидкість переміщення траверси пресу становить 3 мм/хв).

При швидкому режимі навантаження моделюється екстрене гальмування транспортних засобів, а при повільному – нормальний режим гальмування. На основі результатів випробувань при визначенні граничних дотичних напружень τ обчислюють параметри f і c для відповідних режимів навантаження, що дозволяє вирахувати значення розрахунково гранично допустимого напруження $[\tau]$ між асфальтобетонними шарами для розрахункових груп автомобілів $А_1$, $А_2$ і Б [41].

Оцінку зчеплення між композиту виконують, за методикою, що наведена нижче

Засоби контролю та допоміжне обладнання. Прилад для визначення напруження τ між асфальтобетоном і бетонною основою зразка-керна визначається за допомогою приладу НТУ-ЗЧ-1 [456] (рис. 4.18).



1 – рама приладу; 2 – пневмокамери; 3 – рухомий кронштейн; 4 – наконечник; 5 – затискаючі гвинти; 6 – фіксатор; 7 – пуансон (механізм навантаження); 8 – накладна пластина; 9 – затискаючі пластини; 10 – пневматична система навантаження; 11 – зразок; 12 – манометр пневматичної системи навантаження.

Рисунок 4.18 – Схема приладу НТУ-ЗЧ-1 для визначення граничного дотичного напруження τ між асфальтобетонними шарами при випробуванні зразка-керна

Преси гідравлічні з навантаженнями від 50 кН до 100 кН ((5-10) тс) з сило вимірювачами, що забезпечують похибку не більше 2 % навантаження, яке вимірюється. Термометр хімічний ртутний скляний з ціною поділки шкали 1 º С. Термостатування зразків композитів відбувається у сушильній камері.

Порядок підготовки до проведення випробувань. Випробування проводять за найбільш несприятливої для зчеплення між композиту температури (50 ± 2) ^{o}C (на вимогу Замовника при відповідному обґрунтуванні додатково можуть проводитись випробування і при інших температурах або розраховані за методом (розділ 3) для конкретного дорожньо - кліматичного регіону). Для випробувань зразки відбирають у вигляді кернів композиту діаметром 150^{0}_{-3} мм, виготовлених на секторному пресі за [482]. На бетонну основу використовували гідроізоляційні матеріали Техноеласт-МІСТ, Ребіт, Eliminator, Welestrong AP з відповідною технологією нанесення. Граничне дотичне напруження τ між композитом зразка-керна визначається за допомогою приладу НТУ-ЗЧ-1 (рисунок 4.18), які забезпечують задані режими навантаження (таблиця 4.2).

Проведення випробування здійснювали в наступній послідовності: вимірюють діаметр зразка; зразки нагрівають до температури випробування, витримуючи їх у термошафі не менше 4-х годин; нагрітий зразок композит розміщують в приладі НТУ-ЗЧ-1, який встановлено на плиту випробувального пресу, закріплюючи фіксатором 6 за допомогою гвинтів 5; на зразок створюють горизонтальне навантаження з двох торців через пластини 9 за допомогою системи 10, яке відповідає заданому рівню напружень (таблиця 4.2); при заданій швидкості переміщення плити пресу (таблиця 4.2) навантажують зразок та визначають руйнівне вертикальне навантаження $T_{П}$, яке відповідає відліку на шкалі пресу у момент порушення зчеплення між асфальтобетонними шарами зразку-керну.

Таблиця 4.2 – Режими навантаження та необхідна кількість зразків для випробувань

Ч.ч.	Параметри режиму випробувань			Мінімальна кількість зразків для випробувань, шт.
	Навантаження		Швидкість ходу плити пресу, мм/хв	
	σ, МПа	Тиск в манометрі системи навантаження, МПа		
1	0,3	0,23	3	3
2	0,3	0,23	100	3
3	0,7	0,54	3	3
4	0,7	0,54	100	3

Обробка результатів. Отримані при заданих швидкостях навантаження і нормальних напруженнях (табл. 4.2) значення руйнівного вертикального навантаження $T_П$. Граничні дотичні напруження τ розраховуються за формулою 4.14.

$$\tau = \frac{T_П}{S} \times 10^6, \text{ МПа} \qquad (4.14)$$

де S – площа зразка, м^2.

Обчислені значення граничних дотичних напружень τ заносять до таблиць [343, 379, 412, 415, 423] та розраховують їх середнє значення. На основі експериментальних даних, обчислюють параметри f (безрозмірна величина) і c (в МПа) за формулами для кожної швидкості випробувань (3 мм/хв та 100 мм/хв, відповідно):

$$f = \frac{\tau_3 - \tau_{100}}{\sigma_3 - \sigma_{100}}; \qquad (4.15)$$

$$c' = \tau_3 - \sigma_3 \times f; \quad c'' = \tau_{100} - \sigma_{100} \times f;$$
$$c = \frac{c' + c''}{2}. \tag{4.16}$$

Обчислюють значення розрахункового допустимого граничного дотичного напруження $[\tau]$ між асфальтобетоном і бетонною основою для кожного розрахункового автомобіля відповідної групи $А_1$, $А_2$ і Б [41] та табл. 4.3 цих за формулою:

$$[\tau] = \sigma \times f + c, \tag{4.17}$$

де σ – нормальне напруження, МПа;

f – коефіцієнт тертя;

c – питоме зчеплення;

Таблиця 4.3 – Нормативні табличні дані навантаження та максимального дотичного напруження

Група розрахунко-вого наванта-ження	Розрахунковий параметр навантаження	Максимальне дотичне напруження τ_{max}, МПа	
	σ, МПа	При екстремальному гальмуванні	При повільному гальмуванні
$А_1$	0,80	0,56	0,45
$А_2$	0,60	0,42	0,32
Б	0,50	0,35	0,25

Оцінку зчеплення між асфальтобетоном і бетонною основою виконують перевіряючи умову:

$$[\tau] \geq 1{,}3 \times \tau_{max}, \tag{4.18}$$

де τ_{max} – горизонтальне дотичне напруження, що діє від навантаження на границі асфальтобетонних шарів (приймається на основі нормативних табличних даних (табл. 4.3);

[τ] – розрахункове допустиме граничне дотичне напруження (розраховується на основі отриманих результатів експериментального визначення параметрів зчеплення між асфальтобетонними шарами за виразом (4.17)). Результати випробувань зразків композитів наведено нижче.

4.3.5 Визначення глибини колії в асфальтобетоні

Цей метод встановлює порядок проведення випробувань асфальтобетону для визначення показника стійкості до накопичення залишкової деформації у вигляді колії при багатоцикловому повторному навантаженні за підвищених температур, при яких асфальтобетон знаходиться у в'язко-пластичному стані [73, 435]. Результати, що отримують при повторному багатоцикловому прикладанні рухомого навантаження в умовах підвищених температур, використовуються для оцінювання стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій при проектуванні складу асфальтобетону підвищеної стійкості до накопичення залишкових деформацій. Останнім часом при експериментальній оцінці стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій почали надавати перевагу методам випробувань які полягають у безпосередній дії коліс, імітуючи реальні умови роботи його в покритті при поступовому накопиченні залишкових деформацій від циклічного впливу навантаження. Ці методи випробування позитивно зарекомендували себе в багатьох країнах світу, зокрема, в країнах ЄС такі методи входять в процедуру проектування асфальтобетону [487], а в США – в процедуру проектування дорожніх одягів за методом Super Pave (AASHTOT 324-14. Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA)).

Даний метод розроблений за участю автора і стандартизований [460, 482] для застосування при будівництві, реконструкції, ремонті, утриманні асфальтобетонного покриття автомобільних доріг загального користування і

мостів та удосконалений в дисертаційній роботі, який представлено нижче [342, 425, 436]. Даний метод обґрунтовано в роботах автора [5, 342, 424, 425, 436, 488]. Метод базується на Гамбурзькому методі з певними вдосконаленнями і полягає у випробуванні на стійкість до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії зразка асфальтобетону при підвищених температурах шляхом циклічного його навантаження через випробувальне колесо (огумлене) з урахуванням вимог [487, 489, 490] та AASHTO T 324.

Тобто при випробуванні визначається глибина колії в зразку при різних температурах і навантаженнях як основна складова параметра опору накопиченню деформації під дією повторювальних навантажень.

Асфальтобетонний зразок у формі розташовують на рухомій платформі, що здійснює зворотно-поступальний рух. На зразок встановлюють спеціальний навантажувальний пристрій у вигляді випробувального колеса та пристрій для вимірювання глибини колії. Випробування здійснюються шляхом повторного прокочування завантаженого колеса по поверхні підготовленого зразка при заданій температурі з послідуючим вимірюванням глибини колії як характеристики стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій. Основний критерій при випробуванні, кількість циклів має бути такою, щоб зразок не вступав в фазу руйнування, тому що в реальних умовах роботи асфальтобетонне покриття працює на накопичення пластичних деформацій. Тому з урахуванням аналізу робіт (розділ 1) [73, 488], для лабораторних випробувань граничним критерієм глибина колії в асфальтобетонному зразку повинна бути не більше 5 мм при умові проходження огумленого колеса по зразку при відповідному навантажені та температурі. Приготування зразків із асфальтобетону. Зразки виготовляються на секторному пресі [457, 482] (рис.4.19), що відтворює умови ущільнення асфальтобетону середнім та важким котками. Секторний прес складається із шафи 1, у якій по напрямним 2 рухається візок 3 з встановленою на ньому металевою формою 4, що дозволяє створювати зразки з розмірами в плані 230х160 і товщиною до 150 мм.

Візок приводиться в рух двигуном-редуктором з маховиком за допомогою тяги 14.

Ущільнення суміші в металевій формі здійснюється сектором 8, шарнірно прикріпленим у його центрі до балки 5. Протилежний кінець балки шарнірно з'єднаний з кронштейном 6, укріпленим у шафі. Підйом і опускання важеля з сектором здійснюється за допомогою різьбової гайки 7, яка переміщується гвинтовою передачею 16. На балці встановлений рухомий вантаж рухомий 10, вага якого розрахована за умови забезпечення необхідного питомого тиску на контакті між сектором 8 і поверхнею суміші при її ущільненні, що відповідає дорожніх котків. Частота проходів сектору регульована і становить 10, 30 циклів за хвилину при амплітуді, переміщення візка із сумішшю, що дорівнює довжині зразка.

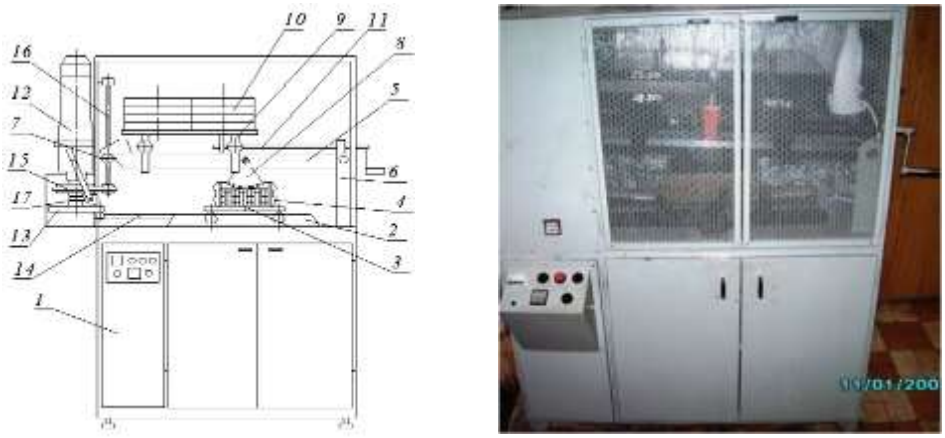


Рисунок 4.19 – Схема та загальний вид секторного пресу для виготовлення зразків асфальтобетону

Для наукових досліджень виготовляли зразків-плит з асфальтобетонних сумішей різної гранулометрії (додаток Б), що виготовлялись в лабораторних умовах, а також були взята з проб сумішей, які відібрані на змішувальних установках АБЗ, та відібраних на об'єктах будівництва. Результати фізико-механічних властивості бітумних в'яжучих та асфальтобетонів наведені в додатку Б.

Форму для виготовлення зразків-плит нагрівали у сушильній шафі при температурі нагріву асфальтобетонної суміші, згідно з [142, 449, 451, 452, 481]. У нагріту форму засипають необхідну кількість суміші, вага якої в середньому становила від 4,5 кг до 5 кг. Температуру суміші, що укладається у форму, визначалась за [142, 449, 451, 452, 481] в залежності від марки в'яжучого, використаного для її виготовлення. Суміш рівномірно розподіляють у формі штикуванням нагрітим ножем, знімаючи її надлишок. Форму із засипаною і розрівняною по площі сумішшю встановлювали на візок у робочу камеру секторного пресу (рис.4.19).

У загальному випадку на початку ущільнення необхідно створювати невеликий рівень навантаження для попередньої прикатки суміші та встановлювати кількість навантажень при яких наступає стабілізація щільності (рисунок 4.20). Після цього збільшують навантаження і знову визначають кількість циклів до стабілізації щільності. Щільність асфальтобетону із збільшенням величини навантаження буде збільшуватись до певної величини. Далі із збільшенням навантаження може відбутися зменшення щільності внаслідок руйнування зерен кам'яного матеріалу (рисунок 3.4).

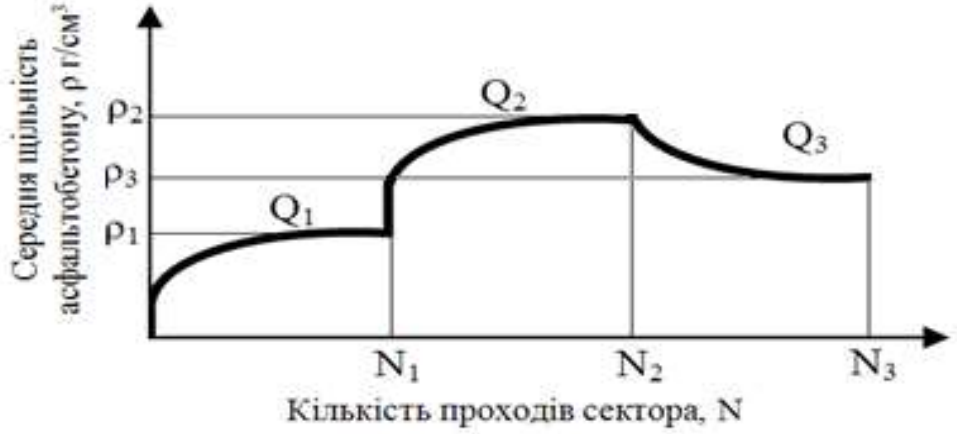


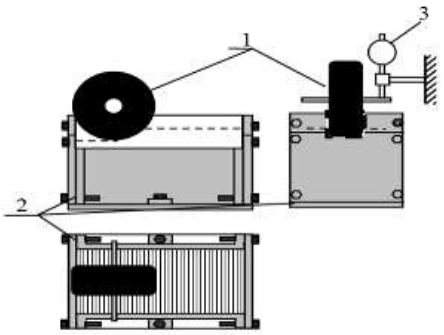
Рисунок 4.20 – Зміна щільності асфальтобетону від величини навантаження

Завдання підбору режиму ущільнення полягає у тому щоб підібрати таку послідовність та кількість навантажень щоб отримати максимальну її щільність

без дроблення зерен мінеральних матеріалів. Тому на поверхню суміші, після попередньої прикатки встановлювався укочуючий сектор, на який прикладали необхідне навантаження близьке до навантаження, що діє на асфальтобетон при ущільненні його котком. При цьому лінійний тиск на поверхню укочуваної плити може змінюватися від 28 кН/см до 84 кН/см [483].

Укочування здійснювалось у дві стадії. На першій укочення виконується 20 проходами сектору з лінійним тиском, що дорівнює 28 кН/см (2,8 кг/см^2). Після цього навантаження збільшується таким чином, щоб лінійний тиск зростав до 84 кН/см (8,4 кг/см^2) і виконується ще 30 проходів секторного котку. Кількість проходів та лінійний тиск при ущільненні сумішей різної гранулометрії трохи корегувався [483]. Ущільнення усіх досліджуваних асфальтобетонів зразків-плит проводили до одержання коефіцієнта ущільнення не менш 0,98.

По закінченні ущільнення форма охолоджувалась до температури нижче за +60°С, розбиралась і виймався зразок, який підлягав випробуванню на колійність через добу після приготування, його розташовують на рухомій платформі секторного пресу, на якому додатково встановлюють спеціальний навантажувальний пристрій у вигляді огумленого, вузького колеса та пристрій для вимірювання глибини колії. Фізична модель для визначення показника стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій. Випробування зразків (додаток Б) на стійкість до накопичення залишкових деформацій виконували на секторному пресі [482], переобладнаному таким чином, що замість сектору 8 (рис.4.19) встановлюють металеве, огумлене чи пневматичне колесо та встановлюється пристрій для вимірювання глибини колії (рис.4.21). Технічні дані методу проведення випробування на колієутворення наведені в таблиці 4.4.



1 – металеве, огумлене, пневматичне колесо; 2 – металева форма; 3 – датчик деформацій

Рисунок 4.21 – Схема пристрою для проведення випробування асфальтобетону на стійкість до накопичення залишкових деформацій

Тиск від колеса на асфальтобетонний зразок повинен бути постійним і визначається за номограмою (рис. 4.22) або лінійними залежностями (4.19) для огумленого $p(Q)_{\text{огум.}}$ для металевого $p(Q)_{\text{мет.}}$, та пневматичного $p(Q)_{\text{пневм.}}$ колеса наведено на (рис. 4.22).

Таблиця 4.4 – Технічні дані методу проведення випробування на колієутворення

Показники (умови)	Технічні дані
Огумлене колесо	Відповідно ГОСТ 7338
Розмір колеса: діаметр, мм ширина, мм	 205,0 ± 1 47,0 ± 0,02
Розмір асфальтобетонного зразка: длина *L*, мм ширина *b*, мм	 228 ± 2 158 ± 2
Товщина зразка *H*, мм	60
Навантаження на колесо Q, кг	40 ± 10; 60 ± 10; 80 ± 10; 100 ± 10; 120 ± 10; 140 ± 10
Кількість проходів N_n навантаження в хвилину	10±2; 32±2
Час дії навантаження на зразок: при кількості проходів 10 за хвилину, с при кількості проходів 32 за хвилину, с	 0,50 с 0,15 с
Кількість N_K проходів навантаження після, яких знімається залишкова деформація	0; 250; 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 7000; 8000; 9000; 10000
Температура випробування T_{max}, °С	40 ºС (±1 ºС); 50 ºС (±1 ºС); 60 ºС (±1 ºС)

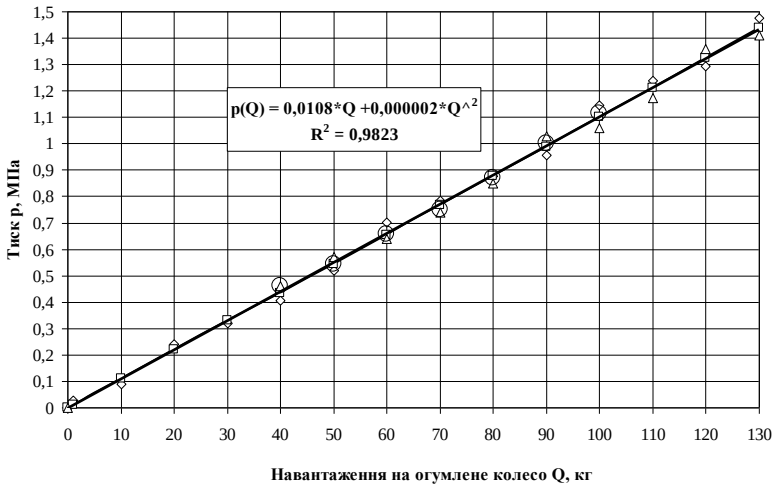


Рисунок 4.22 – Номограма для встановлення тиску в залежності від навантаження металевого, огубленого та пневматичного колеса

$$p(Q) = 0{,}0108 \cdot Q + 0{,}000002 \cdot Q^2; \qquad (4.19)$$

У відповідності [41, 380, 424, 425, 482] рівень питомого тиску на зразок повинен відповідати конкретній категорії автомобільних доріг [41], на якій буде влаштоване асфальтобетонне покриття даного матеріалу, що досліджується (додаток Б): для доріг I, II категорії – 0,8 (0,9) МПа; для доріг III, IV категорії – 0,6 МПа. Дані тиски 0,8 МПа, 0,6 МПа будуть еквівалентні навантаженню на колесо розрахункового автомобіля групи A_1 - $Q_{розр}$=*57,5 кН,* та A_2 - $Q_{розр}$=*50, кН.* Час дії навантаження на асфальтобетонний зразок в залежності кількість проходів N_n навантаження в хвилину (табл. 4.4) визначено за методикою, яка наведена в додатку Б та степеневою залежністю

$$t_н(N_n) = C \cdot N_n^{-D} \qquad (4.20)$$

де $t_н(N_n)$ – час дії навантаження на зразок, с;

C, D – параметри встановлюються експериментально за допомогою тензометрії або теоретично (додатку Б)(A=4,0222, B = 0,9252) [491].

Перед початком випробувань форму разом з асфальтобетонним зразком поміщали у сушильну шафу з відповідною для випробування температурою повітря всередині (згідно таблиці 4.4) і витримували у ній протягом 3 год. Температуру повітря у шафі секторного пресу також встановлюють відповідною для випробування згідно таблиці 4.4. Після нагрівання у сушильній шафі, зразок разом з формою встановлюють на візок 3 секторного пресу (рис 4.19).

На поверхню зразка за допомогою гвинтової передачі балки 7 встановлюється огумлене колесо (рис. 4.21) і знімається з датчика деформації 3 початковий відлік на поверхні зразка. За допомогою гвинтової передачі навантаження 11 встановлюється необхідне для випробування навантаження 12 (табл. 4.4, рис. 4.21) та відразу вмикається двигун-редуктор, що приводить в зворотно-поступальний рух візок із закріпленою на ньому формою з асфальтобетонним зразком. Таким чином здійснюється циклічне навантаження зразка асфальтобетону даним колесом при заданому навантаженні та температурі. Після виконання встановленої кількості проходів N секторний прес зупиняють і вздовж траєкторії навантаження асфальтобетонного зразка, вимірюється глибина колії w за схемою (додаток Б) та встановлюється її середнє значення $\hat{w}$. На основі таких вимірювань будується графік функції $\hat{w}$=f(N). Кут нахилу [487] кривої колієутворення (WTS_{AIR}), в мм на 10^3 циклів навантаження, визначається за формулою:

$$WTS_{AIR} = \frac{w_{10000}^{експ} - w_{10000}^{експ}}{5} \qquad (4.21)$$

де $w_{5000}^{експ}$, $w_{10000}^{експ}$ – глибина колії після 5000 та 10000 циклів навантаження в міліметрах.

Пропорційна глибина колії (%) після 10000 циклів (PRD_{AIR}) визначається за формулою:

$$PRD_{AIR} = 100 \times \sum_{k=1}^{3} \frac{(w_{fk}^{експ} - w_{0k}^{експ})}{(3 \times h)} \quad (4.22)$$

де $w_{fk}^{експ}$ – деформація в точці після 10000 циклів, мм;

$w_{0k}^{експ}$ – початковий вимір в точці;

h – товщина зразка, мм.

На основі отриманих результатів визначають інтегральний показник стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону як суму площ під графічними залежностями $h_{i,j}^{\text{експ}} = f(N)$

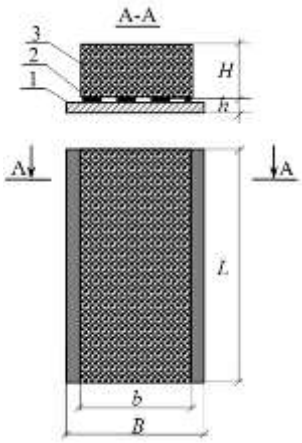
$$S_h^{\text{експ}} = \sum_{k}^{i=1} \sum_{n}^{j=1} \int_{0}^{N_k} h_{i,j}^{\text{експ}}(N)\text{dN}, \quad (4.23)$$

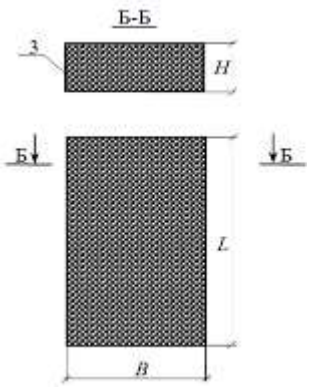
де i – порядковий номер рівня навантаження;

j – порядковий номер рівня температури випробування.

4.3.6 Визначення коефіцієнту бокового деформування асфальтобетону

Відповідно до розділу (розділ 2, 3) необхідно визначити коефіцієнт бокового деформування для отриманого теоретичного рівняння колієутворення. Тому методу полягає у випробуванні на стійкість до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонному зразку-плиті (рис. 4.23, 4.24), при підвищених температурах шляхом циклічного його навантаження через випробувальне колесо згідно (п. 4.3.5). Даний метод знайшов практичне застосування у нормативних документах [344, 354].





1 – металева основа; 2 – прошарок тальку; 3 – досліджуваний асфальтобетонний зразок

Рисунок 4.23 – Зразок-плита № 1 Рисунок 4.24 – Зразок-плита № 2

Розміри зразка-плити№1 (рис. 4.23) наступні: довжина L= 228 ± 2 мм; ширина b=138 ± 2 мм; товщина зразка Н= 60мм, а розміри для зразка-плити № 2 (рис. 4.24) згідно (табл. 4.4).

Послідовність виготовлення зразка-плити складається з таких операцій: У форму секторного пресу [344, 354], нагріту до робочої температури, відповідно до 21.8.5 ДБН В 2.3-4 або програми випробувань, укладається металевий лист [344, 354]. На поверхню листа наноситься тонкий шар тальку з витратою приблизно 1-2 г/см^2. Засипають необхідну кількість досліджуваної асфальтобетонної сумішей (визначають залежно від необхідної товщини зразка) згідно [142, 451, 452], так щоб товщина зразка становила 2,5 розмірів максимального зерна. Ущільнюють асфальтобетонну суміш за допомогою секторного пресу згідно (п. 4.3.5). У зразку-плиті за допомогою каменерізного приладу обрізують з обох сторін краї згідно вимог (рис. 4.23). зразок розташовують у формі секторного пресу таким чином, щоб між краями зразка-плити № 1 (табл. 4.23) та стінками форми був зазор шириною рівною (1±0,5) см; зразок-плита № 2 виготовляють у відповідності пункту п. 4.3.5 та вимог згідно таблиці 4.4 (рис. 4.24). Випробування «зразка-плити №1» та «зразка-плити №2» за показником стійкості залишкової деформації здійснюють згідно (п. 4.3.5) при температурі 50 °С і навантаженні на колесо 700 Н або тиску 0,8 МПа згідно таблиці 4.4 (рис.4.22). Коефіцієнт пластичного бокового

деформування асфальтобетону визначали за розробленим методом, що передбачає використання коліємірa і визначається за залежністю:

$$K_к = \frac{h_{бу}}{h_н} \le 1, \qquad (4.24)$$

де $h_{бу}$ – глибина колії у зразку-плиті № 1, та № 2 через 4000 проходів для зразків-плит, що мають боковий упор (згідно таблиці 4.4 та п. 4.3.5);

$h_н$ – нормативне значення глибини колії в яких деформація у поперечному напрямку не перешкоджається.

4.3.7 Визначення функції колієстійкості асфальтобетону

Розроблено експериментальний метод визначення виду функції, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів, та її параметри, а також експериментальний параметр, що відображає вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді колеса. Він полягає у використанні секторного пресу для створення зразків, що імітують конструкцію асфальтобетонного покриття мостів із залізобетонною плитою із застосуванням певної комбінації внутрішніх факторів.

Вихідною інформацією про деформаційні властивості асфальтобетону при вивченні стійкості до накопичення залишкових деформацій, є результат випробування на колієстійкість при зростаючій кількості проходів огумленого колеса по одному сліду при постійному навантаженні та постійній температурі T згідно (п. 4.3.5) . При цьому залежність кількості проходів колеса N^* до граничного значення, інтегрального показник стійкості до накопичення залишкових деформацій S_{w_σ} асфальтобетонному разку від напруження та температури T (рис.4.25):

$$N^* = N^*\left(S_{w_\sigma}, T\right), \qquad (4.25)$$

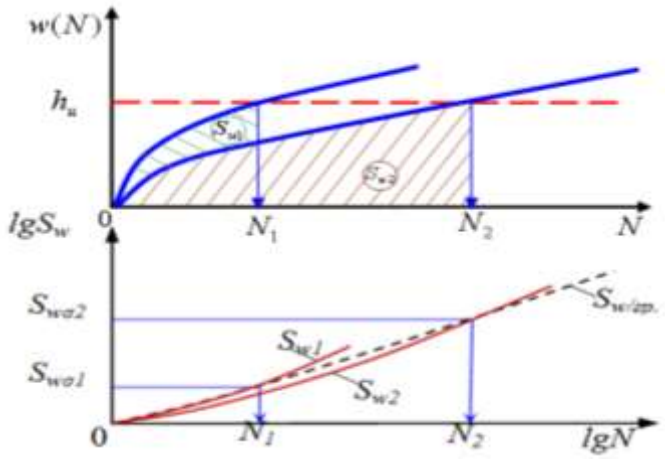


Рисунок 4.25 – Характер граничного значення, залежності функції інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій в асфальтобетоні від кількості проходів колеса при відповідному навантажені та температурі

Пропонується описати функцію колієстійкості у вигляді степеневої залежності:

$$N^*\left(S_{w_\sigma},T\right)=A_\tau(T)\times S_{w_\sigma}{}^{-a_\tau(T)} \qquad (4.26)$$

де N^* – кількість прходів колеса до граничного значення інтегрального показник стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетонному разку S_w при відповідній дії напруження σ;

A_τ і a_τ – експериментальні параметри.

Для виконання розрахунків асфальтобетонного покриття на стійкість до колієутворення необхідно встановити експериментальні параметри функції колієстійкості. Для випробувань виготовляють асфальтобетонні зразки розмірами відповідно до (п. 4.3.5) та (табл 4.4), При визначенні інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій в асфальтобетонному разку використовують вищенаведена методика (п. 4.3.5). та обладнання секторного

пресу (рис. 4.21). Зразки перед випробуванням термостатують при температурі +50 ^{o}C не менше чотирьох годин.

Порядок проведення випробувань такий. Зразок плиту розміщують у секторному пресі (рис. 4.19) і установлюють індикатор годинникового типу і фіксують відмітки так звані нульові точки за схемою згідно з (рис. 4.21). Наверх зразку установлюється огумлене колесо (таблиця 4.4) на зразок з навантаженням, яке викликає напруження на контакті σ_1 (4.19), (рис. 4.22). При граничному значенні інтегрального показник стійкості до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонному зразку $S_{w_{\sigma 1}}$ відповідно до (рис.4.25) фіксують кількість проходів колеса N_1. випробування проводять при іншому навантаженні σ_2, і визначають граничне значення інтегрального показник стійкості до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонному зразку $S_{w_{\sigma 2}}$ та фіксують кількість проходів колеса N_2.

Параметри функції коліємтійкості A_τ та a_τ обчислюють за формулами:

$$a_\tau = \lg\frac{N_1}{N_2} \Big/ \lg\frac{S_{w_{\sigma 2}}}{S_{w_{\sigma 1}}}. \qquad (4.27)$$

Визначення параметрів здійснюють при випробуванні зразків на інтегральний показник стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій при зростаючій кількості проходів колеса по одному сліду з постійним навантаженням і має такий вигляд:

$$S_w = N_{1,2} \cdot h_{\text{г}} \qquad (4.28)$$

де N_1, N_2 – кількість прходів колеса до граничного значення глибини колії $w_{\text{г}}$ при відповідному навантаженні σ_2 σ_1;

$h_г$ – граничне значення глибини колії в асфальтобетоні, рівне $W_н$.

За певну кількість проходів

$$B_\tau(T) = N_1 \times S_{W_{\sigma_1}}{}^{a_\tau(T)}. \quad (4.29)$$

4.3.8 Визначення параметрів поперечного профілю асфальтобетонного покриття та загальної глибини колії

Загальні положення та опис стендового обладнання. В роботі в якості стендового обладнання використано кільцевий стенд ДНТЦ «Дорякість». Конструкція стенду являє собою стенд який дозволяє змінювати товщину асфальтобетонного покриття на різних основах як приклад жорстка основа (цементобетонна бетонна). Відповідно (п. 4.1.2) визначення температури в полосі накату та інтенсивності накопичення залишкових деформацій у вигляді колії в асфальтобетонному покритті на мостах скористаємось кільцевим стендом ДНТЦ «Дорякість» філії укравтодору [475, 492].

Проведення експериментальних досліджень на реальних мостах є трудомістким та вартісним процесом, а в деяких випадках і неможливим. Причина полягає у складності варіювання змінними факторами (конструкція асфальтобетонного покриття, товщини, температурний режим, навантаження), тому більш раціональним методом є використання лабораторного та стендового обладнання з обов'язковим контролем певних параметрів на натурних об'єктах. В лабораторних умовах є можливість оцінити вплив великої кількості різних факторів на інтенсивність колієутворення, особливо це стосується різних типів та видів асфальтобетону згідно (розділу 5) [4, 342, 424, 425, 436, 460, 482, 487 – 490]. Виконання стендових досліджень дозволить більш реально відтворити фізичну картину утворення (формування) колії для різних конструкцій асфальтобетонного покриття на мостах. Припущення про можливість відтворення умов застосування стендів для оцінки вивчення інтенсивності утворення колії в асфальтобетонному

покритті на бетонних основах та мостах наведено в розділі 1 та роботах [475, 44, 86, 414, 492]. Випробування асфальтобетонного покриття на кільцевому стенді [475, 44, 86, 492] полягають у створенні статичного або динамічного навантаження за допомогою електромобілів та у спостереженні за напружено-деформованим станом покриття шляхом вимірювання переміщень, деформацій та напружень в них в умовах, наближених до роботи дорожнього покриття на автодорожньому мосту під дією кліматичних факторів та транспорту. Транспортне навантаження на дорожнє покриття створюють за допомогою електромобілів [475, 492], що здатні передавати розрахункові навантаження згідно [41, 356].

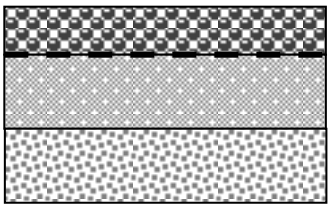
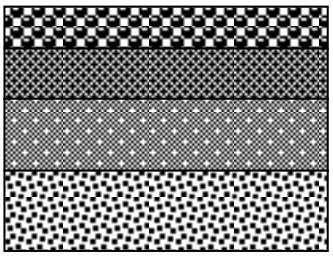
Кільцевий стенд обладнаний автоматизованою системою управління, призначеною для керування рухом електромобілів та реєстрації даних від сигналів первинної апаратури, збереження та відображення їх у табличному або графічному вигляді. Первинну апаратуру розташовують на дорожньому покритті для вимірювань наступних фізичних величин: вертикальних прогинів дорожнього покриття; горизонтальних відносних деформацій у шарах дорожнього одягу; температури повітря, асфальтобетонного покриття.

Крім того, визначають залишкові деформації в дорожньому одязі, параметри колійності, зміни товщини шарів та момент порушення суцільності монолітних шарів (тріщиноутворення).

Кільцевий стенд знаходиться у II дорожньо-кліматичній зоні [475] Випробування асфальтобетонного покриття на стенді проводили влітку під впливом високих літніх температур повітря та сонячної радіації. В залежності від програми досліджень регулюють розташування електромобілів по ширині кільцевої доріжки таким чином, щоб забезпечити заданий розподіл проходів коліс у межах смуги накату. Поперечний похил покриття на стенді для зменшення дії на нього зсувних сил, що виникають при русі електромобілів, прийнято рівним 40 ‰. Швидкість руху електромобілів під час випробувань встановлюється у відповідності з програмою експерименту, але не більшою ніж 20 км/год [414, 475, 492].

За участю автора розроблено нормативний документ [475] з методу випробування різних конструкцій дорожнього одягу (асфальтобетонного покриття) на кільцевому стенді, а також запропоновано концепцію по модернізації кільцевого стенду [492]. Особливості підготовки кільцевого стенду до випробувань дорожнього покриття наведені в стандарті [475]. Для досліджень використовували такі конструкції, які знайшли практичне застосування на автодорожніх мостах і наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Конструкції експериментального дорожнього одягу

№ п/п	Конструкція дорожнього одягу	Назва матеріалу та товщина шару в см
1 (сектор II - I створ)		Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі нафтовому дорожньому БНД 60/90 h = 6 см; Геосинтетичний матеріал Шар основи, цементобетон класу В40, h = 20 см; Щебенево-піщана суміш С5, h = 18 см; Ґрунт земляного полотна – суглинок пилуватий
2 (сектор II - II створ)		Щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 на бітумі модифікованому полімером БМП 60/90-52, h = 6 см; Асфальтобетон щільний, дрібнозернистий (максимальна крупність мінеральних зерен до 20 мм), тип А, марки І на бітумі БНД 60/90, h = 6 см; Шар основи, цементобетон класу В40, h = 20 см; Щебенево-піщана суміш С5, h = 18 см; Ґрунт земляного полотна – суглинок пилуватий

Порядок проведення випробувань на покритті конструкції дорожнього одягу. Стан асфальтобетонного покриття оцінюється візуально за видами і величиною деформацій, що виникали на асфальтобетонному покритті даної конструкції кільцевого стенду (табл. 4.5) в результаті руху електромобілів згідно з [475]. Оцінку деформацій виконували після встановленої кількості проходів електромобілів. При цьому фіксувався початок пластичних деформацій та процес їх розвитку на різних секціях стенду згідно з таблицею 4.5. Зовнішній вигляд покриття на кожній секції дорожнього одягу фіксувався за допомогою цифрового фотоапарату.

Обробка результатів випробування полягала у візуальному огляду, після чого заносились до електронної бази даних, для аналізу роботи конструкції дорожнього одягу у процесі випробувань.

Визначення параметрів поперечного профілю верхнього шару асфальтобетонного покриття. Вимірювання параметрів поперечного профілю дорожнього покриття виконують після встановленої кількості проходів по коліях руху електромобілів у контрольних створах за допомогою триметрової рейки і металевої лінійки з міліметровими поділками [414].

Засоби вимірювання та допоміжне обладнання [475]: рейка дорожня універсальна; лінійка металева з міліметровими поділками; репери (дюбель-цвях, довжиною 5 см; стійки металеві, висотою 120 мм, діаметром 20 мм.

Порядок підготовки до проведення випробувань

До початку випробувань конструкцій дорожнього одягу на кожному з контрольних створів на покритті визначають місце встановлення триметрової рейки. Для цього виконують кілька обертів електромобілів до появи на поверхні покриття сліду від їх проходів і намічають місця встановлення триметрової рейки, які фіксують закладкою реперів, що забивають у покриття (рис. 4.26).

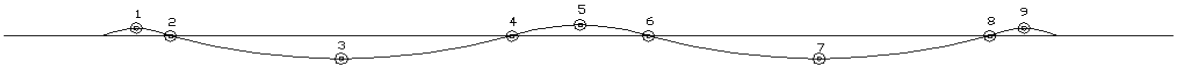


Рисунок 4.26 – Схема вимірювання поперечного профілю у створі на одній з колій

Виміри поперечного профілю у створі (рис. 4.26) виконують у дев’яти точках: під центром шин (3, 7), по краях шин (2, 4, 6, 8) та посередині між ними (5), включаючи зону здимань з обох сторін (1, 9). Відстані від поверхні покриття до верхньої грані триметрової рейки виміряють з точністю до 1 мм.

Результати вимірювань заносили до робочого журналу, в якому на початку руху електромобілів, опівдні та після закінчення руху фіксують температуру на поверхні покриття та погодні умови у день випробувань.

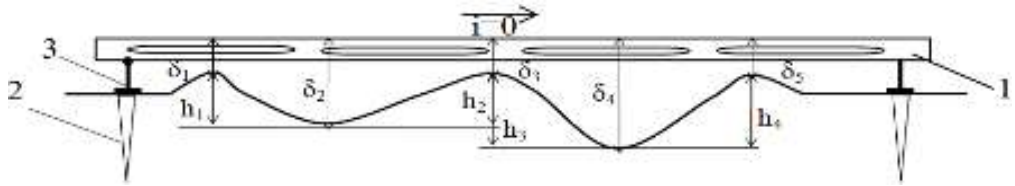
Встановлюють рейку за допомогою стійок на репери в горизонтальне положення згідно рис. 4.27.

Рейку потрібно виводити в положення нульового поперечного ухилу проїзної частини конструкції дорожнього одягу (горизонтальне положення) за допомогою підставних стійок. За допомогою металевої лінійки, яка встановлюється вертикально біля рейки, проводять вимірювання колії з точністю до 1 мм згідно (рис. 4.27): параметри одного найбільшого – δ_2, δ_4 і двох (трьох) найменших – δ_1 і δ_3, δ_5 просвітів під рейкою (рис.4.27) за допомогою металевої лінійки, яку встановлюють вертикально; при відсутності здимань величини δ_1 і δ_3, δ_5 вимірюють на виході із колії, визначається візуально.

В процесі вимірювань заповнюють журнал, в який заносять отримані результати відповідно до [475].

При оцінці параметрів внутрішньої колії вимірювання виконують в тих самих створах, в яких виконували вимірювання зовнішньої колії.

Величина найбільшої колії на кожному створі записується у журнал. Форма журналу з прикладом заповнення приведена в [475].



1 – рейка; 2 – репер; 3 – стійка

Рисунок 4.27 – Схема вимірювання параметрів поперечної рівності проїзної частини на кільцевому стенді

Обробка результатів випробування. Результати вимірювань величини колії з робочого журналу переносять до електронної бази даних, фіксують і в подальшому використовують при побудові графіків росту колії на кожному контрольному створі та аналізі коліємкості кожної з конструкцій дорожнього одягу (табл. 4.5), що проходить випробування. В кожному створі визначають

значення розрахункової глибини колії. Обчислюють сумарну нерівність поверхні проїзної частини в кожному створі по зовнішній колії (рис. 4.27) за формулами:

загальна глибина колії по відношенню до лівого здимання покриття

$$h_1 = \delta_1 - \delta_2, \tag{4.29}$$

загальна глибина колії по відношенню до правого здимання покриття

$$h_2 = \delta_2 - \delta_1, \tag{4.30}$$

Обчислюють сумарну нерівність поверхні проїзної частини конструкції дорожнього одягу в кожному створі по внутрішній колії (рис. 4.27) за формулами:

загальна глибина колії по відношенню до лівого здимання покриття

$$h_3 = \delta_3 - \delta_4 - h_2, \tag{4.31}$$

загальна глибина колії по відношенню до правого здимання покриття

$$h_4 = \delta_4 - \delta_5, \tag{4.32}$$

Визначення середнього значення загальної (сумарної) нерівності обчислюють за формулами:

$$\overline{h}'_{1,2,3,4} = \frac{\sum_{i=1}^{n} h_{1,2,3,4}}{n}, \tag{4.33}$$

де h_1 – загальна глибини колії по відношенню до лівого здимання покриття;

h_2 – загальна глибини колії по відношенню до правого здимання покриття;

h_3 – загальна глибини колії по відношенню до лівого здимання покриття;

h_4 – загальна глибини колії по відношенню до правого здимання покриття,

n – кількість вимірювань на ділянці.

Розрахункове значення загальної нерівності поверхні покриття кільцевого стенду, співставлення з оціночною шкалою, обчислюють за формулами:

$$h'_{1,2,3,4\,роз} = \bar{h}'_{1,2,3,4} + t \cdot \sigma'_{1,2,3,4}, \tag{4.34}$$

де $\bar{h}'_1$, $\bar{h}'_2$, $\bar{h}'_3$, $\bar{h}'_4$ – середнє значення сумарної (загальної) нерівності для кожного випадку визначення загальної глибини колії по відношенню до лівого (правого) здимання покриття (h_1, h_2, h_3, h_4);

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3, \sigma'_4$ – середньоквадратичне відхилення загальної нерівності поверхні покриття обчислюють;

t – коефіцієнт нормативного відхилення, що залежить від гарантованої вірогідності (приймають рівним 1,04).

Середнє значення загальної глибини колії по відношенню до лівого та правого здимання покриття визначається за залежністю:

$$w_{i,j}(N) = \frac{h'_{1роз}(N) + h'_{2роз}(N)}{2} \quad \text{та} \quad w_{i,j}(N) = \frac{h'_{3роз}(N) + h'_{4роз}(N)}{2} \tag{4.35}$$

На основі таких вимірювань будується графік функції $w = f(N)$.

На основі отриманих результатів визначають інтегральний показник стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону як суму площ під графічними залежностями $w_{i,j} = f(N)$:

$$S_w = \sum_{k}^{i=1} \sum_{n}^{j=1} \int_0^{N_k} w_{i,j}(N) dN \le [S^н], \tag{4.36}$$

де i – порядковий номер рівня навантаження;

j – порядковий номер рівня температури випробування;

$[S^n] = h_{Г.Д} \cdot Nк$ – нормативне значення;

$h_{Г.Д}$ – граничне значення колії приймається згідно (розділ 3).

4.4 Результати експериментальних досліджень асфальтобетону

4.4.1 Відповідно (п 4.1.1) проведено обстеження асфальтобетонного покриття на Південному мостовому переході (ПМП) в напрямку руху Борисполя (рис. 4.28). Результати обстеження наведені в таблиці 4.6.

а – ліва полоса накату; б – права полоса накату; 1– колія до 10 мм; 2 – колія понад 35 мм на естакаді Південного мостового переходу через річку Дніпро в місті Києві

Рисунок 4.28 – Повздовжня колія

З аналізу результатів (табл. 4.6) можна зробити висновок про те, що інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті на ПМП в напрямку руху Борисполя по правій полосі накату вже в 2005 році становила 5,6 мм, а в 2014 році 48 мм це свідчить про інтенсивність утворення колії в два рази через кожні три роки, а також така тенденція спостерігається на лівій полосі накату і становить 2,7 мм в 2005 році та в 2014 році 22 мм. Така велика різниця глибини колії на асфальтобетонному покритті на правій та лівій полосі в 2.2 рази у зв’язку

з тим, що на правій полосі сконцентровані великовагові транспортні засоби, а на лівій полосі рухаються легкові транспортні засоби.

Таблиця 4.6 – Результати інтенсивності утворення колії в асфальтобетонному покритті на ПМП в період експлуатації

Роки експлуатації	Глибина колії в асфальтобетонному покритті на естакадній частині Південного мостового переходу через р. Дніпро w, мм				Існуюча конструкція дорожнього одягу, що влаштована при капітальному ремонті проїзної частини ПМП у 2002 р
	Напрямок руху транспортних засобів				
	Бориспіль		Московська площа		
	ліва полоса накату (1)	права полоса накату (2)	ліва полоса накату (3)	права полоса накату (4)	
2002	0	0	0	0	полімер асфальтобетон Тип Б-20 – 5,0 см полімер асфальтобетон Тип Б-10– 3,0 см полімер асфальтобетон тип Г – 3 см наплавна полімербітумна гідроізоляція залізобетонна плита проїзної частини
2005	2,7	5,6	1,5	3	
2008	5,5	11,2	3	6	
2011	11	23	6	12	
2014	22	48	12	24	

Саме з цієї сторони сходить сонце і покриття інтенсивніше прогрівається ніж зі сторони в напрямку руху Московської площі. Тому і глибина колії менша 1,8 рази на лівій та правій 2 рази полосі. Виміряна інтенсивність руху по ПМП транспортних засобів становить 90 тис авт/добу. По цим даним (таблиця 4.6) можна оцінити зміну відносної глибини в асфальтобетонному покритті на ПМП від років його експлуатації, що наведено на рис. 4.29.

Із графічної залежності видно, що на правій полосі накату (2) в напрямку Борисполя відносна глибина колії в покритті перевищує граничне значення, яке дорівнює одинці через 5,5 років, що не відповідає нормативному строку 7 років, а на полосі (4) становить 8,1 рік на полосі (1) 8,5 років та полосі (3) становить 11 років, що перевищує нормативний строк. Це свідчить про необхідність застосування ремонтних заходів відповідно до (розділ 6).

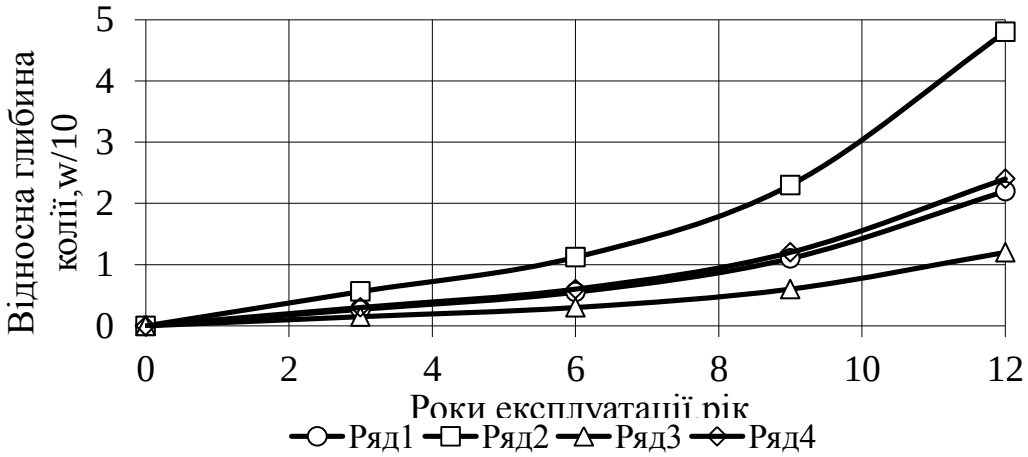


Рисунок 4.29 – Залежність відносної глибини колії в асфальтобетонному покритті від років його експлуатації (табл. 4.6)

Результатів колійності асфальтобетонного покриття на автодорожнім мостах України наведені в таблиці 4.7 та рис. 4.30 використанні при науковому дослідженні за участю автора [474].

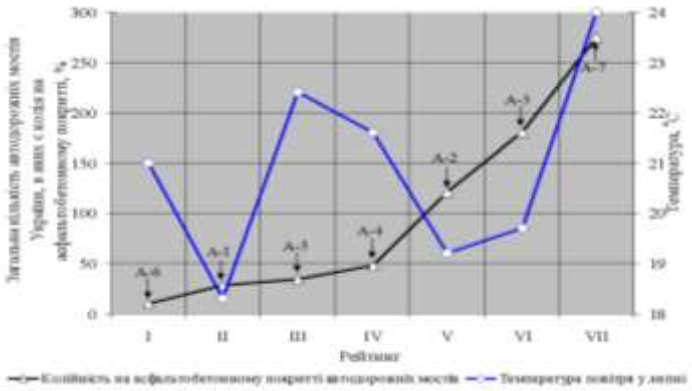


Рисунок 4.30 – Залежність загальної кількості автодорожніх мостів України, в яких є колія на асфальтобетонних покриттях від рейтингу та його району

З результатів табл. 4.7 та рис. 4.3 можна зробити висновок про те, що колія, яка виникла в покритті автодорожніх мостів України, залежить від районування, інтенсивності руху транспортних засобів і температури, а також строку експлуатації покриття до і після його ремонту. З рейтингу [474] (рис. 4.30)

спостерігається експоненційна залежність, а саме найменша кількість автодорожніх мостів України з коліями на асфальтобетонному покритті знаходиться в районі А-6 і становить до 10 % та відповідає рейтингу I, а в районах А-1, А-5, А-4, А-2, А-3 в межах від 20% до 200% та відповідно II, III, IV, V, VI, а найбільша кількість в районі А-7 понад 250% та VII.

Таблиця 4.7 – Результати колійності в асфальтобетонному покритті на мостах

Асфальтобетонне покриття з глибиною колії понад 30 мм на автодорожніх мостах в залежності від області його розташування	Кількість автодорожніх мостів, %							Шифр району	Рейтинг
	Технічна категорія автомобільних доріг					Дороги адміністратив-ного значення			
	I	II	III	IV	V	Державні	Місцеві		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Волинській	1	3	2	1	1	5,0	1,0	А-1	II
Рівненській	0	7,3	6,2	0	0	5,5	0		
Житомирській	3	0,4	2,2	0	0	1	0,3	А-2	V
Львівській	0	0,4	1,8	0	0	0,9	0,2		
Чернівецькій	0	2,0	2,2	0	0	1,7	0		
Київській	9,1	8,9	1,8	0,9	0	5,2	2,2	А-3	VI
Полтавській	0	0	3,1	1,9	0	1,6	0,5		
Сумській	0	0,2	13,7	16,5	3	7,8	21,4		
Вінницькій	6,1	1,2	12,3	11,9	4,8	6,0	2,0	А-4	IV
Одеській	0	0,8	0	1,8	0	0,7	0,2		
Дніпропетровській	0,9	0,5	0	0	0	5,5	1,5	А-5	III
Миколаївській	0	2,8	2,6	1,8	0	2,6	0,4		
Запорізькій	0	0	0	1,8	0	0,3	4,8	А-6	I
Луганській	0	0	0	0	1,5	0	0		
Донецькій	0	0,3	0,2	0,8	0	0,2	0		
АР Крим	3	9,8	10,6	10,1	60,0	8,5	3,1	А-7	VII
Херсонській	24,2	12,6	11	11	60	10,7	40,5		

Такі результати (рис. 4.30) показують розрізнений характер виникнення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах різних районів з різним температурним характером (рис. 4.30) в зв’язку з тим, що вони експлуатуються на різних технічних категоріях автомобільних доріг, а також мають різні конструкції дорожнього одягу і гідроізоляційні матеріали.

Асфальтобетонне покриття має різну гранулометрію, а саме типу А, Б, В та щебенево-мастикового асфальтобетону з максимальною крупністю зерен щебеню 10 мм, 15 мм, 20 мм на різних бітумних в'яжучих (модифіковані, полімерами та не модифіковані), які влаштовані на проїжджій частини мостів, що експлуатуються (таблиця 4.7). Всі ці фактори суттєво впливають на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті. На основі отриманих результатів (рис.4.30) запропоновано оцінювати кількість мостів (K_M) в яких є колія на покритті мостів в залежності від рейтингу (P) та району його експлуатації з довірчою апроксимацією $R^2 = 0{,}973$ за залежністю:

$$K_M = A \cdot e^{B \cdot P} \tag{4.37}$$

де A,B – параметри апроксимації (A=7,0417, B=0,5343);

Інші результати обстеження покриття на мостах наведені в додатку Б.

4.4.2 Результати залежності зміни температури від товщини покриття на проїзній частині шляхопроводу при перетині вул. Кіквідзе із залізничною станцією «Київ-Московський» на протязі доби наведені на (рис. 4.31, рис. 4.32, рис. 4.33.), а результати зміни температури в полосі на кату наведені в таблиці 4.8.

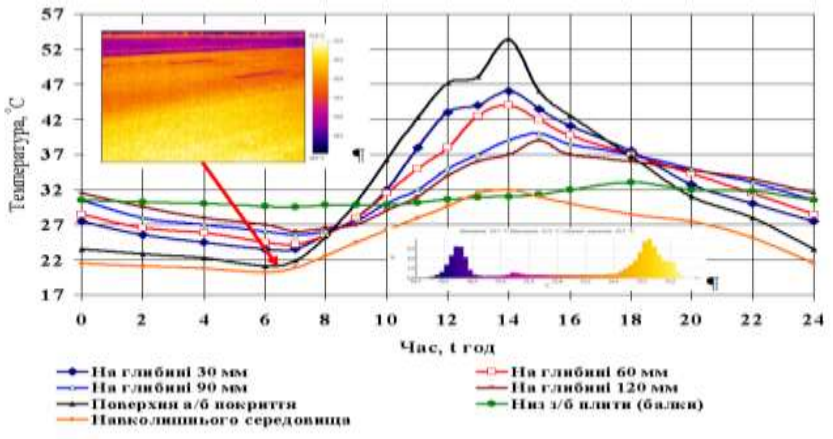


Рисунок 4.31 – Залежність зміна температури в асфальтобетонному покритті та залізобетонній плиті на протязі доби з використанням тепловізора

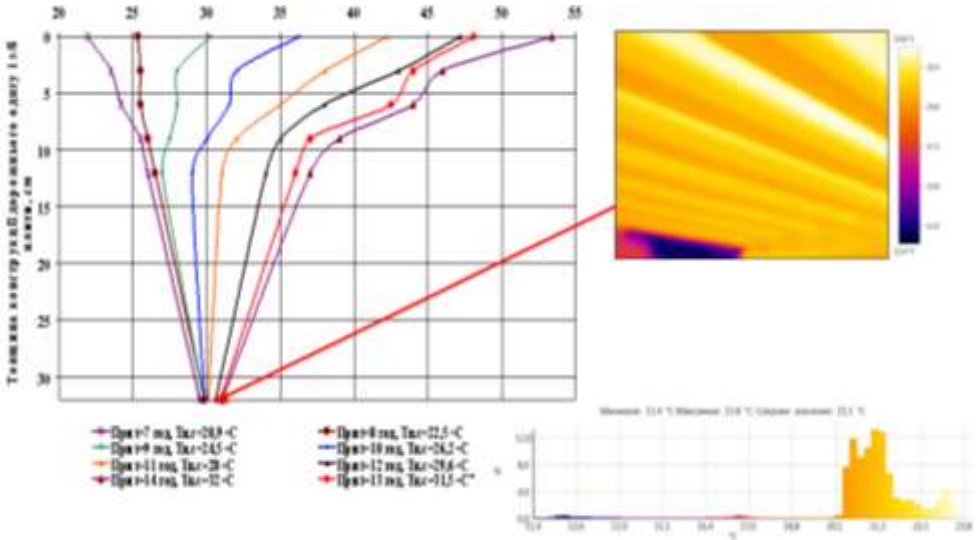


Рисунок 4.32 – Зміна температури по глибині в асфальтобетонному покриття та залізобетонній плиті від часу і температури навколишнього середовища

а б в

а – температура покриття ($T_п$); б – температура покриття на різній глибині (T_1, T_2, T_3, T_4); в – температура низу залізобетонної плити (прогонової балки) ($T_{н.з/б}$)

Рисунок 4.33 – Натурне дослідження температури покриття на проїзній частині шляхопроводу

Результати аналізу показали, що максимальна температура навколишнього середовища з 14^{oo} год. дня становила 32 ^oC, а температура поверхні покриття підвищилась на 53,5 ^oC.

Таблиця 4.8 – Результати вимірювання зміни температури в полосі накату покриття

Назва об'єкту	Температура, ^{o}C			Приріст температури, ^{o}C	Інтенсивність руху , тис. **авт/добу**	Час спостереження
	$T_{н.с}$	$T_{п}$	$T_{р}$	$\Delta_t = T_р - T_п$		
Шляхопровід при перетині вул. Кіквідзе із залізничною станцією «Київ-Московський»	29-30	36,8	37,8	1,0	35	19.05.14 18^{00}год
		37,2	38,5	1,3		
		37,4	39,2	1,8		
		36,6	38,6	2,0		
		37,6	38,8	1,2		
		38	39,5	1,5		
		37,3	38,7	1,4		
Середнє значення		**37,27**	**38,73**	**1,46**		
Південний мостовий перехід через річку Дніпро на естакадній частині в місті Києві	32-33	47,5	51,3	3,8	90	16.07.14 14^{30}год
		46,5	50,2	3,7		
		46,9	50,6	3,8		
		46,3	50,0	3,7		
		47,1	50,9	3,8		
		47,2	50,9	3,8		
		47,8	51,6	3,8		
Середнє значення		**47,0**	**50,8**	**3,8**		
Середнє значення ПМП	29-30	**37,4**	**40,9**	**3,5**		19.05.14 в 17^{10}год

Аналіз результатів показав, що максимальна температура, на яку може прогріватись асфальтобетонне покриття на мостах може бути від 50 до 60 ^{o}C, а в полосі накату на 55-65 ^{o}C. Результати дослідження зміни температури в полосі накату асфальтобетонного покриття на кільцевому стенді підвищувалась на 2,5 - 5,2 ^{o}C, а в загальному температура покриття становила 49,5- 52,2 ^{o}C. Отримані експериментальні дослідження підтверджують припущення стосовно інтенсивності впливу пневматичних коліс транспортного засобу на підвищення температури покриття в полосі накату на 2-5 ^{o}C.

4.4.3 Результати досліджень бітумів модифікованих різними полімерами (додаток Б) та запропоновані методи оцінки бітумного в'яжучого при модифікації наведено (розділ 7 та додаток Б) [5, 370, 394, 432, 437, 476]. В ході роботи встановлені технологічні параметри приготування бітумі, модифікованого

різними полімерами встановлено їх оптимальну кількість (додаток Б) [5, 370, 394, 432, 437, 476].

4.4.4 Відповідно до методу (п.4.3.3) визначали параметри функції релаксації для досліджуваних асфальтобетонів (додаток Б).

Для випробування використовували не менше сими зразків-балочок. Із отриманих даних визначали середньоарифметичне значення, розбіжність яких між паралельними випробуваннями не перевищувала 12% .

На основі отриманих експериментальних даних по функції повзучості та модуля пружності для досліджуваних асфальтобетонів побудовані криві функції релаксації $R(t)=1/\Pi(t)$[5, 86, 370, 394, 469, 470]. Для прикладу наводимо криві функції релаксації для тип Б-20 та температуро часову аналогію (рис. 4.34 – 4.37).

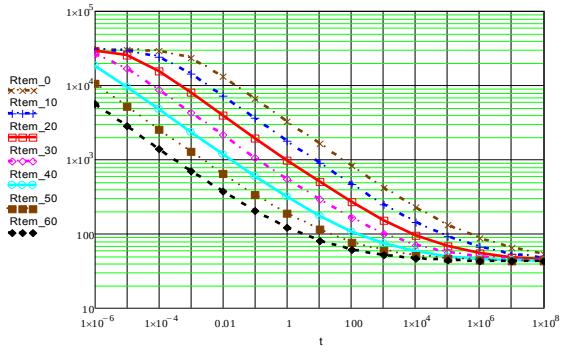


Рисунок 4.34 – Криві функції релаксації асфальтобетону тип Б-20(11-Б-20); □-експериментальні точки при 20 °С; ×-теж при 0 °С; точки отримані методом температурно – часової аналогії

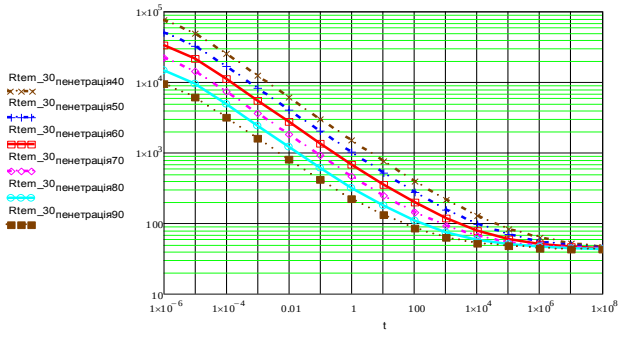


Рисунок 4.35 – Криві функції релаксації асфальтобетону тип Б-20 (11-Б-20) з урахуванням коефіцієнту пенетраці при температурі +30С

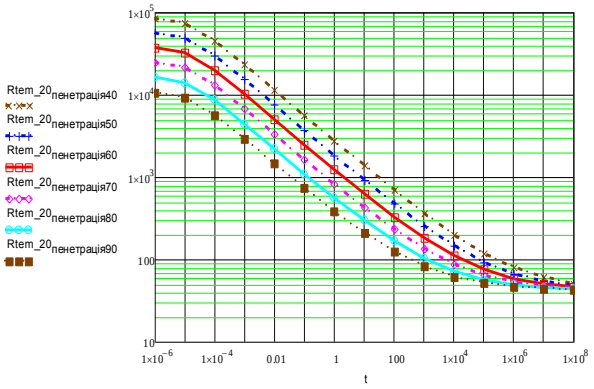


Рисунок 4.36 – Криві функції релаксації асфальтобетону тип Б-20 (11-Б-20) з урахуванням коефіцієнту пенетрації при температурі +20°С

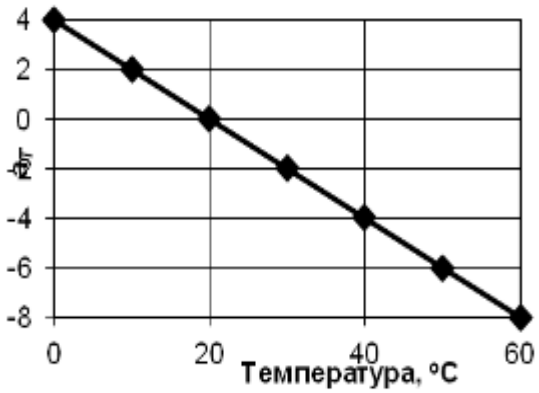


Рисунок 4.37 – Залежність коефіцієнта температурно-часової аналогії для асфальтобетону 11-Б-20

Зіставлення значень функції релаксації, знайденої перерахунком з випробувань на повзучість, із значеннями, отриманими при безпосередньому випробуванні на релаксацію, свідчить про задовільну збіжність результатів. Максимальне відхилення між кривими 1 і 2 не перевищує 14 %, що знаходиться в межах експериментального розкиду. Звертає на себе увагу той факт, що експериментальна крива функції релаксації розташована нижче ніж розрахункова крива *R(t)*, що безпосередньо узгоджується з теоретичними припущеннями [5, 44, 86].

Раніше різними авторами були показані можливості використання принципу температурно – часової аналогії для асфальтобетону. Однак слабо вивченим залишається це питання для асфальтобетону на модифікованому бітумі та литих. Тому з ціллю перевірки використання ТЧА були виконані випробування на повзучість і на релаксацію при різних температурах. Потім на основі співвідношення були побудовані криві релаксації (рис.4.34 – 4.39, табл. 4.9, 4.10, додаток Б). Ці результати засвідчують, що з підвищенням температури значення функції релаксації матеріалів зменшується і крива релаксації розміщується нижче. Паралельне зміщення кривих релаксації, отриманих при різних температурах, вздовж горизонтальної осі часу дозволяє поєднувати їх в єдину загальну криву

(рис. 4.37) [5, 44, 86]. Результати функції деформації показали, що для досліджуваних асфальтобетонів значення менші на 1,2 до 1,8 рази від функції релаксації в залежності від температури і властивостей матеріалу.

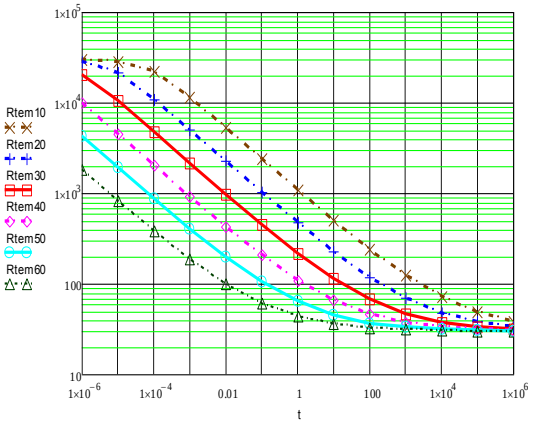


Рисунок 4.38 – Криві функції релаксації асфальтобетону литого 7.1-ЛА-15-2В при температурі +20°С

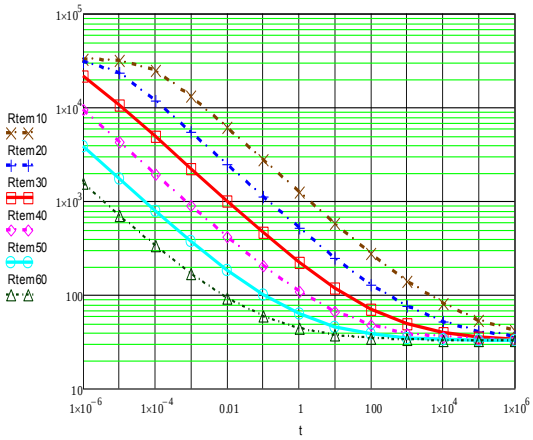


Рисунок 4.39 – Криві функції релаксації асфальтобетону литого 7.10-ЛА-15-П при температурі +20°С 7.10-ЛА-15-П

Таблиця 4.9 – Параметри функції релаксації

Шифр асфальтобетону	Параметри функції α_T		Параметри функції релаксації			
	Q, °С	p, град$^{-1}$	$E_{мт}$, МПа	$E_{дг}$, МПа	η, с	λ
1	2	3	4	5	6	7
7-ЛА-15	20	0,246	29 987	30	0,6 x10^{-5}	0,350
7.1-ЛА-15-2В	20	0,250	30 800	31	0,6 x10^{-5}	0,350
7.2-ЛА-15-4В	20	0,254	31 332	32	0,6 x10^{-5}	0,350
7.3-ЛА-15-6В	20	0,261	32 250	33	0,6 x10^{-5}	0,350
7.4-ЛА-15-1К	20	0,252	31 083	31	0,6 x10^{-5}	0,350
7.5-ЛА-15-3К	20	0,258	31 764	32	0,6 x10^{-5}	0,350
7.6-ЛА-15-5К	20	0,263	32 432	33	0,6 x10^{-5}	0,350
7.7-ЛА-15-1Е	20	0,253	31 175	31	0,6 x10^{-5}	0,350
7.8-ЛА-15-1,5Е	20	0,256	31 600	31	0,6 x10^{-5}	0,350
7.9-ЛА-15-2Е	20	0,264	32 550	32	0,6 x10^{-5}	0,350
7.10-ЛА-15-П	20	0,265	32 730	33	0,6 x10^{-5}	0,350

На основі кривих релаксації, отриманих при різних температурах, були графічно встановлені значення lnat(T) (lnθ(T)) для різних температур (додаток Б) при температурі приведення Q=20°C.

Таблиця 4.10 – Параметри функції релаксації

Шифр асфальтобетону	Параметри функції α_T		Параметри функції релаксації			
	Q, °C	p, град$^{-1}$	$E_{мт}$, МПа	$E_{дг}$, МПа	η, с	λ
1	2	3	4	5	6	7
2-ЩМА-10	20	0,166	23 400	35	1,68 x10^{-5}	0,290
2.1-ЩМА-10-2В	20	0,171	25 697	36	1,68 x10^{-5}	0,290
2.2-ЩМА-10-4В	20	0,177	28 964	37	1,68 x10^{-5}	0,290
2.3-ЩМА-10-6В	20	0,184	32 965	42	1,68 x10^{-5}	0,290
2.4-ЩМА-10-1К	20	0,183	32 130	41	1,68 x10^{-5}	0,290
2.5-ЩМА-10-3К	20	0,185	33 995	44	1,68 x10^{-5}	0,290
2.6-ЩМА-10-5К	20	0,187	34 835	46	1,68 x10^{-5}	0,290
2.7-ЩМА-10-1Е	20	0,174	26 790	36	1,68 x10^{-5}	0,290
2.8-ЩМА-10-1,5Е	20	0,185	33 920	44	1,68 x10^{-5}	0,290
2.9-ЩМА-10-2Е	20	0,186	34 240	45	1,68 x10^{-5}	0,290
2.10-ЩМА-10-П	20	0,188	35 270	47	1,68 x10^{-5}	0,290
4-Б-10	20	0,205	30 997	44	1,43x10^{-5}	0,307
4.1-Б-10-2В	20	0,212	31 150	51	1,43x10^{-5}	0,295
4.2-Б-10-4В	20	0,220	31 520	54	1,43x10^{-5}	0,286
4.3-Б-10-6В	20	0,240	32 730	57	1,43x10^{-5}	0,284
4.4-Б-10-1К	20	0,218	31 430	53	1,43x10^{-5}	0,293
4.5-Б-10-3К	20	0,239	32 510	56	1,43x10^{-5}	0,285
4.6-Б-10-5К	20	0,244	33 120	59	1,43x10^{-5}	0,281
4.7-Б-10-1Е	20	0,215	31 270	52	1,43x10^{-5}	0,293
4.8-Б-10-1,5Е	20	0,238	32 200	55	1,43x10^{-5}	0,288
4.9-Б-10-2Е	20	0,242	32 890	58	1,43x10^{-5}	0,283
4.10-Б-10-П	20	0,246	33 440	61	1,43x10^{-5}	0,280

Це підтверджує правомірність апроксимації функції темпеартурно- часового зміщення залежністю [5, 44, 86]. Тангенс кута нахилу прямої lnat(T) до вісі

температури як би відображає температурну чутливість функції релаксації матеріалу і рівний параметру р залежності:

$$\rho = \ln a_T(T)/(T-Q). \tag{4.38}$$

З отриманих значень *R(t)* при різних температурах видно, що чим менший параметр р, тим в меншій степені змінюються в'язко-пружні властивості матеріалу зі зміною температури, тим менша його температурна чутливість і тим повільніше збільшується жорсткість з зменшенням температури, і як внаслідок, інтенсивності збільшення температурних напружень буде менше. З випробуваних матеріалів найкращим чином поводить себе асфальтобетон з добавкою полімерними добавками, це свідчить про підвищення колієстійкості асфальтобетону (рис. 4.40).

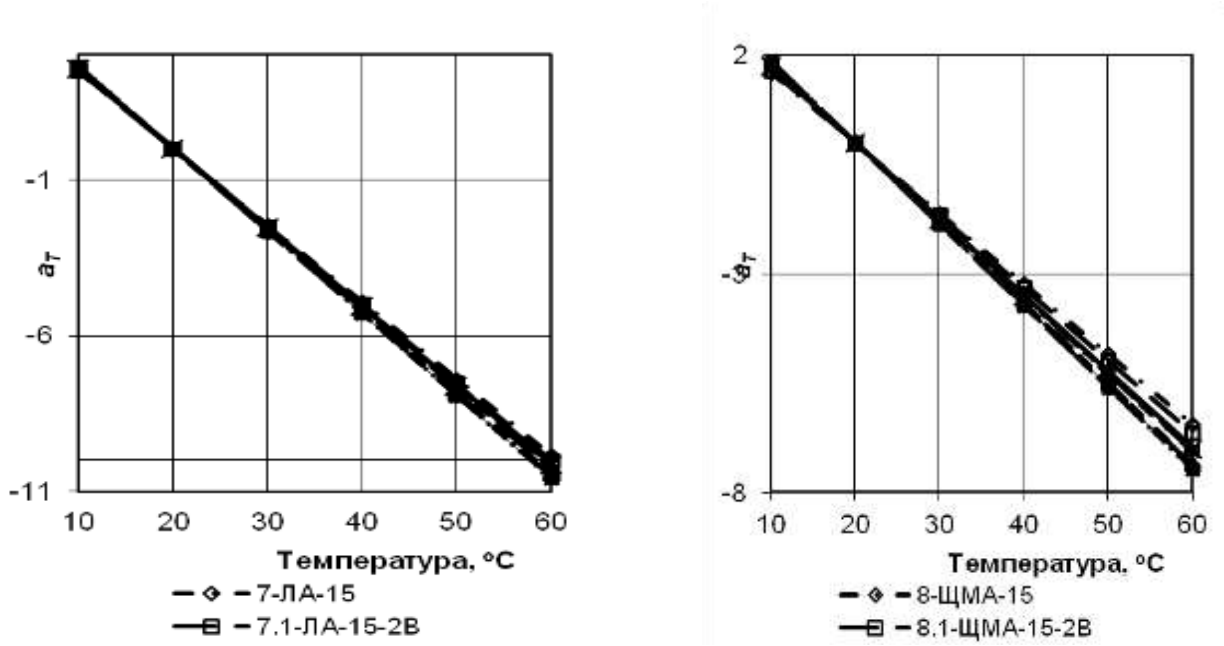


Рисунок 4.40 – Залежність коефіцієнта $a_т$ від температури Q=20°С: - експериментальні точки, отримані для матеріалів відповідних складів: ─ середні лінії.

Встановлення термов'язкопружнопластичних характеристик асфальтобетону. Математична модель прогнозування утворення колії в асфальтобетонному покритті потребує застосування характеристик, що описують термов'язкопружню поведінку асфальтобетонів ($\psi_T(t,T)$ - функції релаксації і $a_T(T,t)$ - температурно-часової аналогії) та термов'язкопружнопластичну ($\psi_T^Д(t,T)$ - функція деформації, W – функція, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів, $K_к$ - коефіцієнт пластичного бокового деформування, ϑ, k, γ – параметр, що відображає вплив циклічного навантаження. Функції релаксації, деформації і температурно-часової аналогії визначали за методикою Б.С. Радовського. Характеристика пластичних властивостей асфальтобетону встановлювали при розрахункових температурі і тиску $c=p/h_1$.

Розроблено експериментальний метод визначення виду функції, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів, та її параметри, а також експериментальний параметр, що відображає вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді колеса. Він полягає у використанні секторного пресу для створення зразків, що імітують конструкцію асфальтобетонного покриття мостів із залізобетонною плитою із застосуванням певної комбінації внутрішніх факторів (рис. 1, табл. 1, 2,3).

Результати адекватності експериментально отриманих функцій релаксації досліджуваних асфальтобетонів наведено в (Додаток Е).

4.4.5. Результати визначення міцності зчеплення між асфальтобетоном, гідроізоляцією та бетонною основою при зсуві. Проведені дослідження по визначенню розрахункових граничних дотичних напружень (табл. 4.11) з наплавною (Техноеласт-МІСТ), обмазочною (Ребіт), напиляємою (Eliminator) гідроізоляцією показують, що наприклад, коефіцієнти запасу міцності по розрахунковому граничному напруженні при зсуві між асфальтобетоном литим «Гусасфальт» ГА-15 і гідроізоляцією «Welestrong АР» та бетонною основою

(табл. 4.11), складають для розрахункових автомобілів групи А1 від 1,05 (1,46), для групи А2 – від 1,25 (1,67), для групи Б – від 1,68 (1,60).

Таблиця 4.11 – Розрахункові граничні напруження при зсуві між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляцією та бетонною основою

№№ п.п	Напруження на контакті шарів при гальмуванні	Параметри режиму випробувань		Зсувне дотичне зусилля, кгс					Коефіцієнт тертя, f	Питоме зчеплення С, МПа	Розрахункове дотичне напруження, МПа для розрахункових автомобілів /коеф. запасу			Примітка
		Тиск на зразок σ, мпа	Швидкість ходу плити пресу, мм/хв	Фактичне значення, Тп	Середнє значення, $Тп_{(сер)}$	Коефіцієнт варіації, Кв, %	Площа зразка, S $см^2$	Експериментальне значення дотичних напруження [τ], МПа			А1	А2	Б	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	повільному	0,3	3	490	503	10,20	167	0,30	0,61	0,12	0,61 / 1,36	0,48 / 1,50	0,42 / 1,68	Асфальтобетон литий Гусасфальт ГА-15+гідроізоляція Елімінатор+бетонна основа
2				560										
3				460										
4		0,7		998	909	8,93		0,54						
5				839										
6				890										
7	екстремальному	0,3	100	750	697	8,77		0,42	0,74	0,20	0,79 / 1,41	0,64 / 1,52	0,56 / 1,60	
8				630										
9				710										
10		0,7		1020	1190	12,55		0,71						
11				1250										
12				1300										
13	повільному	0,3	3	540	483	10,21	167	0,29	0,32	0,21	0,47 / 1,05	0,40 / 1,25	0,37 / 1,48	Асфальтобетон литий Гусасфальт ГА-15+гідроізоляція Welestrong АР+бетонна основа
14				460										
15				450										
16		0,7		750	697	6,78		0,42						
17				660										
18				680										
19	екстремальному	0,3	100	910	697	27,47		0,42	0,61	0,33	0,82 / 1,46	0,70 / 1,67	0,64 / 1,83	
20				640										
21				540										
22		0,7		1200	1097	16,32		0,66						
23				890										
24				1200										

кінець таблиці 4.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
25	повільному	0,3	3	680	719	6,92	167	0,44	0,13	0,40	0,50 / 1,11	0,48 / 1,50	0,47 / 1,88	Асфальтобетон типу Б-15 +гідроізоляція Ребіт+бетонна основа
26				790										
27				690										
28		0,7		880	803	7,01		0,49						
29				750										
30				780										
31	екстремальному	0,3	100	1180	1067	7,55		0,65	0,35	0,54	0,68 / 1,21	0,75 / 1,79	0,72 / 2,05	
32				1020										
33				1000										
34		0,7		1200	1296	6,31		0,79						
35				1400										
36				1290										
37	повільному	0,3	3	800	810	8,11	167	0,49	0,21	0,43	0,60 / 1,33	0,56 / 1,75	0,54 / 2,16	Асфальтобетон типу Б-15 +гідроізоляція Техноеласто-МІСТ АР+бетонна основа
38				740										
39				900										
40		0,7		990	950	4,72		0,58						
41				890										
42				980										
43	екстремальному	0,3	100	990	940	4,85		0,56	0,25	0,49	0,69 / 1,23	0,64 / 1,52	0,62 / 1,77	
44				890										
45				900										
46		0,7		1000	1091	12,53		0,66						
47				990										
48				1285										

Значення коефіцієнтів запасу міцності по розрахунковому граничному напруженні при зсуві в дужках відповідають випробуванням при екстремальному гальмуванні, а в не дужках при повільному гальмуванні відповідно до [343, 379, 412, 415, 423, 453, 456, 457].

З цих даних очевидно, що використання аналогічної конструкції для нижчої розрахункової групи автомобілів, призводить до збільшення коефіцієнту запасу міцності в 1,1 – 1,6 разів. В той же час коефієнт запасу міцності по розрахунковому напруженні при зсуві між асфальтобетоном типу Б-15 і гідроізоляцією «Ребіт» та бетонною основою для розрахункових автомобілів групи групи А1 від 1,11 (1,21), для розрахункових автомобілів групи А2 – від 1,50 (1,79), для розрахункових автомобілів групи Б – від 1,88 (2,05), якщо застосуванти для даної конструкції гідроізоляцію «Техноеласт-МІСТ» коефіцієнт запасу міцності для розрахункових автомобілів групи А1 від 1,33 (1,23), для

розрахункових автомобілів групи А2 – від 1,75 (1,52), для розрахункових автомобілів групи Б – від 2,16 (1,77).

Отримані результати свідчать, що міцність міжшарового зчеплення при традиційних витратах підґрунтовки між асфальтобетонним покриттям і бетонною основою може змінюватись до 2-х разів. Встановлено, що недостатнє зчеплення істотно впливає на утворення колії в асфальтобетонному покритті. Для випробуваних складів асфальтобетону (зразка-композиту) оптимальна витрата підґрунтовки складає від 0,4 л/м^2 до 0,6 л/м^2 і значно залежить від виду асфальтобетону.

4.4.6. Результати впливу різних параметрів на показник стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії

Результати проведених випробувань, при дослідженні асфальтобетонів різних типів згідно методики наведеної в (п. 4.3.5) представлено на (рис. 4.41-4.50) [4, 342, 344, 354, 370, 380, 414, 424, 425, 435, 436, 488 – 492].

З отриманих даних (рис. 4.41) очевидно, що найменша колія у асфальтобетону типу А-10 на бітумному в'яжучому Полигум. Так, після 10 тис проходів колеса глибина колія в асфальтобетону А-10 на в'яжучому Полигум складає 3,7 мм, а на в'яжучому з Kraton D1101 - 3 % збільшується на 2,4 мм, для Butonal NS 198 - 3 % на 2,9 мм, на бітумі БНД 40/60 на 3,5 мм, на бітумі БНД 60/90 – на 6,2 мм, а на бітумі БНД 90/130 вже складає більше 12 мм. Порівнюючи колієстійкість асфальтобетону типу А-10 на бітумному в'яжучому Полигум (рис. 4.41) з асфальтобетоном типу А-20 на тому ж самому в'яжучому (рис. 4.42) встановлено, що після 10 тис проходів колеса, у типу А-20 колія менша на 1,76 мм і аналогічно для інших бітумних в'яжучих різної в'язкості очевидно, що колія менша для типу А-20 в порівнянні з типом А-10.

Аналізуючи отримані дані експериментальних випробувань (рис. 4.43 – 4.46) залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок типу Б-10 на бітумах різної в'язкості при температурі 55 °С, встановлено, що після 10 тис проходів колеса глибина колії при тиску 0,55 МПа

для асфальтобетону типу Б-10 на в’яжучому Полигум складає 2,67 мм, а на бітумі модифікованому Kraton D1101-3% колія збільшується на 2,18 мм, при використанні бітуму модифікованого Butonal NS 198 - 3% – на 2,33 мм, на бітумі БНД 40/60 – на 2,53 мм, на бітумі БНД 60/90 – на 5,10 мм, на бітумі БНД 90/130 – колія збільшується більше, ніж на 10 мм.

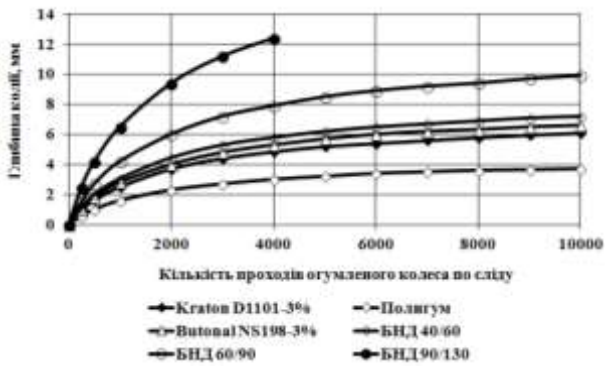


Рисунок 4.41 – Залежність глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається від огумленого колеса на зразок А-10 на різних бітумних в’яжучих при температурі 55 °С

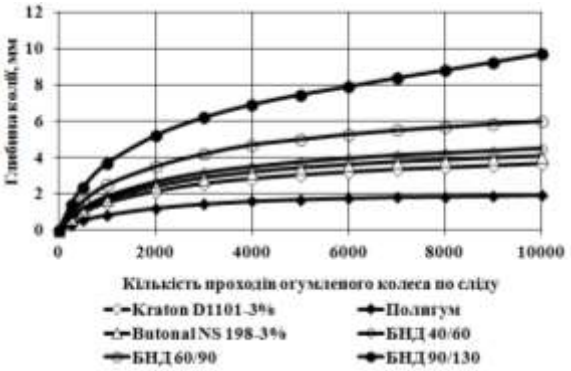


Рисунок 4.42 – Залежність глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається від огумленого колеса на зразок А-20 на різних бітумних в’яжучих при температурі 55 °С

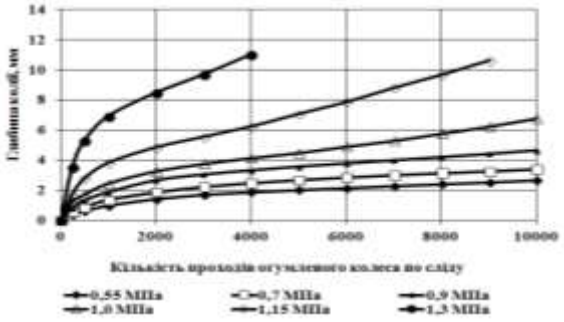


Рисунок 4.43 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на в’яжучому Полигум при температурі 55 °С

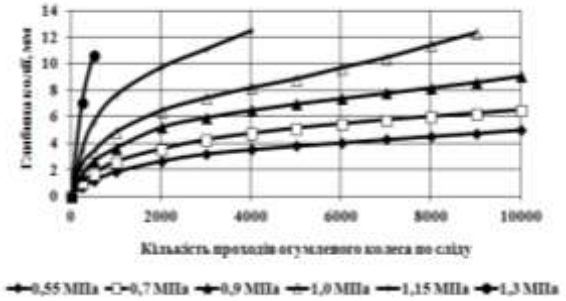


Рисунок 4.44 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі, модифікованому полімером Butonal NS 198 – 3 % при температурі 55 °С

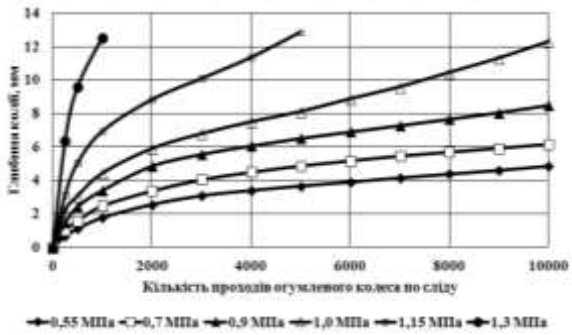


Рисунок 4.45 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі, модифікованому полімером Kraton D1101 – 3 % при температурі 55 °С

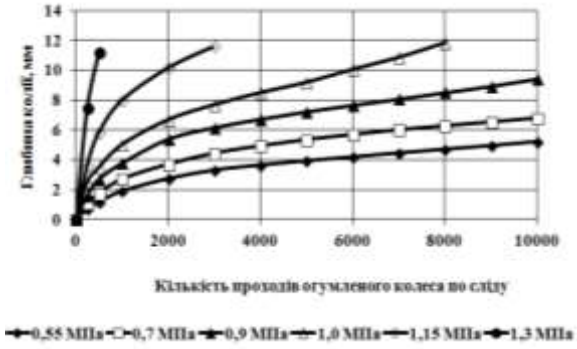


Рисунок 4.46 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі БНД 40/60 при температурі 55 °С

Досліджуючи вплив зростання тиску на збільшення глибини колії, наприклад, для зразку асфальтобетону типу Б-10, виготовленого на бітумі БНД 60/90 (рис. 4.47) при тиску 0,55 МПа глибина колії після 1 тис проходів колеса складала 2,84, а при тиску 0,7 МПа збільшилася на 1,23 мм, при 0,9 МПа – на 2,81 мм, при 1,0 МПа – на 4,68 мм і при 1,15 МПа збільшилася на 9,16 мм. У випадку використання для приготування асфальтобетону типу Б-10 бітуму БНД 90/130 (рис. 4.48) глибина колії у порівнянні з бітумом БНД 60/90 значно збільшиться, наприклад, після 8 тис проходів колеса при тиску 0,55 МПа вона зросте на 5,28 мм, а при тиску 1,15 МПа після 500 проходів колеса різниця між ними складає 6,55 мм.

Отримані результати (рис. 4.49 – 4.54) залежності глибини колії від тиску, що передається від колеса на зразок асфальтобетону типу Б-20 на бітумних в’яжучих різної в’язкості при температурі 55 °С. Так, наприклад, для асфальтобетону типу Б-20 виготовленому на бітумі БНД 60/90 (рис. 4.53) глибина колії після 1 тис проходів при тиску 0,55 МПа складала 2,49 мм, а при тиску 0,7 МПа збільшилася на 0,85 мм, при 0,9 МПа – збільшилася на 1,76 мм, при

1,0 МПа – на 2,98 мм, при 1,15 МПа – на 5,87 мм. Крім того, для асфальтобетону типу Б-20 на в'яжучому Полигум глибина колії після 1 тис проходів колеса при тиску 0,7 МПа складає 1,1 МПа, а при аналогічних умовах і застосуванні бітуму, модифікованого полімером Kraton D1101 – 3 % – 2,2 мм, при застосуванні бітуму, модифікованого полімером Butonal NS 198 – 3 % – 2,29 мм, при використанні бітуму – БНД 40/60 – 2,36, при використанні бітуму БНД 60/90 – 3,35 мм та при використанні бітуму БНД 90/130 – 6,12 мм.

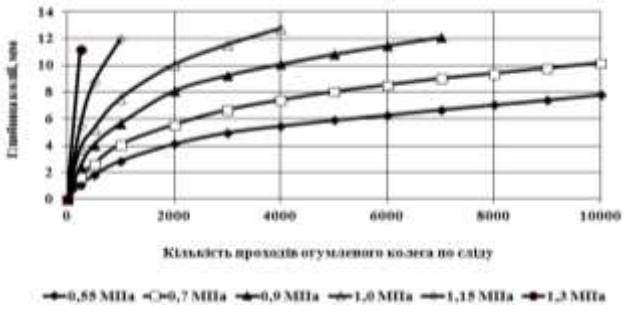


Рисунок 4.47 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі БНД 60/90 при температурі 55 °С

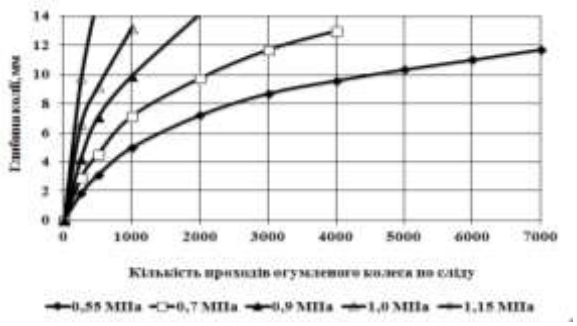


Рисунок 4.48 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі БНД 90/130 при температурі 55 °С

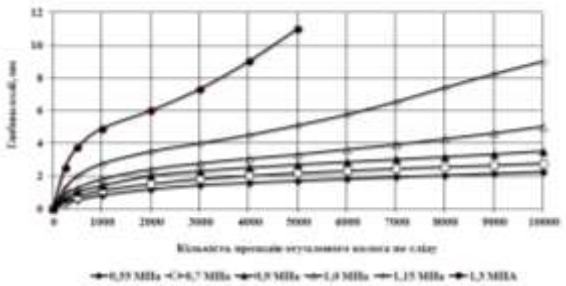


Рисунок 4.49 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-20 на в'яжучому Полигум

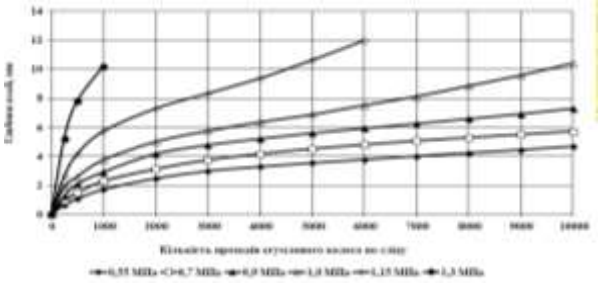


Рисунок 4.50 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-20 на бітумі, модифікованому полімером Butonal NS 198 – 3 %

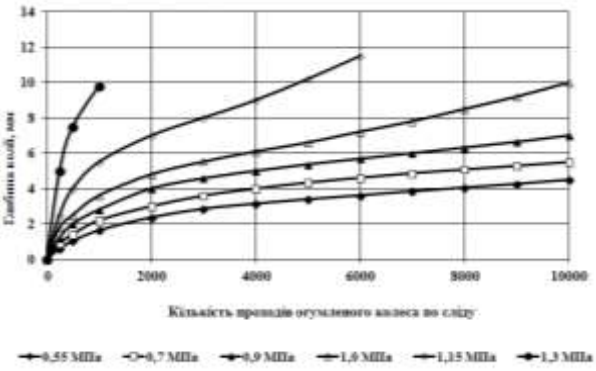


Рисунок 4.51 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-20 на бітумі, модифікованому полімером Kraton D1101 – 3 %

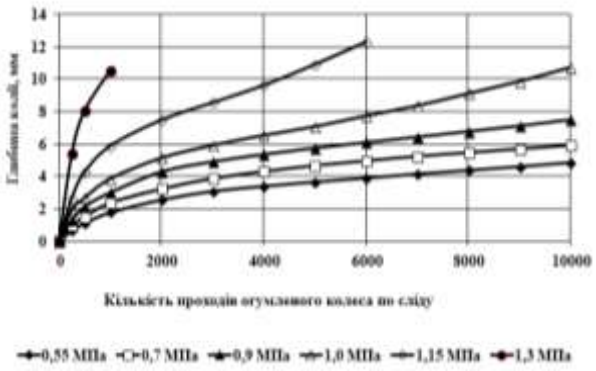


Рисунок 4.52 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі БНД 40/60

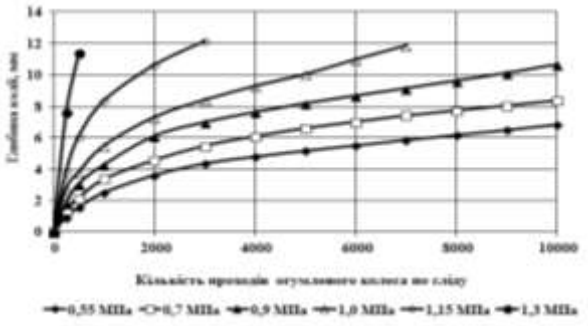


Рисунок 4.53 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі БНД 60/90

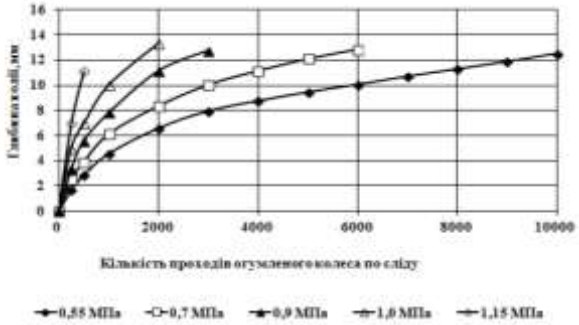


Рисунок 4.54 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається від огумленого колеса на зразок типу Б-10 на бітумі БНД 90/130

Аналіз отриманих результатів (рис. 4.55, 4.56) залежності глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається через огумлене колесо на зразок асфальтобетону типу В-20, В-10 на різних бітумних в’яжучих. Так, наприклад, після 10 тис проходів колеса глибина колії для асфальтобетону типу В-10 (рис. 4.56) в порівнянні з в’яжучим Полигум складає 4,1 мм, на Kraton D1101-3% збільшується

на 3,3 мм, на Butonal NS 198 -3% на 4,4 мм, на бітумі БНД 40/60 на 5,4 мм, на бітумі БНД 60/90 на 10,1 мм.

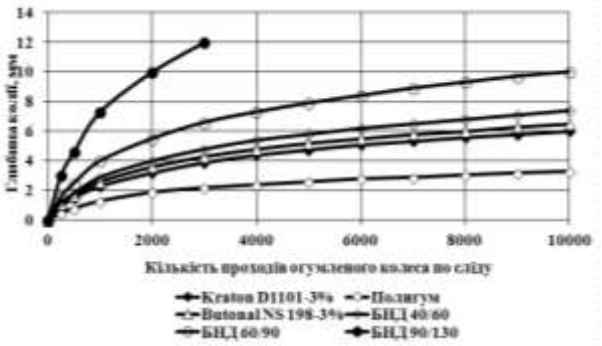


Рисунок 4.55 – Залежність глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається через огумлене колесо на зразок В-20 на різних бітумних в’яжучих при температурі 55 °С

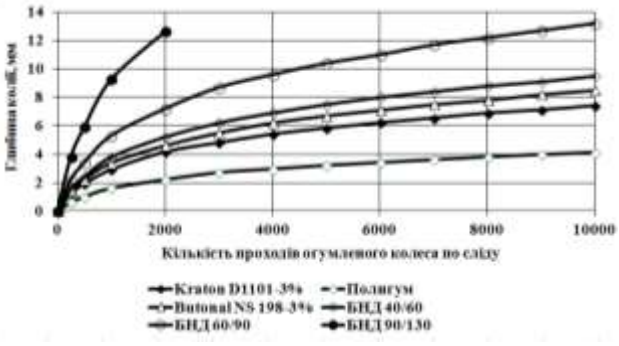


Рисунок 4.56 – Залежність глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається через огумлене колесо на зразок В-10 на різних бітумних в’яжучих при температурі 55 °С

Аналіз отриманих результатів (рис. 4.57 – 4.68) залежності глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 та ЩМА-10 на бітумних в’яжучих різної в’язкості при температурі 55 ^{o}С. Так наприклад, при випробуванні на колієстійкість після 10 тис проходів глибина колії при тиску 0,55 МПа для ЩМА–20 (рис. 4.57 – 4.62) на в’яжучому Полігум складала 1,58 мм, а на бітумі модифікованому Kraton D1101-3% збільшувалась на 0,68 мм, на бітумі модифікованому Butonal NS 198 - 3% на 0,95 мм, на бітумі БНД 40/60 на 1,07 мм, на бітумі БНД 60/90 на 1,61 мм, на бітумі БНД 90/130 на 2,56 мм. Наприклад, залежність глибини колії від різного тиску для ЩМА-20 на бітумі БНД 60/90 (рис. 4.61) при випробуванні огумленим колесом.

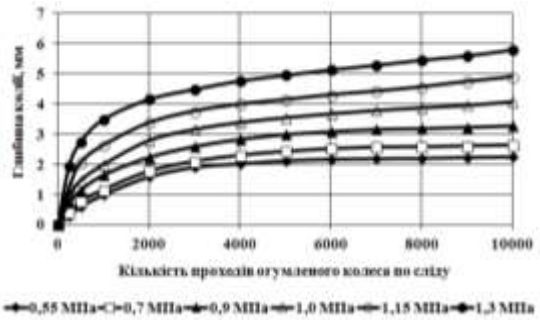


Рисунок 4.57 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 на бітумі, модифікованому полімером Kraton D1101-3% при температурі 55 ^{o}C

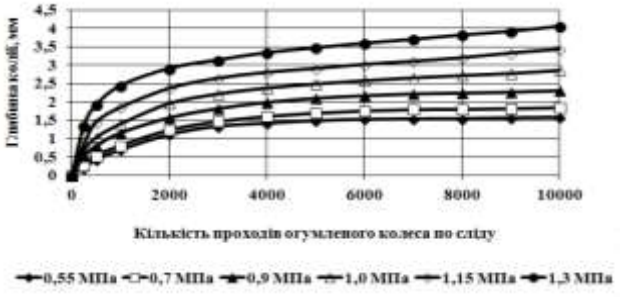


Рисунок 4.58 – Злежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 на в’яжучому Полигум при температурі 55 ^{o}C

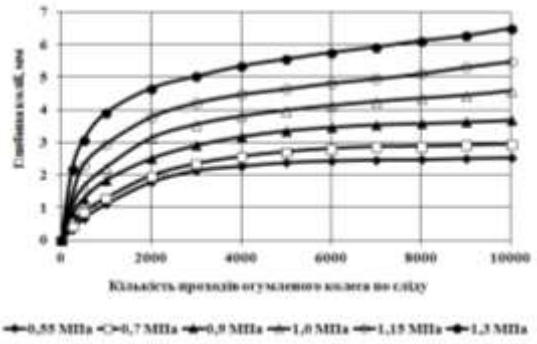


Рисунок 4.59 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 на бітумі, модифікованому полімером Butonal NS198 -3% при температурі 55 ^{o}C

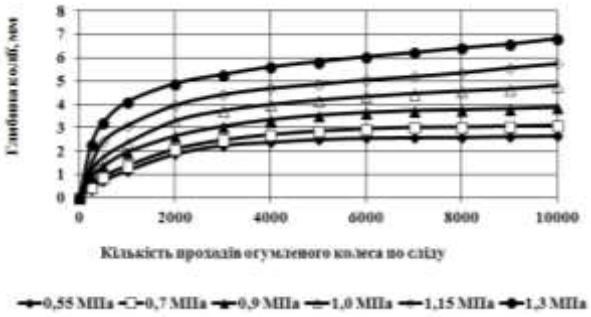


Рисунок 4.60 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 на бітумі БНД 40/60 при температурі 55 ^{o}C

При тиску 0,55 МПа глибина колії після 1 тис проходів складала 1,39 мм, при тиску 0,7 Н збільшується на 0,24 мм, при тиску 0,9 МПа збільшується на 0,93 мм, при тиску 1,0 МПа збільшується на 1,42 мм, при тиску 1,15 МПа збільшується на 2,32 мм, при тиску 1,3 МПа збільшується на 3,58 мм. В той же час, наприклад, для ЩМА-10 на бітумі БНД 60/90 (рис. 4.67) при

випробуванні огумленим колесом. При тиску 0,55 МПа глибина колії після 1 тис проходів складала 3,07 мм, при тиску 0,7 МПа збільшується на 1,18 мм, при тиску 0,9 МПа – на 2,74 мм, при тиску 1,0 МПа – на 3,98 мм, при тиску 1,15 МПа – на 6,24 мм, при тиску 1,3 МПа – на 9,23 мм.

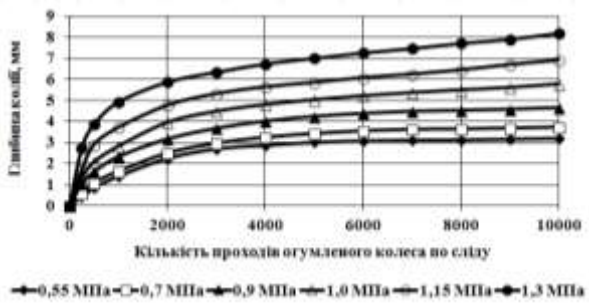


Рисунок 4.61 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 на бітумі БНД 60/90 при температурі 55 ^{o}C

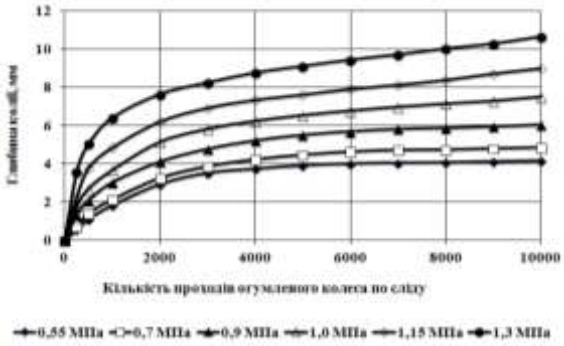


Рисунок 4.62 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-20 на бітумі БНД 90/130 при температурі 55 ^{o}C

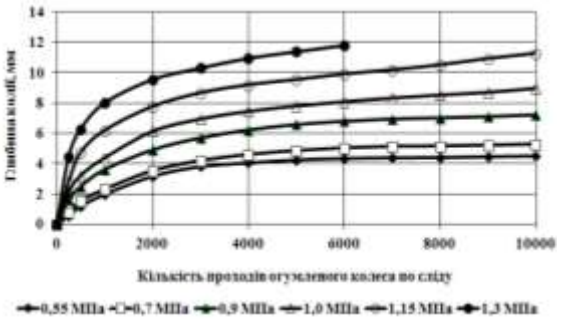


Рисунок 4.63 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-10 на бітумі, модифікованому полімером Kraton D1101-3% при температурі 55 ^{o}C

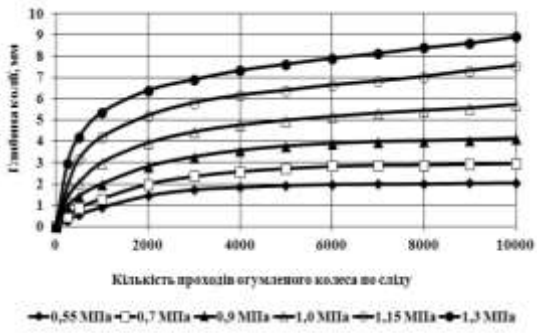


Рисунок 4.64 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-10 на в’яжучому Полигум при температурі 55 ^{o}C

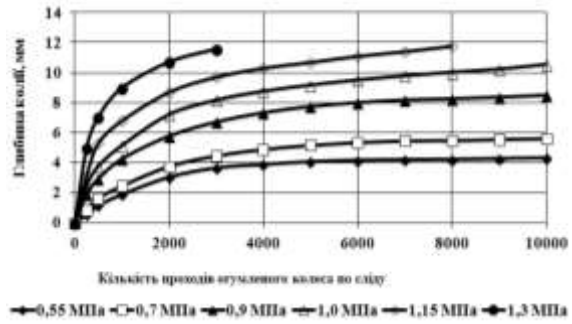


Рисунок 4.65 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-10 на бітумі, модифікованому полімером Butonal NS198 -3% при температурі 55 ^{o}C

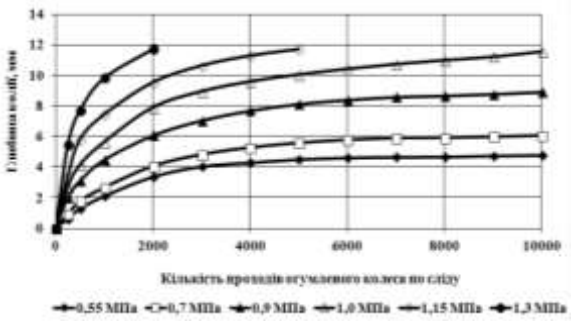


Рисунок 4.66 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-10 на бітумі БНД 40/60 при температурі 55 ^{o}C

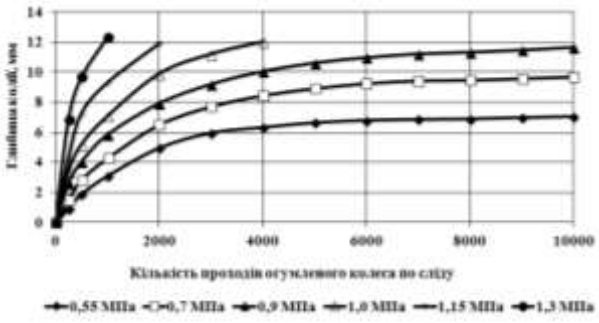


Рисунок 4.67 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-10 на бітумі БНД 60/90 при температурі 55 ^{o}C

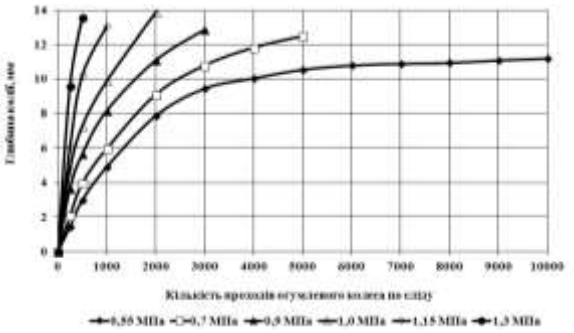


Рисунок 4.68 – Залежність глибини колії від різного тиску, що передається через огумлене колесо на зразок ЩМА-10 на бітумі БНД 90/130 при температурі 55 ^{o}C

Також були отримані результати інтенсивності утворення глибини колії після 10 тис проходів огумленого колеса в асфальтобетонних зразках з різним вмістом щебеню на бітумних в’яжучих різної в’язкості і в залежності від температури, що наведені на (рис. 4.69, 4.70).

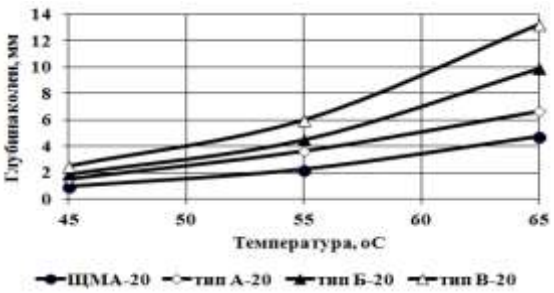


Рисунок 4.69 – Залежність глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається через огумлене колесо на зразок асфальтобетону, виготовленого на основі бітуму, модифіковаго полімером Kraton D1101-3% від температури

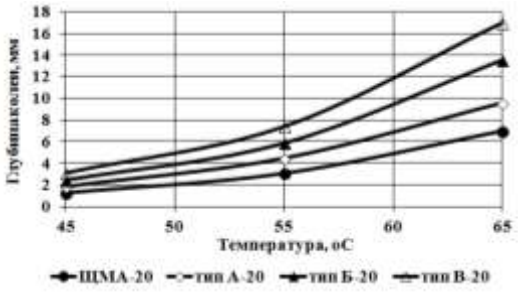


Рисунок 4.70 – Залежність глибини колії при тиску 0,7 МПа, що передається через огумлене колесо на зразок асфальтобетону, виготовленого на основі бітуму БНД 40/60 від температури

Аналіз отриманих результатів залежності глибини колії в асфальтобетонах від різної температури (рис. 4.69, 4.70) показує, що наприклад, глибина колії в ЩМА-20 (рис. 4.69) при температурі 45^{o}С складає 0,95 мм, а для асфальтобетону типу А-20 збільшується на 0,58 мм, для типу Б-20 на 0,94 мм, для типу В-20 на 1,58 мм, при температурі 55 ^{o}С глибина колії в ЩМА-20 збільшилася на 1,31 мм, для типу А-20 на 2,71 мм, для типу Б-20 на 3,55 мм, для типу В-20 на 5,07 мм, при температурі 65 ^{o}С глибина колії в ЩМА-20 збільшилася на 3,80 мм, для типу А-20 на 5,73 мм, для типу Б-20 на 8,95 мм, для типу В-20 на 12,3 мм, в порівнянні з ЩМА-20 при температурі 45 ^{o}С. Наприклад, глибина колії для ЩМА-20 (рис. 4.70) при температурі 45^{o}С складає 1,3 мм, а для типу А-20 збільшилася на 0,64 мм, для типу Б-20 на 1,24 мм, для типу В-20 на 2,04 мм, при температурі 55 ^{o}С глибина колії для ЩМА-20 збільшилася на 1,79 мм, для типу А-20 на 3,19 мм, для типа Б-20 на 4,58 мм, для типа В-20 на 6,09 мм, при температурі 65 ^{o}С глибина колії в ЩМА-20 збільшилася на 5,69 мм, для типа А-20 на 8,29 мм, для типа Б-20 на 12,24 мм, для типа В-20 на 15,7 мм, в порівнянні з ЩМА-20 при температурі 45 ^{o}С.

Проведені випробування, щодо дослідження інтенсивності утворення колії в асфальтобетонах з різним вмістом щебеню на бітумі, модифікованому полімером Kraton D1101-3% від впливу кількості проходів огумленого колеса по сліду за хвилину (рис. 4.71).

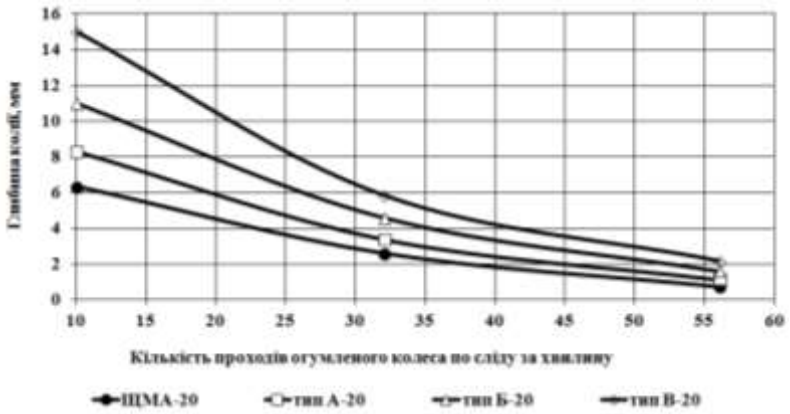


Рисунок 4.71 – Залежність глибини колії при тиску 0,9 МПа, що передається через огумлене колесо на зразок після 3000 проходів колеса по одному сліду при температурі 55 ^{o}C

Аналізуючи отримані дані інтенсивності утворення колії в асфальтобетонах з різною кількістю щебеню від різної швидкості проходів огумленого колеса по одному сліду за хвилину, наприклад, глибина колії для ЩМА-20 (рис. 4.71) при швидкості 10 прох/хв колеса по сліду складає 6,31 мм, а для асфальтобетону типу А-20 збільшується на 1,95 мм, для типу Б-20 на 4,69 мм, для типу В-20 на 8,69 мм, при швидкості 32 прох/хв глибина колії для ЩМА-20 зменшується на 3,71 мм, для типу А-20 на 2,94 мм, для типу Б-20 на 1,71 мм, для типу В-20 на 0,47 мм, при швидкості 56 прох/хв глибина колії для ЩМА-20 зменшується на 5,57 мм, для типу А-20 на 5,19 мм, для типу Б-20 на 4,71 мм, для типу В-20 на 4,15 мм, в порівнянні з ЩМА-20 при швидкості 10 прох/хв.

Відповідно до задач дисертаційного дослідження проведено дослідження колієстійкості щебенево-мастикового асфальтобетону з максимальною крупністю зерен 20 мм – ЩМА-20 в залежності від зміни кількості стабілізуючої добавки «АРОН» [493] (0,2 – 0,6 %) на БМП з 3 % полімеру Kraton D1101. Колієстійкість

визначалась при температурі + 50 °С, навантаженні 700 Н та 10000 проходів колеса по одному сліду.

Результати колієстійкості досліджуваного щебенево-мастикового асфальтобетону наведено на рисунку 4.72.

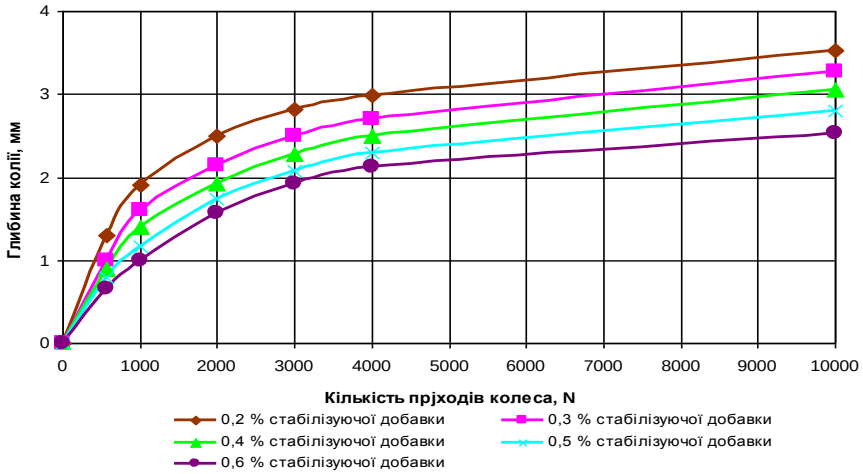


Рисунок 4.72 – Залежність глибини колії від різного кількості стабілізуючого волокна «АРОН» в ЩМА, від кількості проходів колеса

Також встановлено Вплив кількості підґрунтовки та коефіцієнта ущільнення на інтенсивність утворення колії в асфальтобетоні (рис. 4.73, 4.74). З приведених залежностей (рис. 4.73) видно, що від різної кількості підґрунтовки для всіх досліджуваних видів асфальтобетону змінюється глибина колії. Дані результати дозволяють визначатись з оптимальними витратами підґрунтовки між шарами зразка - композиту, а саме для типу А 0,5 л/м^2, типу Б 0,4 л/м^2; для ЩМА 0,6 л/м, що відповідає отриманим результатам міцності зчеплення від кількості підґрунтовки при зсуві. Згідно експериментальних даних (рис. 4.74) виявлено, що суттєво впливає коефіцієнта ущільнення на показник колійності асфальтобетону різних гранулометричних типів (рис. 4.74).

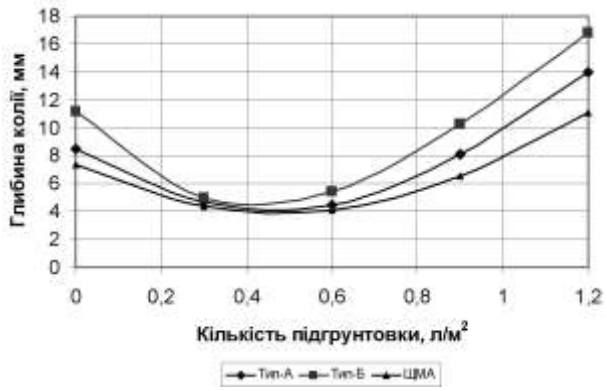


Рисунок 4.73 – Залежність глибини колії від кількості підґрунтовки в асфальтобетонах різних гранулометричних типів після 4000 проходів колеса (при температурі випробувань 60°С).

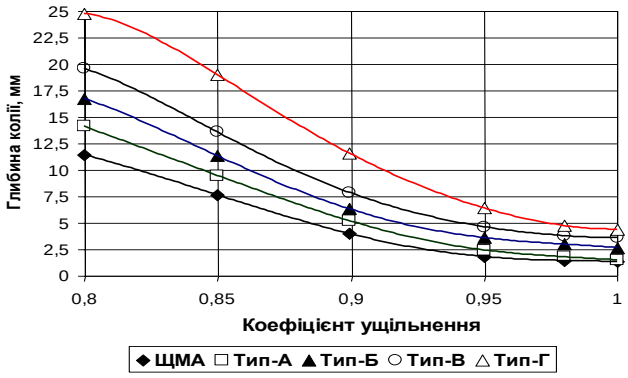


Рисунок 4.74 – Залежність глибини колії від коефіцієнту ущільнення асфальтобетону різних гранулометричних типів при температурі 50 °С і навантаженні на колесо 700 Н

Отримані дані (рис. 4.74) свідчать про необхідність контролювання режиму ущільнення асфальтобетонної суміші і встановлено, що коефіцієнт ущільнення асфальтобетону повинен бути не нижче 0,98.

4.4.7. Результати визначення коефіцієнта колієстійкості досліджуваних асфальтобетонів (додаток Б) у відповідності методу (п. 4.3.6) показали, що асфальтобетон типу Г, В на бітумі БНД 60/90 та БНД 90/130 коефіцієнт колієстійкості перевищує граничне значення (4.24), а інші асфальтобетони (додаток Б) показали значення коефіцієнту нижче одиниці, а саме 0,68 – 0,97. Тому отримані дані необхідно використовувати для теоретичного розрахунку (розділ 3) колії в асфальтобетонному покритті. Даний коефіцієнт дозволить підвищувати колієстійкість асфальтобетонного покриття автодорожніх мостів.

4.4.8. Аналіз результатів досліджень функції колієстійкості асфальтобетону відповідно методики (п.4.3.7) встановлено експериментальні параметри, а саме: параметр a_τ є постійною величиною і рівний одиниці; параметр A_τ є змінною

величиною і змінюється в межах від 0,28 до 0,20 $мм \cdot N$. Параметр A_τ із зменшенням величини, як приклад $A_\tau = 0{,}20$ свідчить про підвищення колієстійкості асфальтобетону, а більше значення $A_\tau = 0{,}28$ свідчить про погіршення колієстійкості як приклад асфальтобетон типу Г. Перевірка адекватності наведена в додатку Е.

4.4.9. Аналіз результатів стендових експериментальних досліджень колієстійкості асфальтобетонного покриття на кільцевому стенді

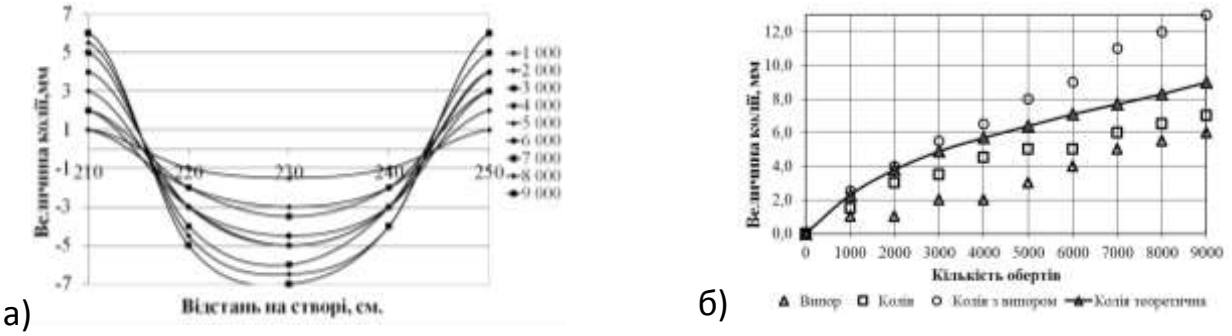
Відповідно п. (4.3.8) При стендових випробуваннях здійснювали проїзди випробувальних транспортних засобів по ділянках, влаштованим ДП «ДОРЦЕНТР», за якими вели спостереження. Витривалість асфальтобетону визначалася шляхом оцінки стійкості покриття до утворення колії під дією проходів електромобілів з навантаженням на кожну вісь, рівну розрахунковій, що склало 11,5 т. Перед початком руху електромобілів і далі після кожних 1000 оборотів стенду (один оборот стенду дорівнює двом проходах електромобілів або чотирьом проходах розрахункових осей по кожному з контрольних створів), проводилися вимірювання поперечного профілю покриття стенду на контрольних створах. Досліджувані конструкції дорожнього одягу наведені в таблиці 4.5.

Результати вимірювань на створах (рис. 4.75), було оброблено і за цими даними побудовані графіки інтенсивності утворення колії, які наведені на рисунку 4.76 – 4.79 [414].

Дослідження на кільцевому стенді проводилося при температурі повітря не нижче +40 °С, що в свою чергу становило +50…55 °С температури асфальтобетонного покриття.

Необхідно відзначити також, що на всіх секціях кільцевої доріжки випробувального стенду з різними типами покриття глибина колії на внутрішньому шляху руху коліс електромобілів більше, ніж на зовнішньому. Це обумовлено тим, що під час руху електромобілів під дією відцентрової сили відбувається перерозподіл навантаження між внутрішніми і зовнішніми колесами електромобілів. З ростом швидкості цей перерозподіл збільшується. Для

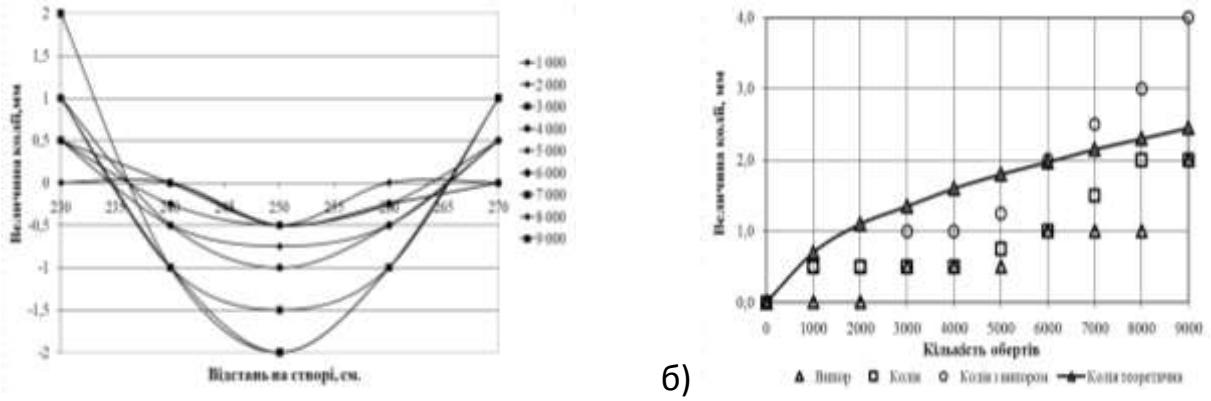
зменшення величини перерозподілу швидкість руху електромобілів під час випробувань була обмежена 20 кілометрами на годину. Дослідження полягали у вивченні поперечного профілю асфальтобетонного покриття на бетонній основі з вимірюванням параметрів колії в залежності від кількості проїздів електромобілів по одному сліду за високих літніх температур (від 45 ^{o}C до 55 ^{o}C). Характерний поперечний профіль та кінетика зміни його характеристик показано на рисунку 4.75.



а) б)

а) - поперечний профіль; б) - кінетики зміни характеристики колії.

Рисунок 4.78 – Залежність утвореної колії в асфальтобетонному покритті, що знаходиться на бетонній основі дорожнього одягу, від кількості проїздів електромобілів



а) б)

а) - поперечний профіль; б) - кінетики зміни характеристики колії.

Рисунок 4.79 – Залежність утвореної колії в асфальтобетонному покритті, що знаходиться на бетонній основі дорожнього одягу, від кількості проїздів електромобілів (конструкції дорожнього одягу на секторі II - II створі, від кількості проходів електромобілів)

Отримані дані свідчать, що із збільшенням кількості навантажень темпи росту глибини колії спочатку стрімко збільшуються, а потім поступово зменшуються (рис. 4.78, рис. 4.79). Зміна висоти випорів на початку характеризується повільними темпами, потім стрімким зростанням, а потім значним сповільненням їх темпів росту. Загальна глибина колії має закономірність аналогічну зміни глибини колії з менш вираженим пониженням темпу росту і має тенденцію до подальшого зростання свого значення. Проведені дослідження зміни щільності асфальтобетону в межах границь колії і в межах границь випорів свідчить про те, що щільність асфальтобетону в зонах випору зменшилась до 20%, а в межах границь колії вона майже не змінилась. При цьому товщина покриття зменшилась на величину глибини колії (на 7 мм). Це свідчить про те, що в межах траєкторії руху пневматичного колеса відбулось горизонтальне деформування асфальтобетону, що спричинило таке деформування суміжних бокових зон покриття, яке сприяло утворення випорів з розрихленням, тобто відбувся ефект дилатансії. В натурних умовах експлуатації асфальтобетонного покриття на мостах розрихлення в зоні випорів, у більшості випадків, не спостерігається у зв’язку з випадковим характером розподілу проїзду пневматичних коліс в межах смуги накату. Це сприяє майже повному доущільненню асфальтобетону на стадії початкового розрихлення в зоні випорів і відновленню його структури за високих літніх температур, про, що свідчать результати натурних випробувань. Результати експериментальних досліджень утворення колії на асфальтобетонному покритті підтвердили відомі дані про характер утворення колії та висунуті припущення в дисертаційній роботі.

З аналізу результатів стендових досліджень, поведінки матеріалу під дією рухомого навантаження в теплу пору року зроблена порівняльна оцінка та визначено найбільш коліємтійку конструкцію дорожнього одягу, можна зробити висновок про наступне: що найменш коліємтійкою конструкцією є конструкція з одним шаром асфальтобетонного покриття (ЩМА - 20) на традиційному бітумному в'яжучому (БНД 60/90). Утворення колії на асфальтобетонному покритті спостерігається вже навіть при проходженні 1000 проходів

електромобіля, що становить 5-2 мм. При проходження 8000-9000 проходів електромобіля, колія на асфальтобетонному покритті стабілізується та становить 23-13 мм, однак відбувається руйнування асфальтобетонного покриття у вигляді розтріскування на випорах.

Більш колієстійкою являється подібна конструкція дорожнього одягу, що складається з двох шарів асфальтобетонного покриття (верхній шар ЩМА-20 на бітумі модифікованому полімером БМП 60/90-52, нижній тип А-20 на традиційному в'яжучому БНД 60/90). Верхній шар покриття влаштований з асфальтобетону аналогічної товщини, як і перша конструкція, однак на бітумі модифікованому полімером. Результати дослідження свідчать, що при проходженні 1000 колія асфальтобетонного покриття становить 1-2 мм, а при 6000 проходів електромобіля, колія асфальтобетонного покриття становить 4-2 мм., що свідчить про більш коліє стійку конструкцію дорожнього одягу. Колія при проходження 9000 проходів електромобіля становить 6-5 мм, що в свою чергу у 3,8-2,6 разів менше, аніж на першій конструкції при аналогічній кількості проходів електромобіля.

За результатами дослідження можна сказати, що для підвищення коліє стійкості асфальтобетонного покриття необхідно використовувати бітум модифікований полімерами, а також при проектуванні використовувати ряд конструктивних заходів, таких як обґрунтований вибір товщини покриття, конструктивних шарів (розділ 6).

4.5 Висновки до розділу

За результатами роботи, наведеними в даному розділі можна зробити наступні висновки:

1. Розроблені методи експериментальних лабораторних, стендових та натурних досліджень, а саме: визначення параметрів термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону; оцінки міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляційним матеріалом і

бетонною основою при зсуві; параметрів оцінки стійкості асфальтобетону до накопичення залишкової деформації; встановлення параметрів кінетики утворення колії асфальтобетонного покриття на бетонній основі кільцевого стенду; контролювання процесу модифікації бітуму полімерами з використанням лабораторної лопатевої мішалки; визначення в натурних умовах температури асфальтобетонного покриття в смузі накату та параметрів утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини;

2. Запропоновано методику обстеження стану покриття автодорожніх мостів та встановлено з результатів натурних дослідження, закономірності накопичення залишкових деформацій у вигляді колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів, які експлуатуються на різних технічних категоріях автомобільних доріг. Запропоновано оцінювати кількість мостів в яких є колія на покритті мостів в залежності від рейтингу та району його експлуатації з відповідною вірогідністю.

3. Встановлено зміну температури в полосі накату асфальтобетонного покриття в залежності від інтенсивності руху транспортних засобів. Дані результати засвідчать про підвищення температури покриття в полосі накату на 3-6 ^{o}C, що суттєво впливає на інтенсивність утворення колії в покритті, отримані дані підтверджуються на практиці.

4. Розроблено метод приготування та контролю бітуму, модифікованого полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки. Отримані результати граничного стану однорідності при модифікації бітуму, різними полімерами дозволили, а також отримані оптимальні витрати їх витрати.

5. Удосконалено метод з визначення функції релаксації та деформації для досліджуваних асфальтобетонів за рахунок пенетрації, температури розм’якшення та індексу пенетрації бітумного в’яжучого. Отримано параметри функції релаксації для досліджуваних асфальтобетонів при різному часу дії навантаження та температурах (від 10^{o} до +60 ^{o}C).

6. Розроблено експериментальний метод визначення виду функції, що відображає вплив комбінації причин утворення колії від внутрішніх факторів, та її

параметри, а також експериментальний параметр, що відображає вплив циклічного навантаження на утворення колії в асфальтобетоні при повторному проїзді колеса. Він полягає у використанні секторного пресу для створення зразків, що імітують конструкцію асфальтобетонного покриття мостів із залізобетонною плитою із застосуванням певної комбінації внутрішніх факторів.

7. Запропоновано експериментальний метод визначення міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям і бетонною основою. Даний метод дозволяє підбирати різні гідроізоляційні матеріали та оптимальну витрату підґрунтовки для максимального зчеплення асфальтобетонних шарів та покриття з жорсткою осново автодорожнього мосту.

8. Удосконалено метод визначення показника стійкості до накопичення залишкових деформацій в асфальтобетоні. Запропоновано при лабораторному випробуванні умову граничного стану глибини колії для досліджуваних асфальтобетонів, який становить 5 мм.

9. Експериментальні дослідження показали, що на підвищення колієстійкості асфальтобетону впливає максимальний розмір щебеню, кількість полімерної добавки, а також в’язкість бітумного в’яжучого. Досліджено різні види асфальтобетонів, та вмісту максимального розміру щебеню 20 мм для типів А, Б, В, Г і Щебенево-мастиковий асфальтобетон, для асфальтобетону литого «Гусасфальт» розміром щебеню 15 мм вони мають підвищену колієстійкість.

10. Отримані результати дослідження впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини.

11. - Визначенні параметри термов’язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону, характеристики колієутворення, температуру асфальтобетонного покриття в смузі накату, міцність зчеплення між асфальтобетоном та залізобетонною основою при зсуві.

12. Встановлено, що недостатнє зчеплення істотно впливає на утворення колії в асфальтобетонному покритті. Для випробуваних складів асфальтобетону

(зразка-композиту) оптимальна витрата підґрунтовки складає від 0,4 л/м^2 до 0,6 л/м^2 і значно залежить від виду асфальтобетону.

13. Одержані порівняльні результати випробування асфальтобетонів типів А, Б, В, Г (з максимальним розміром щебеню від 5 до 20 мм), щебенево-мастикових асфальтобетонів (ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20) та литих асфальтобетонів (ЛА-10, ЛА-15), із яких випливає, що мінімальне значення глибини колії спостерігається для ЩМА-20.

14. Запропоновано методику визначення коефіцієнта коліестійкості асфальтобетону. Експериментально встановлені значення коефіцієнту коліестійкості асфальтобетону для асфальтобетонів типів А, Б, та ЩМА він становить 0,68 – 0,97, а для типів В, Г більше одиниці.

15. Запропоновано методику з визначення параметрів функції коліестійкості асфальтобетону. З аналізу результатів досліджень функції коліестійкості асфальтобетону встановлено експериментальні параметри, а саме: параметр a_τ є постійною величиною і дорівнює одиниці; параметр A_τ є змінною величиною і змінюється в межах від 0,28 до 0,20 мм. Параметр A_τ із зменшенням величини, як приклад $A_\tau = 0{,}20$ свідчить про підвищення стійкості асфальтобетону до утворення колії, а більше значення $A_\tau = 0{,}28$ свідчить про погіршення стійкості, як приклад асфальтобетон типу Г.

16. Основні результати досліджень четвертого розділу висвітлено в роботах автора: [5, 341-343, 370, 394, 409, 410-419, 421-425, 428-431, 433-438, 440-443, 454].

РОЗДІЛ 5
ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ УТВОРЕННЯ КОЛІЇ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ АВТОДОРОЖНІХ МОСТІВ

5.1 Оцінка впливу основних факторів на зміну глибини колії в асфальтобетонному покритті

У результаті аналізу факторів, які впливають на зміну глибини колії в асфальтобетонному покритті, необхідно визначити, які з них найбільш суттєво впливають на колієутворення.

До факторів які суттєво впливають на процес колієутворення належать: кількість щебеню в асфальтобетоні; навантаження від дії колеса на покриття; температура покриття; швидкість проходу колеса по зразку. Серед них найменш дослідженими є кількість щебеню в покритті, навантаження на нього, швидкість руху колеса та зміна температури в покритті. Вплив згаданих факторів безперечно досліджувався, однак завданням є виконати дослідження в більш широких межах зміни параметрів та дослідити закономірності їх сумісного взаємовпливу. В табл. 5.1. наведено фактори впливу та межі їх варіювання.

Таблиця 5.1 – Варіювання зміни факторів

Належні змінні		Один. вим	Рівні варіювання			Інтервал варіювання, Δi
			Верхній +	Основний 0	Нижній -	
X1	Кількість щебеню, Щ	%	70	35	0	35
X2	Навантаження на покриття, p	МПа	0,9	0,7	0,5	0,2
X3	Швидкість проходу колеса, v	м/с	30	20	10	10
X4	Температура, T	°C	65	55	45	10

Задача визначення та забезпечення мінімального значення глибини колії під впливом багатьох факторів виглядає доволі складною та у подібній постановці до цього часу є не розв’язаною.

Розв’язок цієї задачі аналітичними методами є доволі проблематичним. Перш за все тому, що асфальтобетон не є однорідним матеріалом. Рішення задачі в подібній постановці потребує прийняття цілого ряду додаткових обмежень та припущень. Викладене неодмінно формалізує та ідеалізує постановку задачі, результати рішення якої апріорі будуть відрізнятися від реальної картини утворення колії.

Найбільш об’єктивні дані можна отримати завдяки даним отриманим за допомогою фізичного експерименту. При зміні значень будь яких вихідних факторів є можливість отримання функціональної залежності зміни глибини колії від зміни цього фактору. Визначення глибини колії від зміни декількох факторів потребує проведення факторних експериментів з об’єктивним вибором комбінацій значень необхідних параметрів.

Таблиця 5.2 – Матриця планування експерименту

Номер досліду		Фактори								Відгук
		X1		X2		X3		X4		Y1
Вершини гіперкуба (ядро плана 2^n)	1	-1	0	-1	0,5	-1	10	-1	45	3,4
	2	+1	70	-1	0,5	-1	10	-1	45	1,7
	3	-1	0	+1	0,9	-1	10	-1	45	7,3
	4	+1	70	+1	0,9	-1	10	-1	45	3,6
	5	-1	0	-1	0,5	+1	30	-1	45	1,6
	6	+1	70	-1	0,5	+1	30	-1	45	0,9
	7	-1	0	+1	0,9	+1	30	-1	45	3,5
	8	+1	70	+1	0,9	+1	30	-1	45	1,9
	9	-1	0	-1	0,5	-1	10	+1	65	29,4
	10	+1	70	-1	0,5	-1	10	+1	65	12,0
	11	-1	0	+1	0,9	-1	10	+1	65	43,2
	12	+1	70	+1	0,9	-1	10	+1	65	17,6
	13	-1	0	-1	0,5	+1	30	+1	65	13,4
	14	+1	70	-1	0,5	+1	30	+1	65	5,4
	15	-1	0	+1	0,9	+1	30	+1	65	19,6
	16	+1	70	+1	0,9	+1	30	+1	65	8,0
Зіркові точки	17	+1	70	0	0,7	0	20	0	55	4,6
	18	-1	0	0	0,7	0	20	0	55	10,2
	19	0	35	+1	0,9	0	20	0	55	9,0
	20	0	35	-1	0,5	0	20	0	55	6,1
	21	0	35	0	0,7	+1	30	0	55	6,1
	22	0	35	0	0,7	-1	10	0	55	12,2
	23	0	35	0	0,7	0	20	+1	65	15,3
	24	0	35	0	0,7	0	20	-1	45	2,8
Центр плана	25	0	35	0	0,7	0	20	0	55	7,3

У результаті можна отримати математичну модель зміни глибини колії від зміни зовнішніх факторів типу:

$$y = f(x_1, x_2, ...x_n) \tag{5.1}$$

де y – функція відгуку, у даному випадку глибина колії;

x – фактори, що впливають на глибину колії.

Отримання моделі вказаного виду дозволить всебічно проаналізувати зміну глибини колії при зміні значень вхідних параметрів. Це дасть змогу в кінцевому рахунку визначити раціональну комбінацію значень вхідних параметрів, які забезпечать мінімальне значення утворення колії.

Побудова математичних моделей глибини колії виду (5.1) можлива лише на основі одержаних даних факторних експериментів, фізичних або чисельних. Існує велика кількість варіантів планів проведення факторних експериментів [494]. Із [370, 494 – 498] випливає, що оптимальними для вирішення поставлених задач є плани другого порядку. Більш детально вибір плану та рівняння регресії наведено в додатку Б.

За результатами виконаних досліджень вдалося отримати максимальні значення глибини колії $h_к$, в залежності від вмісту щебеню в покритті (X_1), навантаження на нього (X_2), швидкості руху колеса (X_3) та температури покриття (X_4). За отриманими результатами, застосувавши поліноміальну модель для *4*-змінних факторів, було отримано рівняння регресії для визначення зміни глибини колії.

$$h_к^{п.м} = 7{,}46 - 4{,}22 \cdot x_1 + 2{,}21 \cdot x_2 - 3{,}89 \cdot x_3 + 7{,}62 \cdot x_4 + 0{,}36 \cdot x_1^2 + 1{,}67 \cdot x_3^2 + 1{,}6 \cdot x_4^2 + \\ + 1{,}66 \cdot x_1 \cdot x_3 - 3{,}43 \cdot x_1 \cdot x_4 + 1{,}2 \cdot x_2 \cdot x_4 - 3 \cdot x_3 \cdot x_4. \tag{5.2}$$

Оскільки отримана математична модель є емпіричною (статистичною), це зумовлює обов'язкове виконання статистичного аналізу її результатів.

Правильна обробка та використання результатів експериментальних досліджень можливі тільки у випадку, коли дисперсії в кожній точці досліду однакові (однорідні). Перевірка однорідності дисперсій виконується на основі [370, 494 – 498] (додаток Б). Перевірку одержаної математичної моделі (5.2) визначення глибини колії, на однорідність дисперсій (за критерієм Кохрена), значущості коефіцієнтів регресії (за критерієм Стьюдента), адекватності отриманого рівняння (за критерієм Фішера), виконано на основі викладеної методики. Результати зведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Перевірку математичної моделі на однорідність дисперсій, значущості коефіцієнтів регресії, адекватності отриманого рівняння

Перевірка однорідності дисперсій (за критерієм Кохрена)	
Сума всіх оцінок дисперсій S^2сум	2,655914
Максимальне значення виборки дисперсії S^2max	0,4804668
Однорідність дисп. за крит. Кохрена Gp = S^2max/S^сум	0,18090
Табл. Крит. Кохрена Gт при a=0,05 f1=n-1=3 та f2=N=24	0,27050
Умова однорідності дисперсій Gp < Gт	виконується

Перевірка значущості коеф. регресії (за критерієм Стьюдента)	
Кількість дослідів матриці експерименту - N	24
Повторність замірів - n	3
Число ступенів вільності дисп. Fвоспр	48
Табличне значення критерію Стьюдента при a = 0,05	2,04
Сума воспр. дисперсій (помилка) Sвоспр^2 = S^2сум/ N	0,1106631
Критерій Стьюдента (похиб. Коеф.)	0,004611
Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії Δb	0,1385243
У рівнянні регресії залиш. коеф. для яких виконується умова	|bi| > |Δb|

Перевірка адекватності спрощеного рівн. регресії (за крит. Фішера)	
Кількість членів у рівн. регресії, що залишилися після оцінки L	14
Сума оцінок дисперсій скорегованого рівн. регрес. SS^2сум	0,0020962
Дисперсія адекватности Sад^2 = (n/N-L)*SS^2сум	0,0006289
Критерій Фішера Fp = Sад^2/ Sвоспр^2	0,0056826
Число ступенів вільності дисперсії адекватності fад = N - L	10
Число ступенів вільності fo = N(n - 1)	48
Табличне значення критерія Фішера Fт при a = 0,05	2,3
Умова адекватності рівняння регресії Fp < Fт	виконується

Аналіз отриманих результатів свідчить, про те, що отримана математична модель адекватно описує зміну глибини колії під впливом зазначених факторів. Аналіз математичної моделі (5.2) дозволяє встановити ступінь впливу вихідних факторів X1…X4 на зміну значень глибини колії. На рис. 5.2. наведено порівняння значущості вихідних факторів та їх комбінацій: X_1 – вмісту щебеню в покритті,%; X_2 – навантаження на покриття, *МПа*; X_3 – швидкості руху колеса, *м/с*; X_4 – температура покриття, °*С*.

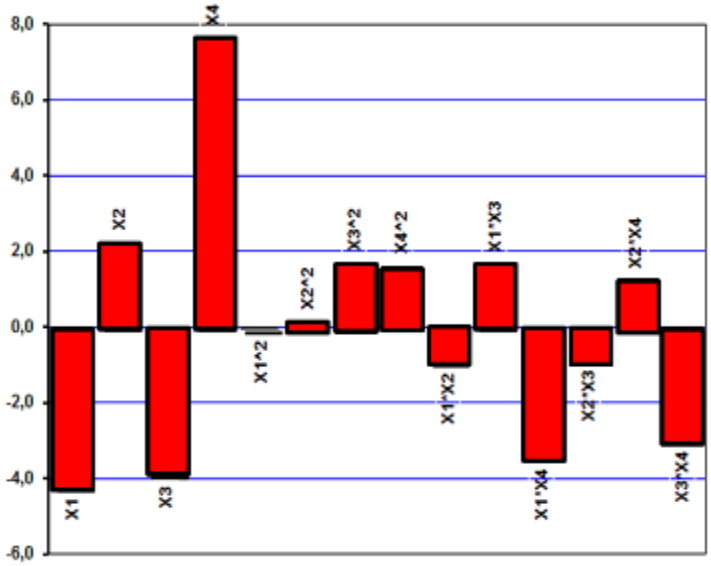


Рисунок 5.2 – Відносне порівняння ступеня впливу вихідних факторів X1…X4 та їх комбінацій на зміну значень глибини колії

Знак «+» чи «–», у рівнянні (5.2) та на рис. 5.2 свідчить про збільшення, або зменшення глибини колії від дії зазначеного фактору.

Аналіз ступеня впливу вихідних факторів X1…X4 та їх комбінацій на зміну значень глибини колії в асфальтобетонному покритті дозволяє зробити висновки про те, що найбільший вплив на зростання глибини колії чинить збільшення температури покриття та в деякій мірі збільшення навантаження на покриття.

Зменшення кількості щебеню та збільшення швидкості руху, призводить до зростання глибини колії. Також мають вплив зміна кількості щебеню в поєднанні зі зміною температури (рис. 5.2) та поєднання факторів швидкості руху колеса і

температури покриття (рис. 5.2). За результатами виконаних досліджень наведемо графічні залежності зміни глибини колії $h_к$ під впливом зазначених факторів. Отримано закономірність (рис. 5.3) зміни глибини колії в залежності від тиску X2 на покриття та зміни кількості щебеню X1 (при цьому значення швидкості прийнято мінімальним (x3=-1 (10 м/с), а температура середня (x4=0 (55°C). При цьому глибина колії закономірно зростає зі зменшенням кількості щебеню та з ростом тиску колеса на покриття.

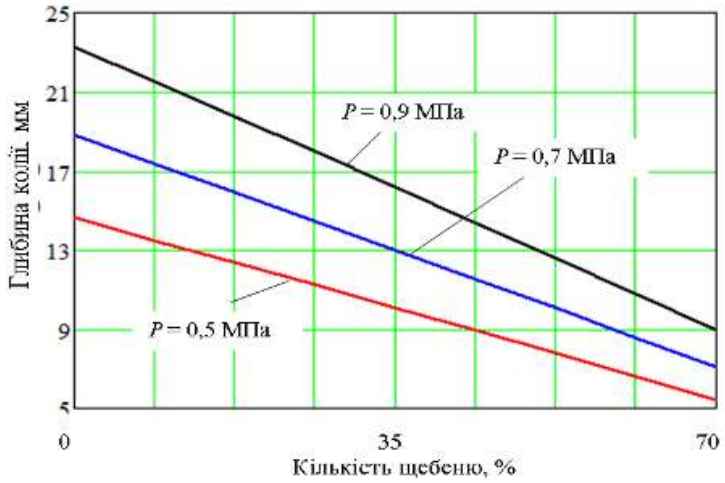


Рисунок 5.3 – Закономірності зміни глибини колії в залежності від тиску на покриття та кількості щебеню

Також отримано (рис. 5.4) більш складні умови поєднання факторів, а саме закономірність зміни глибини колії в залежності від тиску X2 на покриття та зміни температури X4 (при цьому значення швидкості прийнято мінімальним (x3=-1 (10 м/с), а кількість щебеню прийнята мінімальна (x1= -1 (0%). При таких умовах глибина колії зростає практично вдвічі, в порівнянні з попередніми умовами, де максимальне значення глибини колії було 23 мм, а при нинішніх умовах 42 мм. При цьому ріст навантаження на покриття впливає на зміну глибини колії незначно (рис. 5.4.), а збільшення температури покриття на кожні 10°C призводить до збільшення глибини колії в тричі (з 8 мм до 24 мм), та зростання ще на 10°C збільшує глибину колії майже вдвічі (з 24 мм до 42 мм).

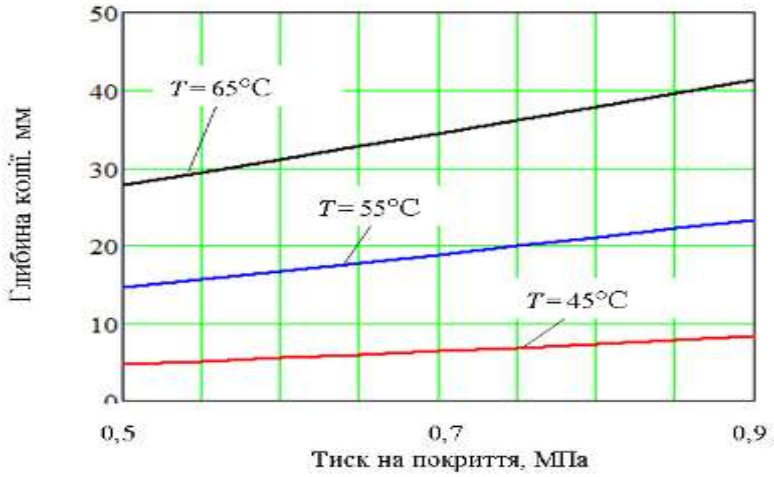


Рисунок 5.4 – Закономірності зміни глибини колії в залежності від тиску на покриття та температури покриття

Отримана прогнозна регресійна модель (5.2) дозволяє проаналізувати вплив будь-яких факторів на зміну вихідного параметру. Як наведено на рис. 5.5. вплив факторів на зміну глибини колії в залежності від параметра x1 (кількості щебеню). Закономірно, що його зменшення призводить до утворення більшої колії. Але при цьому ми можемо визначити за яких умов можна досягти глибини колії від 45 мм до 5…10 мм.

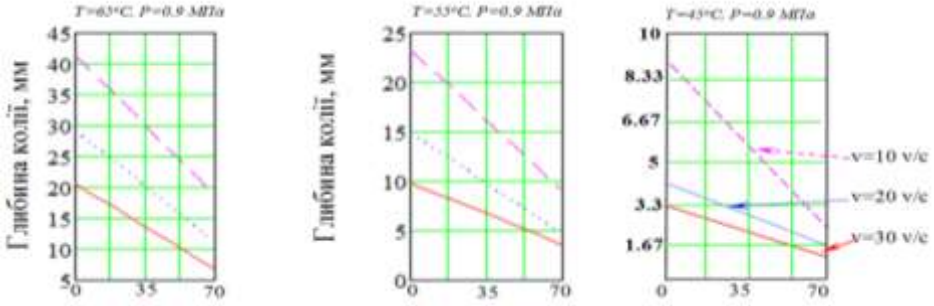


Рисунок 5.5 – Закономірності зміни глибини колії в залежності від кількості щебеню

Аналогічно можна відслідкувати вплив температури, як найбільш впливового фактора на зміну глибини колії (рис. 5.6).

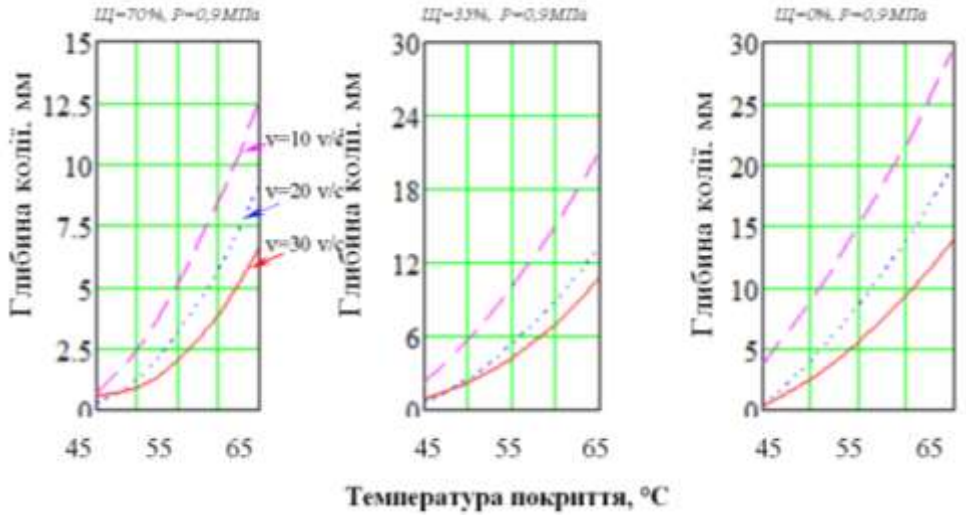
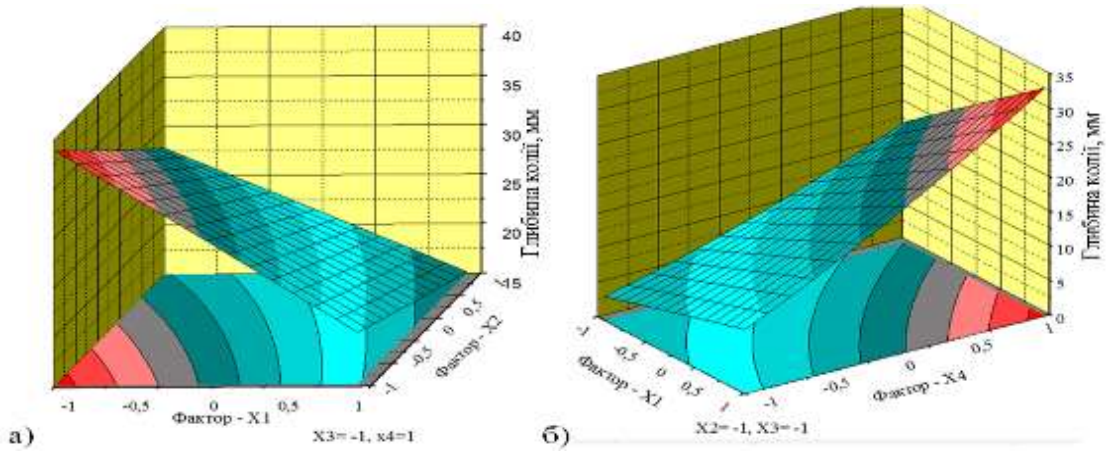


Рисунок 5.6 – Закономірності зміни глибини колії в залежності від температури покриття

Для всебічного аналізу впливу факторів було побудовано матриці з даними щодо оцінки глибини колії від кількості щебеню (X1) і тиску на покриття X2 (рис. 5.7, а) та від кількості щебеню (X1) і температури покриття X4 (рис. 5.7, б).



а – від кількості щебеню (X1) і тиску на покриття X2; б – від кількості щебеню (X1) і температури покриття (X4)

Рисунок 5.7 – Залежність глибини колії

Аналіз тривимірних побудов (рис. 5.7), дозволяє наочно побачити взаємовплив кількості щебеню, тиску та швидкості прикладання навантаження на покриття при зміні його температури на зміну глибини покриття та підтвердити

висновок про те, що збільшення кількості щебеню при мінімальній температурі покриття дозволить досягти мінімального колієутворення.

Практично всі фактори впливають на зміну глибини колії лінійно, однак вплив швидкості прикладання навантаження показує, що при цьому глибина колії змінюється за параболічною залежністю (рис. 5.8).

Однак завданням будь-якого дослідження є виявлення раціональних параметрів змінних факторів, при якому значення вихідного параметра буде наближатися до найкращого (мінімальна глибина колії). Отримано закономірності зміни глибини колії (рис. 5.9.) в залежності від температури та швидкості прикладання навантаження та встановлено умови, коли можливо досягти мінімального значення глибини колії.

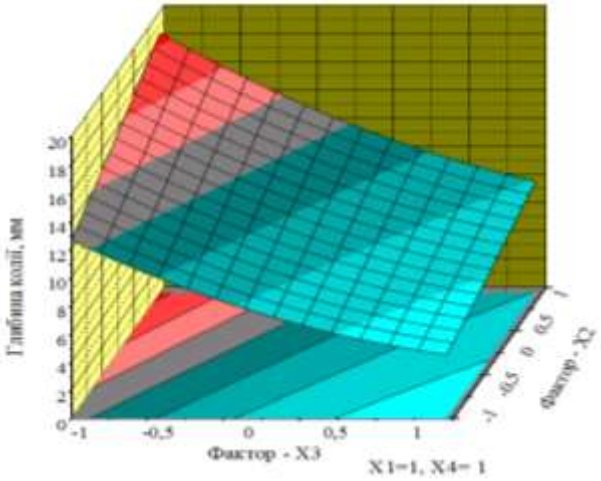


Рисунок 5.8 – Залежність глибини колії від швидкості руху колеса по покриттю (X3) та тиску на покриття X2

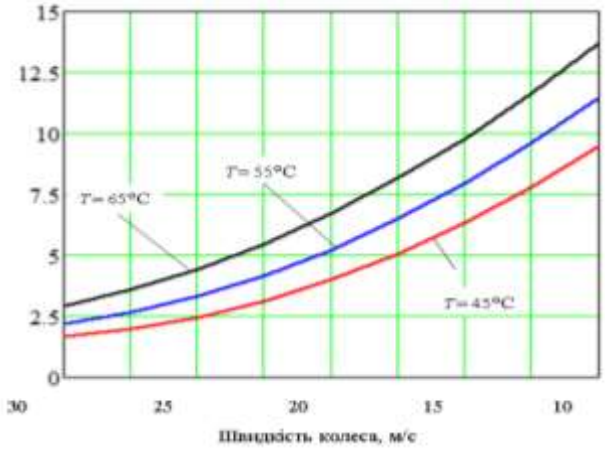


Рисунок 5.9 – Закономірності зміни глибини колії в залежності від температури та швидкості прикладання навантаження

Мінімального значення глибини колії (від 0 до 4 мм) можливо досягти при умові, коли X1=1 (70% щебеню), X4=-1 (45°C), при швидкості колеса X3=-0,25 близько (18 м/с) та мінімальному значенню тиску на поверхню X2=-1 (0,5 МПа).

5.2 Вплив різних факторів на пропорційну глибину колієутворення

Результати експериментальних досліджень властивостей асфальтобетонів різних типів при оптимальному вмісті в'яжучого, які були виготовлені з використання бітумів нафтових дорожніх марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130 показують, що зі збільшенням пенетрації бітуму спостерігається зростання пропорційної глибини колієутворення. Так, наприклад, для дрібнозернистого асфальтобетону типу Б-10 (рис. 5.10) на бітумі БНД 40/60 при тиску 0,6 МПа характерна в 2,8 разів менша пропорційна глибина колієутворення (PRD_{air}), у порівнянні з асфальтобетоном типу Б-10, виготовленому на бітумі БНД 90/130. В той же час, порівняльний аналіз залежності тиску і пропорційної глибини колії показує, що для асфальтобетону типу Б-10, виготовленому на бітумі БНД 60/90 зі збільшенням тиску з 0,6 до 1,1 МПа, пропорційна глибина колієутворення зростає на 4,4 % або в 5 разів.

За аналогічної температури спостерігається подібна залежність і для асфальтобетону типу Б-20 (рис. 5.11), так на бітумі БНД 40/60 при тиску 0,6 МПа характерна в 2,6 разів менша пропорційна глибина колієутворення (PRD_{air}), у порівнянні з асфальтобетоном типу Б-20, виготовленому на бітумі БНД 90/130. В той же час, при збільшенні тиску відповідно збільшується пропорційна глибина колії, так для асфальтобетону типу Б-20, виготовленому на бітумі БНД 60/90 зі збільшенням тиску з 0,6 до 1,1 МПа, пропорційна глибина колієутворення зростає на 2,7 % або в 3,84 разів. Порівнюючи дані отримані для асфальтобетону типу Б-10 і Б-20 можливо відмітити для асфальтобетону типу Б-20 меншу швидкість наростання пропорційної глибини колієутворення, окрім того цей показник має менші значення, наприклад, асфальтобетон типу Б-20 виготовлений на бітумі БНД 60/90 при тиску 0,9 МПа має показник пропорційної глибини колієутворення 1,49 %, а для асфальтобетону типу Б-10 при аналогічних умовах цей показник складає 2,2 %, що 1,5 рази більше.

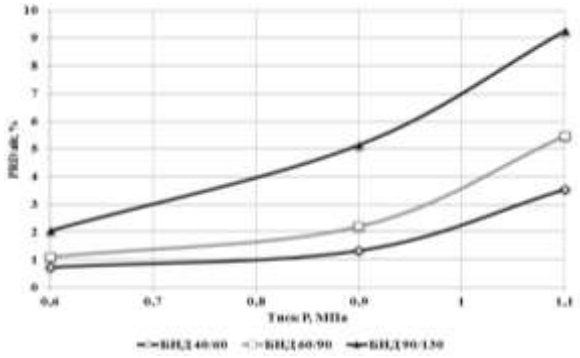


Рисунок 5.10 – Залежність пропорційної глибини колієутворення асфальтобетону типу Б-10 (огумлене колесо) за температури + 55 °С від пенетрації в’яжучого та при різному тиску

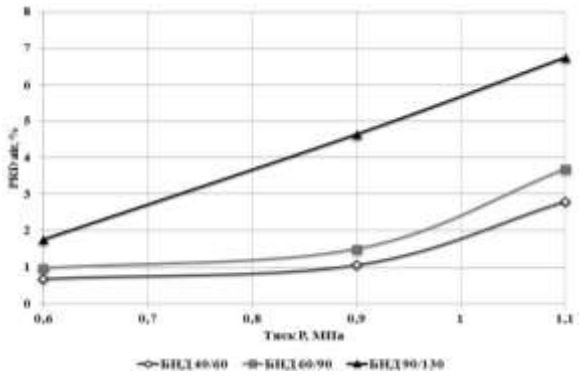


Рисунок 5.11 – Залежність пропорційної глибини колієутворення асфальтобетону типу Б-20 (огумлене колесо) за температури + 55 °С від пенетрації в’яжучого та при різному тиску

Оцінюючи вплив різних параметрів на пропорційну глибину колієутворення ЩМА-20 (рис. 5.12) можливо відмітити, що найменше значення матиме ЩМА-20 виготовлений на основі полімербітумного в’яжучого Полігум.

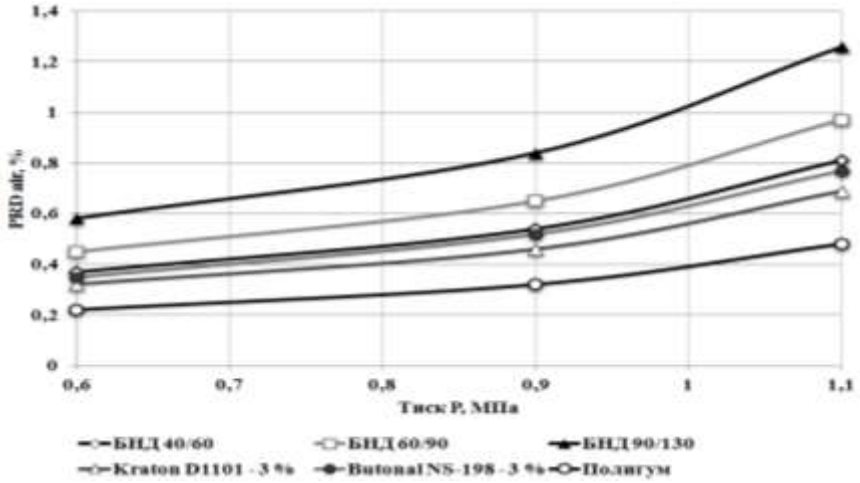


Рисунок 5.12 – Залежність пропорційної глибини колієутворення асфальтобетону типу ЩМА-20 (огумлене колесо) за температури + 55 °С від пенетрації в’яжучого та при різному тиску

Так при тиску 0,9 МПа його значення буде в 1,7 разів менше, ніж у ЩМА-20 виготовленого на основі БНД 40/60, в 2,0 рази менше, ніж у ЩМА-20, що виготовлений на основі БНД 60/90, в 2,6 разів менше, порівнюючи з ЩМА-20, що виготовлений на основі БНД 90/130, в 1,4 разів менше в порівнянні з ЩМА-20, що виготовлений на основі Kraton D1101 3%, та в 1,62 разів менше, ніж при використання Butonal NS-198 3%. Використання полімерних добавок дозволяє зменшити пропорційну глибину колійності щебенево-мастикового асфальтобетону, так для ЩМА-20 на бітумі БНД 90/130, при збільшенні тиску з 0,6 до 1,1 МПа цей показник зросте на 0,68 %, а для ЩМА-20 на основі полімербітумного в'яжучого Полігум при аналогічних умовах цей показник збільшиться на 0,26 %.

Аналіз отриманих даних для інших типів асфальтобетонів – А-10, А-20, Б-10, Б-20, В-10, В-20 та ЩМА-20 (табл. 5.4) при тиску 0,7 МПа при використанні звичайних і модифікованих бітумів показує, що найменші значення показника пропорційної глибини колієутворення має асфальтобетон типу А-20 та ЩМА-20 виготовлені на основі полімербітумного в'яжучого Полігум (відповідно 0,27 та 0,29 %), а найбільший – дрібнозернистий асфальтобетон типу В-10, виготовлений на основі БНД 90/130 (4,6 %).

Таблиця 5.4 – Показник пропорційної глибини колієутворення PRD_{air} асфальтобетонів різних типів при тиску 0,7 МПа та температурі + 55 °С

Вид бітумного в'яжучого	Тип асфальтобетону							
	А-10	А-20	Б-10	Б-20	В-10	В-20	ЩМА-10	ЩМА-20
Kraton D1101 – 3%	0,85	0,51	1,02	0,87	1,03	0,84	0,88	0,41
Полигум	0,52	0,27	0,56	0,44	0,57	0,46	0,50	0,29
Butonal NS 198 – 3 %	0,92	0,57	1,09	0,91	1,19	0,91	0,99	0,46
БНД 40/60	1,01	0,63	1,13	0,94	1,33	1,03	1,05	0,49
БНД 60/90	1,38	0,84	1,42	1,33	1,85	1,40	1,49	0,59
БНД 90/130	3,22	1,36	3,37	2,59	4,60	3,64	2,84	0,76

Одержані результати дозволяють стверджувати, що застосування бітумів, модифікованих полімерами (Butonal NS 198, Kraton D1101) та Полігум для

приготування асфальтобетонних сумішей суттєво збільшує стійкість до накопичення залишкових деформацій, а отже зменшує пропорційну глибину колієутворення.

Значний вплив на показник пропорційної глибини колієутворення має вміст щебеню (рис. 5.13), так при збільшенні вмісту щебеню з 30 до 70 % при тиску 1,0 МПа показник пропорційної глибини колієутворення зменшиться в 2,2 разів, що відповідно обумовлено контактною структурою асфальтобетону.

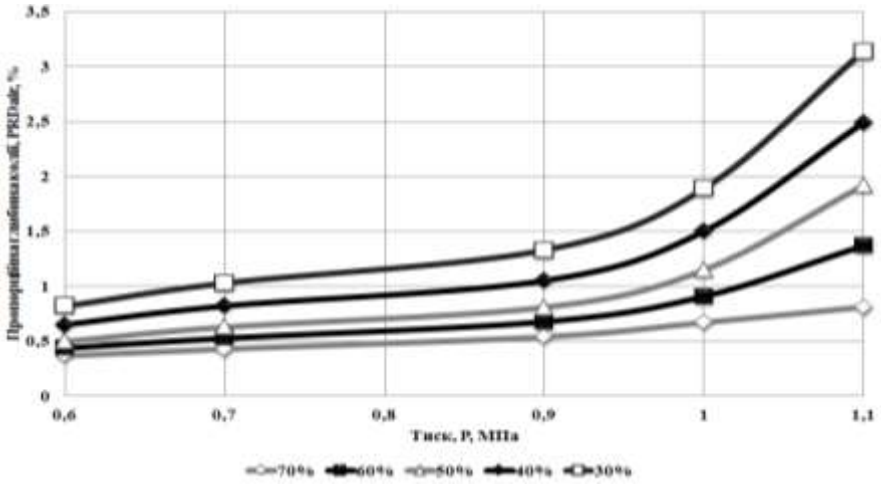


Рисунок 5.13 – Залежність пропорційної глибини колієутворення PRD_{air} за температури + 55 °С асфальтобетонів з різним вмістом щебеню при різному тиску, виготовлених на основі бітуму БНД 40/60

5.3 Вплив різних в’яжучих на глибину утворення колії асфальтобетонів різних типів

Результати впливу бітумного в’яжучого на глибину утворення колії досліджуваних асфальтобетонів при N=10000 проходів огумленого колеса при навантаженні 0,7 МПа та температурі 55 ^{o}С наведено на рис. 5.14 – 5.25 [370, 409, 419, 424, 425, 429, 436, 440].

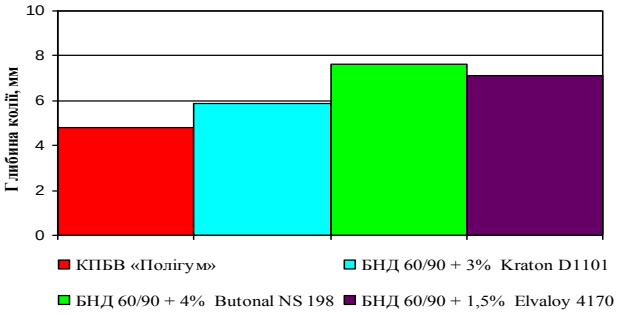


Рисунок 5.14 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії литого асфальтобетону ЛА-10 при N=10000 проходів колеса

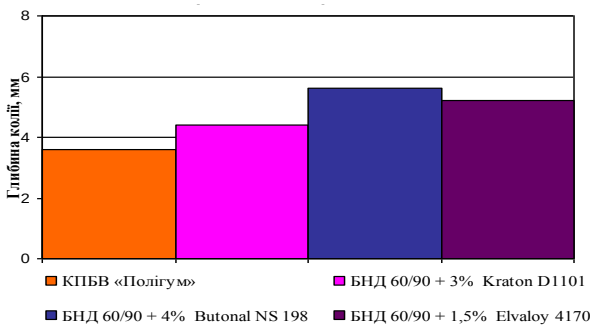


Рисунок 5.15 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії литого асфальтобетону ЛА-15 при N=10000 проходів колеса

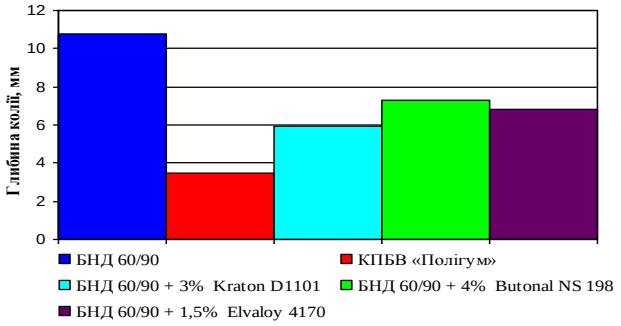


Рисунок 5.16 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії щебенево-мастикового асфальтобетону ЩМА-10 при N=10000 проходів колеса

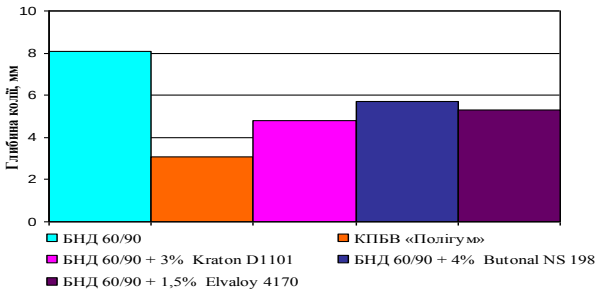


Рисунок 5.17 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії щебенево-мастикового асфальтобетону ЩМА-15 при N=10000 проходів колеса

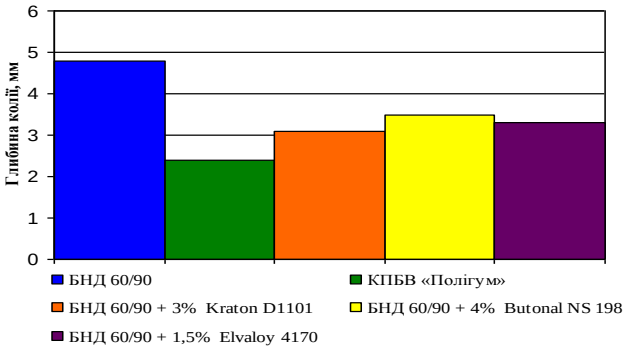


Рисунок 5.18 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії щебенево-мастикового асфальтобетону ЩМА-20 при N=10000 проходів колеса

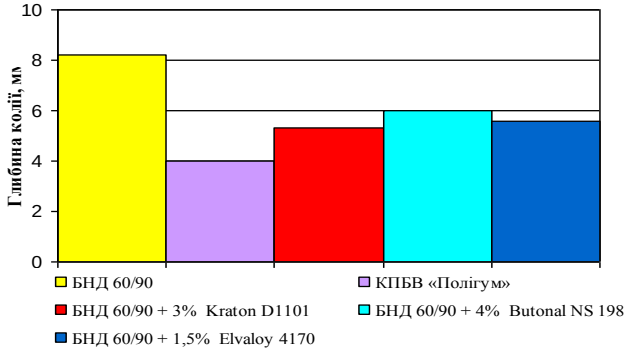


Рисунок 5.19 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону дрібнозернистого типу А-10 при N=10000 проходів колеса

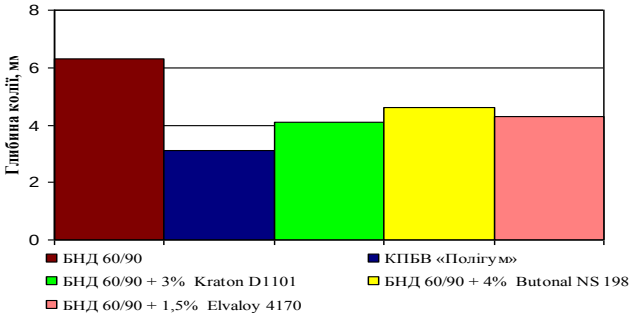


Рисунок 5.20 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону дрібнозернистого типу А-20 при N=10000 проходів колеса

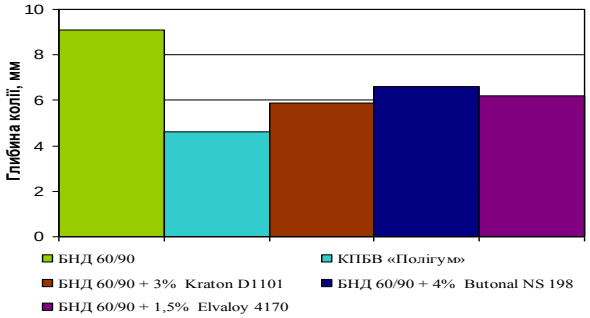


Рисунок 5.21 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону дрібнозернистого типу Б-10 при N=10000 проходів колеса

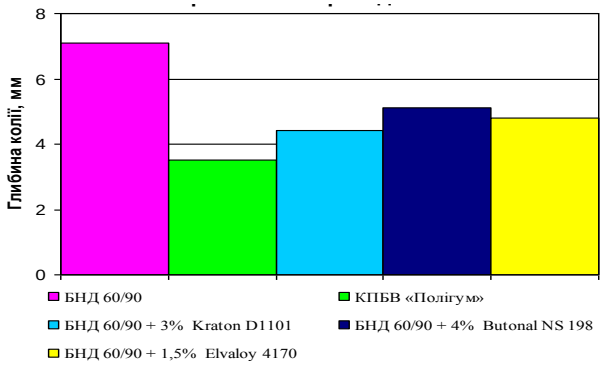


Рисунок 5.22 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону дрібнозернистого типу Б-20 при N=10000 проходів колеса

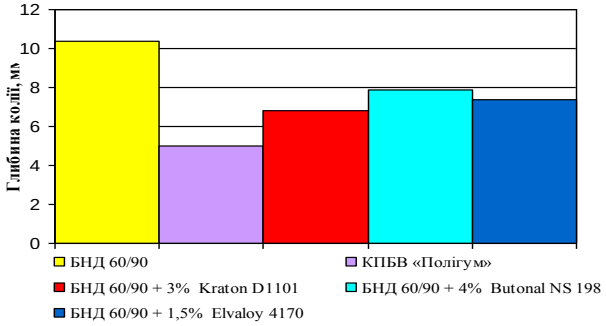


Рисунок 5.23 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону дрібнозернистого типу В-10 при N=10000 проходів колеса

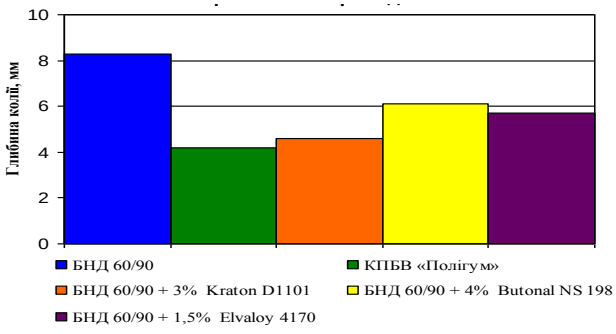


Рисунок 5.24 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону дрібнозернистого типу В-20 при N=10000 проходів колеса

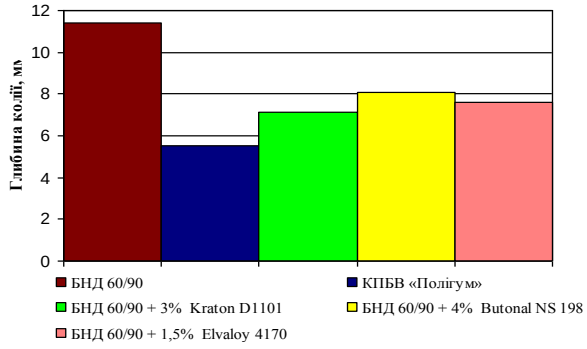


Рисунок 5.25 – Вплив бітумного в'яжучого на глибину утворення колії асфальтобетону піщаного типу Г при N=10000 проходів колеса

Встановлено, що при використанні різних в'яжучих найменшу глибину колії для всіх досліджуваних типів асфальтобетонів матиме комплексне полімербітумне в'яжуче «Полігум». Використання КПБВ «Полігум» для дрібнозернистого асфальтобетону типу Б-20 (рис. 5.22) призводить до зменшення глибини колії після 10000 проходів колеса, наприклад, в 1,3 рази менше, якщо використовувати в'яжуче БНД 60/90 + 3 % Kraton D1101, в 1,34 рази менше у порівнянні з в'яжучим БНД 60/90 + 1,5 Elvaloy 4170, в 1,38 рази менше у порівнянні з в'яжучим БНД 60/90 + 4 % Butonal NS 198, в 1,9 разів менше при використанні в'яжучого БНД 60/90. Порівнюючи глибину колії після 10000 проходів колеса для різних типів асфальтобетонів при використанні в'яжучого БНД 60/90 + 3 % Kraton D1101, найменшу має щебенево-мастиковий асфальтобетон ЩМА-20 – 3,1 мм, що в 1,34 рази менше, ніж для дрібнозернистого асфальтобетону типу А-20, в 1,42 рази менше, ніж для дрібнозернистого асфальтобетону типу Б-20, в 1,45 разів менше, ніж для литого асфальтобетону ЛА-15, в 1,48 разів менше, ніж для дрібнозернистого асфальтобетону типу В-20, в 1,53 рази менше, ніж для щебенево-мастикового асфальтобетону ЩМА-15, в 1,74 разів менше, ніж для дрібнозернистого асфальтобетону типу А-10, в 1,87 разів менше, ніж для литого асфальтобетону ЛА-10, в 1,89 разів менше, ніж для дрібнозернистого асфальтобетону типу Б-10, в 1,93 рази менше, ніж для щебенево-мастикового асфальтобетону ЩМА-10, в 2,1 рази менше, ніж для дрібнозернистого асфальтобетону типу В-10 та в 2,26 разів менше у порівнянні з піщаним асфальтобетоном типу Г.

5.4 Аналіз впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті при чисельному моделюванні

Використовуючи математичну модель (розділ 3) для прогнозу глибини колії на покриті автодорожніх мостів та встановлені експериментальні параметри термов'язкопружнопластичних характеристик асфальтобетону було здійснено чисельний аналіз впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на її утворення.

Результати аналізу наведені нижче.

Вплив температури на інтенсивність утворення колії в асфальтобетоні різної гранулометрії. У відповідності теорії та методу розрахунку колії (розділ 2, 3) проведено чисельний аналіз інтенсивності утворення глибини колії в одношаровому асфальтобетонному покритті (на бітумі БМП 40/60-52), що влаштоване на наплавну гідроізоляції автодорожнього мосту, при кількості проїзду транспортного засобу N=30000 під дією p=0,7 МПА, H=10 см. Глибини колії в асфальтобетонному покритті різних типів на БНД 40/60 наведено на рис. 5.26.

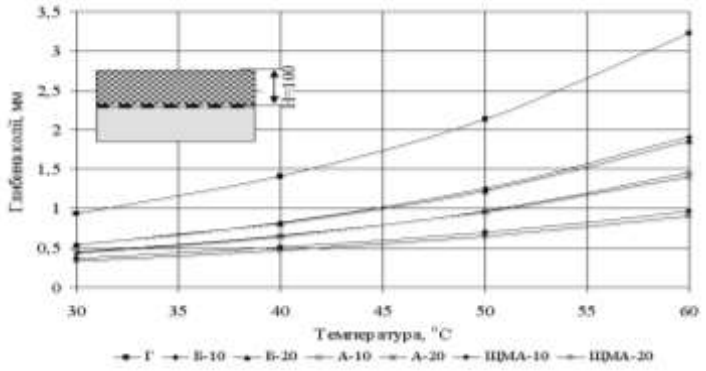


Рисунок 5.26 – Залежність глибини колії в асфальтобетоні від температури при дії навантаження p=0,7 МПа пневматичного колеса транспортного засобу на покриття при інтенсивності руху N=30000

Вплив температури на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті від дії навантаження, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу, що представлено на рис. 5.27.

Аналіз впливу температури на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті від дії навантаження, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу, свідчить про наступне, що збільшення температури (рис. 5.27) призводить до суттєвого збільшення глибини колії в асфальтобетонному покритті. Із результатів аналізу слідує, що із збільшенням температури асфальтобетон типу Б-20 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) змінюється його модуль пружності, так при навантаженні p=0,8 МПа, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу при швидкості

руху V=40 км/год, колія асфальтобетону за температури 30 °С становитиме 0,5 мм, в той же час за температури 60 °С вона буде становити 11 мм, що в 22 рази вище за колію при температурі 30 °С.

Вплив навантаження на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу, що представлено на рис. 5.28.

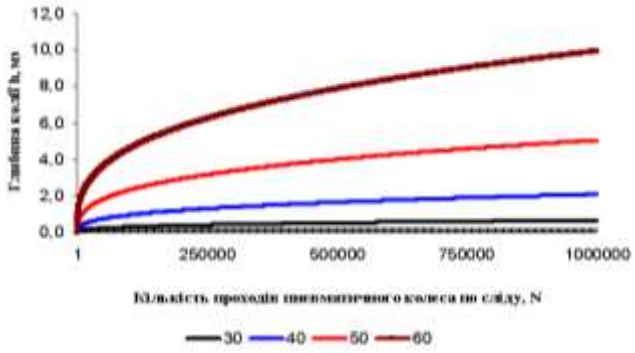


Рисунок 5.27 – Залежність глибини колії від навантаження p=0,8 МПа, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу при швидкості руху V=40 км/год на асфальтобетон типу Б-20 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) з різним модулем пружності покриття при товщині H=0,07 м

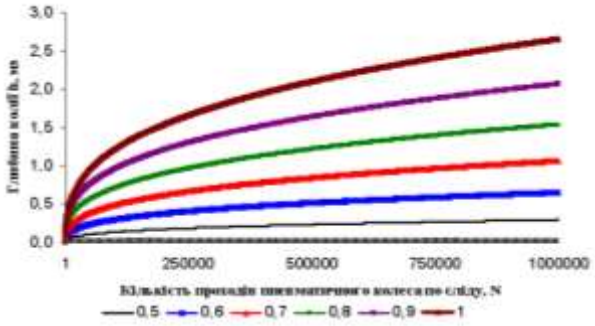


Рисунок 5.28 – Залежність глибини колії від дії пневматичного колеса транспортного засобу при швидкості руху V=40 км/год на асфальтобетон ЩМА-10 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) з різним навантаженням на покриття при товщині H=0,07 м і температурі 30 °С

Аналіз впливу навантаження на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу, свідчить про наступне, що збільшення питомого тиску (рис. 5.28) призводить до збільшення глибини колії в асфальтобетонному покритті. Із результатів аналізу слідує, що із збільшенням питомого тиску на асфальтобетоні ЩМА-10 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) при товщині H=0,07 м і температурі 30 °С глибина колії становить 0,25 мм при мінімальному тиску p=0,5 МПа, а при максимальній тиску p=1 МПа становить 2,8 мм, що в 11,2 рази перевищує глибину колії при тиску p=0,5 МПа.

Вплив різної товщини покриття на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетоні, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу, що представлено на рис. 5.29.

Збільшення товщини покриття (рис. 5.29) призводить до зменшення глибини колії в асфальтобетонному покритті. Із результатів аналізу слідує, що із збільшенням товщини покриття, а саме глибина колії становить 20,0 мм при мінімальній товщині Н=0,06 м, а при максимальній товщині Н=0,16 м становить 1,8 мм, що в 11,1 разів менша ніж при товщині Н=0,06 м. Подальше збільшення товщини асфальтобетонного покриття понад Н=0,16 м є не доцільним тому що глибина колії суттєво не збільшується у порівнянні з товщиною Н=0,16 м. Вплив різної швидкості на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті, що передається від дії пневматичного колеса транспортного засобу, що представлено на рис. 5.30.

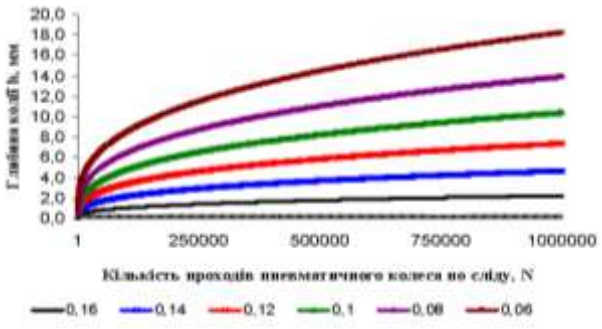


Рисунок 5.29 – Залежність глибини колії від навантаження р=1,0 МПа, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу при швидкості руху V=40 км/год на асфальтобетон типу А-20 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) з різною товщиною покриття при температурі 50 ^{o}С

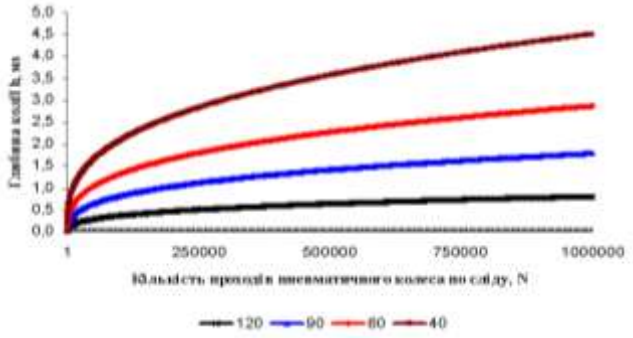


Рисунок 5.30 – Залежність глибини колії при навантаженні р=1,0 МПа, що передається від дії пневматичного колеса транспортного засобу на асфальтобетонне (ЩМА-20 на бітумному в'яжучому БНД 60/90) покриття з товщиною Н=0,1 м, при температурі 50 ^{o}С та різній швидкості руху

З отриманих результатів вплив різної швидкості на інтенсивність утворення глибини колії в асфальтобетонному покритті, що передається від дії

пневматичного колеса транспортного засобу, свідчить наступне, що зменшення швидкості (рис. 5.30) призводить до суттєвого збільшення глибини колії в асфальтобетонному покритті. Із результатів аналізу слідує, що зі зменшенням швидкості в асфальтобетоні ЩМА-20 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) змінюється його колія, покриття з товщиною Н=0,1 м, при навантаженні р=1,0 МПа, ^{o}С що передається від пневматичного колеса транспортного засобу колія асфальтобетону за температури 50 ^{o}С при швидкості руху 120 км/год становитиме 0,8 мм, в той же час при швидкості руху 40 км/год, вона буде становити 4,7 мм, що в 5,9 рази перевищує глибину колії при швидкості руху 120 км/год.

5.5 Висновки по розділу

За результатами роботи, наведеними в даному розділі можна зробити наступні висновки:

1. Отримано поліноміальну модель оцінки величини утворення колії, в залежності від найбільш впливових факторів, що дозволяє проаналізувати зміну глибини колії при зміні значень вхідних параметрів та визначити раціональну комбінацію значень вхідних параметрів, які забезпечать мінімальне значення утворення колії. Мінімального значення глибини колії (до 4 мм) можливо досягти при умові, коли X_1=1 (70% щебеню), X_4=-1 (50°С), при швидкості колеса X_3=-0,25 близько (18 м/с) та мінімальному значенню тиску на поверхню X_2=-1 (0,5 МПа).

2. За результатами проведених лабораторних випробувань встановлено, що на асфальтобетоні типу Б-10 на бітумі БНД 40/60 при тиску 0,6 МПа в 2,8 разів менша пропорційна глибина колієутворення (PRDair), у порівнянні з асфальтобетоном типу Б-10, виготовленому на бітумі БНД 90/130. А при збільшенні тиску до 1,1 МПа, пропорційна глибина колієутворення зростає в 5 разів.

3. Проведені експериментальні дослідження глибини колії в асфальтобетоні підтвердили відомі дані про позитивний вплив модифікації бітуму полімерами.

Доведено, що модифікація бітуму полімерами (при їх кількості до 5%) дозволяє зменшити глибину колії до 50%.

4. На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що при використанні різних в'яжучих найменшу глибину колії для всіх досліджуваних типів асфальтобетонів матиме комплексне полімербітумне в'яжуче «Полігум», використання якого для дрібнозернистого асфальтобетону типу Б-20 призводить до зменшення глибини колії після 10000 проходів колеса, в 1,3 рази. Використання в'яжучого БНД 60/90 + 4 % Butonal NS 198, в 1,9 разів менше.

5. Використовуючи математичну модель для прогнозування глибини колії на покриті автодорожніх мостів та встановлені експериментальні параметри термов'язкопружнопластичних характеристик асфальтобетону було здійснено чисельний аналіз впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на її утворення. Встановлено, що із збільшенням температури асфальтобетон типу Б-20 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) змінюється його модуль пружності, так при навантаженні p=0,8 МПа, що передається від пневматичного колеса транспортного засобу при швидкості руху V=40 км/год, колія асфальтобетону за температури 30 ^{o}C становитиме 0,5 мм, в той же час за температури 60 ^{o}C вона буде становити 11 мм, що в 22 рази вище за колію при температурі 30 ^{o}C.

6. Зі збільшенням питомого тиску на асфальтобетоні ЩМА-10 (на бітумному в'яжучому БНД 60/90) при товщині H=0,07 м і температурі 30 ^{o}C глибина колії становить 0,25 мм при мінімальному тиску p=0,5 МПа, а при максимальній тиску p=1 МПа становить 2,8 мм, що в 11,2 рази перевищує глибину колії при тиску p=0,5 МПа.

7. Збільшення товщини покриття призводить до зменшення глибини колії в асфальтобетонному покритті. Глибина колії становить 20,0 мм при мінімальній товщині H=0,06 м, а при максимальній товщині H=0,16 м становить 1,8 мм, що в 11,1 разів менша ніж при товщині H=0,06 м. Подальше збільшення товщини асфальтобетонного покриття понад H=0,16 м є не доцільним тому що глибина колії суттєво не збільшується.

8. Основні результати досліджень п'ятого розділу висвітлено в роботах автора: [370, 409, 419, 424, 425, 429, 436, 440].

РОЗДІЛ 6
ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ З ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРИТТЯ ДО УТВОРЕННЯ КОЛІЇ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ ІЗ ЗАЛІЗОБЕТОННОЮ ПЛИТОЮ ПРОЇЗНОЇ ЧАСТИНИ

Загальні положення. При експлуатації асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах на його поверхні з'являються та накопичуються пластичні деформації у вигляді колії, зсувів та напливів, що пов’язано з недостатньою коліємстійкістю покриття в умовах підвищених температур і слабкого зчеплення між шарами асфальтобетонів та жорсткою основою мосту.

Проблема недостатньої стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії підсилюється ще тим, що на автодорожніх мостах при високих температурах суттєво знижується модуль пружності асфальтобетону, а модуль пружності основи практично не змінюється. Це призводить до концентрації напружень на контакті асфальтобетону з залізобетоном та значних горизонтальних зсувних деформацій. Крім того значна різниця коефіцієнтів лінійного температурного деформування покриття та основи мосту [5, 82, 392, 454] часто призводить до відшаровування асфальтобетонного покриття від жорсткої основи мостового полотна при коливаннях температури. Тому результатами наукових досліджень є вирішення основної проблеми колієутворення у асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, яка вирішується практичними методами. Їх можна розділити на три основні групи [5, 219, 341-344, 354, 370, 374, 394, 409, 410-443, 465, 467-470, 515]:

1 – Рецептурно-структурні способи з направленого регулювання характеристик асфальтобетонного покриття передбачають застосування підходів, що підвищують стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії. З цією метою передбачається застосувати підвищені вимоги до складових сумішей, їх зернового складу та властивостей асфальтобетонних сумішей та асфальтобетону.

Оцінка економічної ефективності (з урахуванням капіталовкладень) компонентів асфальтобетонних сумішей для влаштування покриття на автодорожніх мостах.

2 – Конструктивні способи з направлення регулювання характеристик асфальтобетонного покриття пов’язані з попереднім конструюванням дорожнього одягу з асфальтобетонними шарами на мостах та з наступним виконанням розрахунків для конкретних вихідних умов за чинними нормативними документами.

3 – Технологічні способи з регулювання характеристик асфальтобетонного покриття направлені на підвищення вимог до технологічних операцій з виготовлення, транспортування, укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей при будівництві асфальтобетонних покриттів.

Як відомо на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів під час експлуатації внаслідок впливу (коливання) високої температури, та дії великовагових транспортних засобів в залежності від різної інтенсивності руху, виникають такі деформації, як колії, зсуви, тріщини, тощо [4, 5, 3, 342, 344, 354, 370, 392, 418, 421, 436].

За участю автора розроблені ряд нормативних документів на замовлення Державного агентства автомобільних доріг України. Дані розробки знайшли практичне застосування при проектуванні та влаштуванні асфальтобетонних покриттів на мостах та автомобільних дорогах загального користування, застосування яких дозволяє підвищувати колієстійкість покриття [142, 344, 354, 379, 448, 453, 475, 476, 499, 481, 482, 492, 500].

В даних рекомендаціях передбачено підходи, щодо підвищення вимог до асфальтобетону та його компонентів [5, 142, 344, 354, 370, 379, 418, 448, 499, 500], а також методи контролю процесу модифікації бітуму полімером [476]. Запропоновано методи з проектування, а саме: зернового складу асфальтобетону [5, 142, 344, 354, 370, 379, 418, 421, 482, 499, 500]; розрахунок асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах спрямований на підвищення його колієстійкості [5, 142, 344, 354, 370, 374, 379, 418, 421, 422, 424, 448, 449, 451 – 453, 467, 482, 499, 500]. Технологічні операції з виготовлення, транспортування, укладання та

ущільнення асфальтобетонних сумішей при будівництві асфальтобетонних покриттів [5, 142, 344, 354, 370, 418, 499, 500]. Тому використання запропонованих методів в даному розділі дозволить бути асфальтобетонному покриттю рівним, шорстким, протидіяти пластичним деформаціям у вигляді колії при високих температурах і дії транспорту та зносостійким, яке дозволить забезпечити експлуатаційну якість проїзної частини автодорожнього мосту.

6.1 Матеріалознавчі способи

6.1.1 Вимоги до бітуму нафтового дорожнього та бітуму модифікованого полімером

Найбільш поширеним і ефективним способом підвищення якості і довговічності асфальтобетону є застосування бітумів, модифікованих полімерами та адгезивами, що дозволяє значно поліпшити колієстійкість асфальтобетону. З метою підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах застосовується бітумне в’яжуче з урахуванням категорії дороги та дорожньо -кліматичного районування. Для автомобільних доріг I, II категорій рекомендується застосовувати бітуми, модифіковані полімерами марок: БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, які повинні відповідати вимогам [477], та вимогам: глибина проникності голки (пенетрація) за температури 25 °С, не більше 65·0,1 мм і не менше 50·0,1 мм; температура розм’якшеності за кільцем і кулею, не нижче 75°С; еластичність, при температурі 25 ^{o}С повинна бути не нижче 80 %. Для III категорії рекомендується застосовувати бітуми, модифіковані полімерами марок: БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, БМП 90/130-49, які повинні відповідати вимогам [477].

Для забезпечення якості бітуму при його модифікації полімерами на виробництві необхідно визначити момент часу завершення процесу модифікації бітуму полімерами та адгезивами до повної стабілізації властивостей та гомогенізації бітумного в’яжучого [476].

Пропонується процедури встановлення експериментальних залежностей зміни характеристик бітумного в'яжучого від часу модифікації t: умовної в'язкості при 25 °С (пенетрації) $П_{25}$, еластичності Е, зчеплюваності А та коефіцієнтів варіації відповідних характеристик: $К_{вП}$, $К_{вЕ}$, $К_{вА}$. Момент часу завершення модифікації бітумного в'яжучого встановлюється, як за ознаками стабілізації властивостей так і за досягненням його гомогенності (однорідності). Суть методики полягає у тому, щоб встановити той момент часу під час модифікації бітумного в'яжучого, при якому відбудеться як стабілізація властивостей, так і гомогенізація в'яжучого буде мати необхідний рівень однорідності.

На початку модифікації бітуму водять полімер і встановлюють час завершення цієї модифікації. Визначають адгезивні властивості бітуму, модифікованого полімером. Якщо вони не відповідають вимогам [477], то водять адгезиви. У цьому випадку встановлюють час завершення модифікації отриманого бітумного в'яжучого адгезивами також за показниками стабілізації властивостей, так і за гомогенізацією. Оцінка стабілізації властивостей та гомогенізації бітумного в'яжучого, при введені полімеру, здійснюється за критеріями: - швидкості зміни пенетрації яка повинна бути не більше або дорівнює 2 $м \cdot 10^{-4}$ (0,1 мм)/год (модифікований бітум набув стабілізації пенетрації); - швидкості зміни еластичності яка повинна бути не більше або дорівнює 2 %/год (модифікований бітум набув стабілізації еластичності);

- коефіцієнту варіації по показникам пенетрації і еластичності який повинен бути менше або дорівнювати 2 % (модифікований бітум набув однорідності за пенетрацією та еластичністю).

Час завершення модифікації приймається рівним тому часу, при якому відбудуться процеси як стабілізації так і гомогенізації (однорідності) бітумного в'яжучого. Тому отримуються результати визначення пенетрації та еластичності і їх коефіцієнтів варіації при різному часі відбору проб [432, 437, 477] і на основі отриманих даних оцінюють зміну цих характеристик на кожному періоді змішування між моментами відбору проб. Про завершення модифікації роблять

висновок на основі даних про досягнення стабільності властивостей та однорідності бітуму, модифікованого полімером у відповідності із схемами представленими на рис. 6.1 – 6.4. На рис. 6.1 представлений приклад, коли однорідність бітумного в'яжучого досягається швидше ніж стабілізація властивостей за показником пенетрації. На схемі показано, що момент досягнення коефіцієнтом варіації за показником пенетрації $К_в^{П}(t)$ свого граничного значення відповідає часу $t_{одн}^{Кв}$. Він є менший ніж момент часу, що відповідає завершенню стабілізації пенетрації. Тому процес завершення модифікації, бітуму полімерами відбудеться тоді, коли час перемішування буде дорівнювати або більшим ніж час стабілізації за показником пенетрації $t_{ст}^{П25}$.

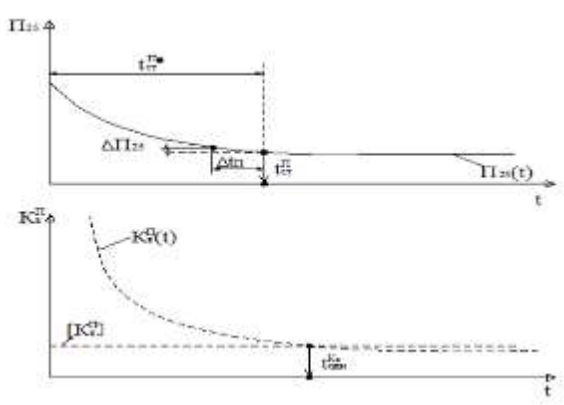


Рисунок 6.1 – Схема встановлення часу змішування $t_{зм}$ бітуму з полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки на основі даних зміни пенетрації $П_{25}(t)$ та коефіцієнта варіації пенетрації $К_в^{П}(t)$ в залежності від часу змішування $t_{зм}$ у випадку коли $t_{одн}^{Кв} \geq t_{ст}^{П25}$

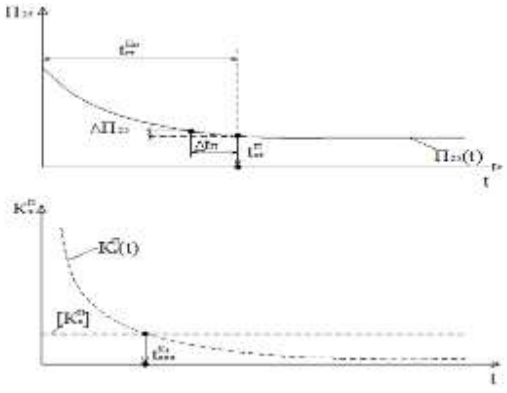


Рисунок 6.2 – Схема встановлення часу змішування tзм бітуму з полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки на основі даних зміни пенетрації П 25(t) та коефіцієнта варіації пенетрації КвП(t) в залежності від часу змішування tзм у випадку коли tоднКв≤t стП25

Представлений приклад, коли стабілізація властивостей бітумного в'яжучого досягається швидше ніж однорідність за показником пенетрації. На схемі показано (рис. 6.2), що момент досягнення коефіцієнтом варіації за

показником пенетрації $К_в^{П}(t)$ свого граничного значення відповідає часу $t_{одн}^{Кв}$ і є більшим ніж момент часу, що відповідає завершенню стабілізації пенетрації. Тому процес завершення модифікації, бітуму полімерами відбудеться тоді, коли час перемішування буде дорівнювати або буде більший ніж час стабілізації за показником пенетрації $t_{одн}^{Кв}$.

Представлений приклад (рис. 6.3), коли однорідність бітумного в'яжучого досягається швидше ніж стабілізація властивостей за показником еластичності. На схемі показано, що момент досягнення коефіцієнтом варіації за показником еластичності $К_в^{E}(t)$ свого граничного значення відповідає часу $t_{одн}^{Кв}$ і є менший ніж момент часу, що відповідає завершенню стабілізації еластичності. Тому процес завершення модифікації, бітуму полімерами відбудеться тоді, коли час перемішування буде дорівнювати або буде більший ніж час стабілізації за показником еластичності $t_{ст}^{E}$.

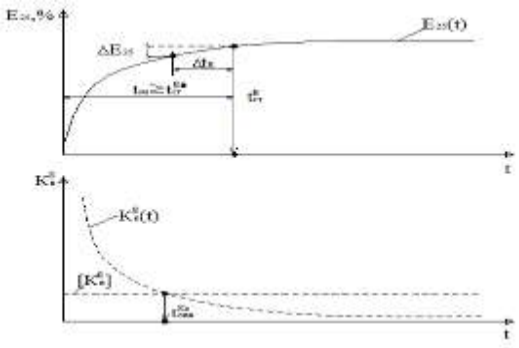


Рисунок 6.3 – Схема встановлення часу змішування $t_{зм}$ бітуму з полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки на основі даних зміни еластичності $E_{25}(t)$ та коефіцієнта варіації еластичності $К_в^{E}(t)$ в залежності від часу змішування $t_{зм}$ у випадку коли $t_{одн}^{Кв} \leq t_{ст}^{E25}$

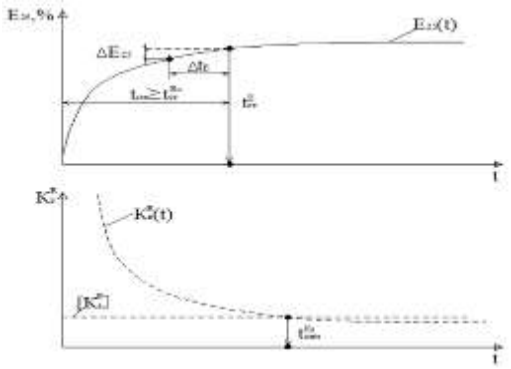


Рисунок 6.4 – Схема встановлення часу змішування $t_{зм}$ бітуму з полімером за допомогою лабораторної лопатевої мішалки на основі даних зміни еластичності $E_{25}(t)$ та коефіцієнта варіації еластичності $К_в^{E}(t)$ в залежності від часу змішування $t_{зм}$ у випадку коли $t_{одн}^{Кв} \geq t_{ст}^{E25}$

На рис.6.4 представлений приклад, коли стабілізація властивостей бітумного в'яжучого досягається швидше ніж однорідність за показником еластичності. На схемі показано, що момент досягнення коефіцієнтом варіації за

показником еластичності $К_в^{Е}(t)$ свого граничного значення відповідає часу $t_{одн}^{Кв}$ і є більшим ніж момент часу, що відповідає завершенню стабілізації еластичності. Тому процес завершення модифікації, бітуму полімерами відбудеться тоді, коли час перемішування буде дорівнювати або буде більший ніж час стабілізації за показником пенетрації $t_{одн}^{Кв}$.

Під час модифікації бітумного в'яжучого відбір проби для випробувань здійснюють з таким режимом часу відбору проб, щоб отримати достовірну інформацію стосовно завершення стабілізації властивостей та гомогенізації модифікованого в'яжучого. Режим відбору проб при модифікації бітуму, полімером встановлюється з урахуванням темпів стабілізації властивостей. Якщо характер таких темпів не відомий для модифікації бітуму певним полімером, то рекомендується попередньо здійснити пробну модифікацію, встановити характер темпу модифікації та вибрати відповідний режим відбору проб з урахуванням рекомендацій таблиці [437, 477].

6.1.2 Вимоги до зернових (гранулометричний) складів асфальтобетонної суміші.

Зерновий склад мінеральної частини гарячих асфальтобетонних сумішей різних типів та видів рекомендується застосовувати з урахуванням дорожньо-кліматичного районування території України за умовами роботи асфальтобетонних покриттів та категорії автомобільних доріг та вимог [5, 142, 344, 370, 449, 451, 452, 477, 499, 500]. Рекомендується застосовувати асфальтобетон з таким зерновим складом, що забезпечить підвищену коліестійкість.

Для доріг I та II категорій рекомендується застосовувати асфальтобетон:
- дрібнозернистий (для верхнього шару), щільний типу А або типу Б, I марки з максимальним розміром щебеню 15 мм (20 мм), згідно з [142, 354, 418, 452, 500];
- щебенево-мастиковий асфальтобетон (ЩМА) з максимальним розміром щебеню 10 мм (15 мм) - для верхнього шару та 20 мм – для нижнього шару покриття згідно з [354, 418, 451, 500]; – асфальтобетон литий (ЛА) «Гусасфальт»

максимальним розміром щебеню 10 мм (15 мм) для верхнього шару та 15 мм – для нижнього шару згідно з [354, 370, 418, 449].

Для доріг III категорії рекомендується застосовувати асфальтобетон: – дрібнозернистий (для верхнього шару), щільний, типу А або типу Б, I марки з максимальним розміром щебеню 10 мм (15 мм, 20 мм), згідно з [142, 354, 418, 452, 500]; – щебенево-мастиковий асфальтобетон з максимальним розміром щебеню 10 мм (15 мм), згідно з [354, 418, 451, 500]; – асфальтобетон литий аналогічно як для доріг I та II категорій.

Таблиця 6.1 – Вимоги до проектування зернового складу в залежності від технології ведення полімеру в асфальтобетону суміш

Вид асфальтобетону з максимальною крупністю щебеню	Технологія виготовлення асфальтобетонних сумішей		Властивості перевіряються за вимогами	Вимоги	Категорія дороги
	при веденні бітуму нафтового дорожнього та або бітуму модифікованого полімерами в суміш	при веденні полімеру в суміш			
1	2	3	4	5	6
Тип А, Тип Б	БМП 40/60-56, БМП60/90-52	ведення латексу в суміш у кількості 3-5% від маси бітуму	$R_{20} > R_{норм.}$	4,0	I, II
			$R_{50,} > R_{норм.}$	2,0	
			$K_{ТР/вод} > K_{вим}$	0,9	
			$W_{min} < W < W_{max}$	2,0-3,5	
			$h_{50} < h_{норм.}$	5	
ЩМА	БМП 40/60-56, БМП60/90-52	Ведення в асфальтобетонну суміш латексу в кількості 3-5% від маси бітуму	$R_{min} < R_0 < R_{max}$	2,5-5,5	I, II
			$R_{50,} > R_{норм.}$	0,7	
			$R_{20} > R_{норм}$	2,7	
			$W_{min} < W < W_{max}$	1,0-3,0	
			$h_{50} < h_{норм.}$	5	
			$E_p < E_{норм.}$	0,16	
ЛА	БМП 40/60-56, БМП60/90-52	-	$P_{min} < P_{гл.вдав.} < P_{max.}$	1,0-3,0	I, II
			$R_{50,} > R_{норм.}$	0,7	
			$R_{20} > R_{норм}$	2,7	
			$П_{З/П} < П^{норм}_{З/П}$	2	
			$R_{min} < R_0 < R_{max}$	2,5-6,0	
			$h_{50} < h_{норм.}$	5	

Для доріг IV - категорії рекомендується застосовувати асфальтобетон: – дрібнозернистий, щільний, типу Б та (або) типу В, І марки з максимальним розміром щебеню 10 мм (15 мм), згідно з [142, 354, 418, 452, 500]; – щебенево-мастиковий асфальтобетон з максимальним розміром щебеню 5 мм (10 мм), згідно з [354, 418, 451, 500]; – литий асфальтобетон застосовують при відповідному техніко-економічному обґрунтуванні.

6.1.3 Вимоги до властивостей асфальтобетонної суміші та асфальтобетону. Асфальтобетони, які застосовуються в якості покриття на автодорожніх мостах автомобільних доріг в залежності від категорії та дорожньо - кліматичного районування, повинні відповідати вимогам до фізико-механічних властивостей згідно [142, 344, 354, 370, 418, 449, 451, 452, 499, 500] та (додатку Б) вимогам таблиці 6.1, а також застосовуватись з урахуванням області їх використання відповідно до таблиці 6.2.

Вимоги до проектування зернового складу асфальтобетонних сумішей для автомобільних доріг III-V повинні відповідати вимогам згідно [142, 344, 354, 418, 449, 451, 452, 499, 500].

Показник однорідності асфальтобетонних сумішей необхідно оцінювати за коефіцієнтом варіації показника границі міцності на стиск асфальтобетону за температури 50 ^{o}C згідно з методикою [483]. Він не повинен перевищувати для асфальтобетонів: для автомобільних доріг I, II категорії – 15; для III, IV категорії – 18 [142, 344, 354, 418, 449, 451, 452, 499 – 501].

Для підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття доцільно використовувати полімерні і полімерно-армуючі добавки для модифікації асфальтобетонної суміші згідно з [374, 424, 467].

Таблиця 6.2 – Область використання асфальтобетонних сумішей та асфальтобетону для доріг

Шифр району	Категорія автомобільної дороги			
	I, II		III, IV	
	Марка бітумного в'яжучого	Асфальтобетонна суміш	Марка бітумного в'яжучого	Асфальтобетонна суміш
А-1, А-2	БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, (БМП 90/130-49)	ЩМА, ЛА, гаряча щільна типу А, (Б)	БНД 60/90, БНД 90/130, БМП 60/90-52 БМП 90/130-49) (БМП 40/60-56)	ЩМА, (ЛА), гаряча щільна типу А, Б, В
А-3, А-4	БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, (БМП 90/130-49)	ЩМА, ЛА, гаряча щільна типу А, (Б)	БНД 60/90, БНД 90/130, (БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, БМП 90/130-49)	ЩМА, (ЛА), гаряча щільна типу А, Б, В
А-5, А-6	БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, (БМП 90/130-49)	ЩМА, ЛА, гаряча щільна типу А, (Б)	БНД 40/60, БНД 60/90, (БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, БМП 90/130-49)	ЩМА, (ЛА), гаряча щільна типу А, Б, В
А-7	БМП 40/60-56, БМП 60/90-52, (БМП 90/130-49)	ЩМА, ЛА, гаряча щільна типу А, (Б)	БНД 40/60, БНД 60/90, (БМП 40/60-56, БМП 60/90-52) БМП 90/130-49)	ЩМА, (ЛА), гаряча щільна типу А, Б, В
Примітка 1. Використання типів, марок в'яжучого, що наведені в дужках, менш доцільно або використовують їх з урахуванням техніко-економічного обґрунтування				

6.1.4. Проектування складу асфальтобетону підвищеної коліїстійкості

Суть полягає у проектування зернового складу вихідних мінеральних компонентів асфальтобетону, а саме традиційного асфальтобетону [5, 142, 452, 499, 500], щебенево-мастикового асфальтобетону [451] та асфальтобетону литого «Гусасфальт» [370, 449]), на бітумі нафтовому дорожньому [502] та бітумі модифікованому полімерами [477]. Дана методологія базується на експериментально-розрахункових методах та техніко-економічному обґрунтуванні при оптимізації зернового складу.

Для забезпечення оптимізації зернового складу при проектуванні асфальтобетону підвищеної коліїстійкості для застосування на автодорожніх мостах пропонуються такі методи, а саме: - проектування зернового складу

асфальтобетону на бітумі нафтовому дорожньому та бітумі модифікованому полімерами; проектування зернового складу асфальтобетону підвищеної коліїстійкості з оптимізацією за показником розрахункового строку служби; встановлення марки за експлуатаційними характеристиками асфальтобетону; оцінка економічної ефективності асфальтобетону.

6.1.4.1 Проектування зернового складу асфальтобетону на бітумі нафтовому дорожньому або бітумі модифікованому полімерами. Проектування складу асфальтобетону, розпочинається з визначення зернового складу вихідних мінеральних компонентів.

Необхідно виконати підбір зернового складу асфальтобетонної суміші (контрольний склад), що найкраще відповідатиме вимогам [5, 142, 449, 451, 452].

Відповідно до рекомендацій [5, 142, 449, 451, 452] призначається або розраховується орієнтовне значення оптимальної кількості бітумного в'яжучого $\tilde{Б}_{опт}$ [5, 142, 370, 418, 452, 499, 500]. Бітумне в'яжуче – це бітум нафтовий дорожній [502] або бітум дорожній, модифікований полімерами згідно [477]. Потім встановлюється кілька значень кількості в'яжучого $Б$ (не менше п'яти) для лабораторного приготування асфальтобетонної суміші: $Б_1 = \tilde{Б}_{опт}$, $Б_2 = \tilde{Б}_{опт} - n$, $Б_3 = \tilde{Б}_{опт} - 2n$, $Б_4 = \tilde{Б}_{опт} + n$, $Б_5 = \tilde{Б}_{опт} + 2n$ і т.д. (n – зміна кількості в'яжучого, що встановлюється в межах 0,3-0,5 %) [5, 499, 500].

Наступним етапом виготовляються проби асфальтобетонної суміші з призначеними кількостями бітумного в'яжучого і формуються зразки циліндричної форми розмірами згідно [449, 450, 483, 503, 504] для визначення таких фізико-механічних властивостей з урахуванням табл. 6.1: водонасичення W; R_{50} R_{20} - границі міцності при стиску за температури 50 °С, 20 °С; R_0 - границі міцності при розколюванні за температури 0 °С; h_{50} - глибина колії ghb ntvgthfnehs 50 ^oC; $E_р$ - показник стікання; $P_{гл.вдав}$ - глибина вдавлювання штампу (можуть бути вибрані додатково і інші стандартні фізико-механічні характеристики). Після, чого будуються графіки залежностей $W = f(Б)$, $R_{20} = f(Б)$,

$R_{50} = f(Б)$; $R_0 = f(Б)$, $h = f(\text{Б})$, $E_{\text{р}} = f(Б)$, $P_{гл.вдав} = f(Б)$ від кількості бітумного в'яжучого. Отримані графічні залежності аналізуються з визначенням чітко вираженими максимумами. Однак, у випадках, коли не спостерігаються максимуми, то необхідно уточнити значення $Б$ і n та при їх значеннях отримати характеристики W, R_{50}, R_{20}, R_0, та $E_{\text{р}}$, $P_{гл.вдав}$, h_{50}.

У результаті отриманих даних необхідно вибрати таку кількість бітумного в'яжучого, при якій асфальтобетон найкраще відповідає за випробуваними показниками (W, $R_{20}^{вод}$, R_{50}, $K_{МРЗ}$ та $K_{ТР}$) вимогам нормативних документів [142, 449 – 452, 504] та таблиці 6.1. Дана кількість бітумного в'яжучого вважається оптимальною ($Б_{опт}$). У випадках, коли асфальтобетон не задовольняє стандартним вимогам, необхідно внести корективи в склад, замінюючи компоненти асфальтобетону та змінюючи їх кількісне співвідношення до задоволення попередніх вимог.

Виконання досліджень потребує виготовлення відповідної кількості зразків для проведення досліджень по встановленню всіх стандартних характеристик асфальтобетону контрольного складу з оптимальною кількістю бітумного в'яжучого $Б_{опт}$.

Результати досліджень перевіряються відповідності вимогам існуючих нормативних документів [142, 449 – 452, 504] та таблиці 6.1. У тому випадку, коли результати досліджень відповідають вимогам нормативних документів, можна вважати, що контрольний склад асфальтобетонної суміші є підібраним. Однак, якщо цей склад не задовольняє вимогам нормативних документів, то необхідно виконати корегуючі дії до отримання позитивних результатів.

6.1.4.2 Метод підбору складу асфальтобетону підвищеної стійкості до утворення колії. Суть методу полягає у підборі рецептурно-структурних параметрів асфальтобетону виходячи із розрахункового строку служби покриття [142, 449 – 452, 504] (п. 6.1.4.1). Полягає у проектуванні гранулометричного

складу асфальтобетону [142, 449 – 452, 504] (п. 6.1.4.1) з оптимізацією за показником розрахункового строку служби $Т_р^к$, який базується на визначенні розрахункового строку служби асфальтобетону за критерієм показника стійкості до накопичення залишкових деформацій S_h при нормальних умовах експлуатації, яка базується на даних [374, 424, 432, 437, 450, 477, 483, 501 –506]. Період часу безвідмовної роботи матеріалу покриття (без виникнення залишкових деформацій у вигляді колії) на протязі всього розрахункового строку служби визначається за формулою:

$$Т_р^к = \left(\left(K_y \cdot S_h^н\right)/(S_h \cdot N_p^{а/г} \cdot T_{50})\right)\cdot 10^2 \le T_{пр} \qquad (6.1)$$

де $Т_р^к$ – строк служби асфальтобетонного покриття за критерієм колієстійкості визначається у роках;

$S_h^н$ – нормативне значення показника стійкості до накопичення залишкових деформацій (граничний показник), м·N визначається за формулою (6.2);

$K_у$ – коефіцієнт умови руху транспортних засобів, для стиснених умов руху на автодорожніх мостах приймають 1,0;

S_h – величина інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій м·N, після одного циклу дії колісного навантаження при температурі 50 ^oC ;

$N_p^{а/г}$ – розрахункова інтенсивність руху в полосі транспортних засобів за годину, авт./год (для розрахунку приймали 190); визначається по результатами спостереження за конкретним автодорожнім мостом, а також відповідно методики, яка наведена в розділі 2 даної роботи;

$T_{пр}$ – проектний строк служби асфальтобетонного покриття проїзної частини автодорожнього мосту, що становить 7 років [37];

T_{50} – кількість годин в році з температурою асфальтобетонного покриття 50 °С і вище, год/рік, визначається по даним метеостанції в кожному конкретному регіоні (розділ 2), при відсутності даних рекомендується приймати 200 год/рік.

$$S_h^{\text{н}} = h_{\text{н}} \cdot N_n \tag{6.2}$$

де $h_{\text{н}}$ – нормативне значення залишкової деформації, для розрахунків приймається 0,005 м;

N_n – кількість навантажень приймають для розрахунків 4000.

Величину $S_{\text{н}}$ інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонному зразку визначають за методикою (розділу 4). Для визначення показника стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій формують зразки згідно (розділ 4) або іншими методами. Товщина зразків повинна бути рівною проектній товщині верхнього шару покриття. Асфальтобетонні зразки плити випробовують на секторному пресі під дією огубленого колеса з еквівалентним навантаженням до розрахункового автомобіля 57,5 кН (тиск від колеса на зразок 0,8 МПа) при температурі 50 °С. Огумлене колесо у секторному пресі (розділ 4) здійснює зворотно-поступальний рух по випробувальній поверхні зразка - це вважається один циклом навантаження. Після завершення 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 15000, 20000 циклів навантаження вимірюється глибина колії в кожному зразку. Інтегральний показника стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону, після одного циклу дії колісного навантаження S_h, визначають за формулою:

$$S_h = \frac{h_2 \cdot N_2 - h_1 \cdot N_1}{N_2 - N_1} \cdot 0{,}001 \tag{6.3}$$

N_1 – мінімальна кількість циклів навантаження колеса на зразок, приймається, рівне 4000;

N_2 – максимальна кількість циклів навантаження колеса на зразок, приймається, в нашому випадку рівне 10000 або 20000 циклів;

h_1 – залишкова деформація, яка утворилась в зразку, після мінімальної кількість циклів навантаження колеса, мм;

h_2 – залишкова деформація, яка утворилась в зразку, після максимальної кількість циклів навантаження колеса, мм.

Приклад обробки результатів випробувань п’яти зернових складів асфальтобетону згідно (додатку Б), що представлено в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Результати оцінки строк служби асфальтобетонного покриття за критерієм колієстійкості

Шифр	Розшифровка асфальтобетону	Максимальна величина колії h, мм		Розрахунковий строк служби покриття на автодорожніх мостах, для автомобільної дороги І - ї категорії, роки
		після 4000 проходів колеса по зразку	після 10000 проходів колеса по зразку	
10.2-А-20-3В	АСГ.Др.Щ.А-20 НП.І. (БНД 60/90 – 3 % Butonal NS 198 – 5,7 %)	3,0	4,1	11,0
11.5-Б-20-3К	АСГ.Др.Щ. Б-20 НП.І. (БНД 60/90 – 3 % Kraton D1101 – 6,0 %)	4,3	5,4	8,5
9.2-ЩМА-20-3В	ЩМА-20 (БНД 60/90 – 3 % Butonal NS 198 – 6,2 %)	2,5	3,0	15,7
9.10-ЩМА-20-П	ЩМА-20 (Полігум – 5,9 %)	1,7	1,95	24,7
7.10-ЛА-15-П	Литий а/б ЛА-15 (Полігум – 8,0 %)	3,0	3,6	13,2

6.1.4.3 Встановлення марки за експлуатаційними характеристиками асфальтобетону. Ідея даного методу запропонована проф. Мозговим В.В. Суть методу передбачає встановлення марки за експлуатаційними характеристиками асфальтобетону температурних умов його експлуатації. Вона полягає у встановленні максимальної T^{n}_{max} асфальтобетонного покриття, при яких виникає небезпека відповідно накопичення залишкових деформацій. За цими температурами порівнюються експлуатаційні характеристики асфальтобетону, що характеризують його стійкість до залишкових деформацій при високих температурах $T^{а/б}_{max}$. Якщо умова нерівності $T^{а/б}_{max} > T^{n}_{max}$ виконуються, то такий асфальтобетон дозволяється застосовувати для даного об'єкту, якщо ні – то вносять відповідні корективи в склад асфальтобетонної суміші. Параметри асфальтобетону за його експлуатаційними характеристиками встановлюють експериментально. Встановлення характеристики $T^{а/б}_{max}$ здійснюють наступним чином. Асфальтобетонна суміш, що пройшла попереднє термостаріння у термостаті при робочій температурі зберігання протягом 4 годин ущільнюється за допомогою секторного пресу [460, 482], а потім випробовується за методом (розділу 4) [424, 425] та вимірюється глибина колії при різних температурах випробування асфальтобетонних зразків. На основі отриманих даних будується графічна залежність зміни глибини колії $h = f(T)$ від температури T (рис. 6.5).

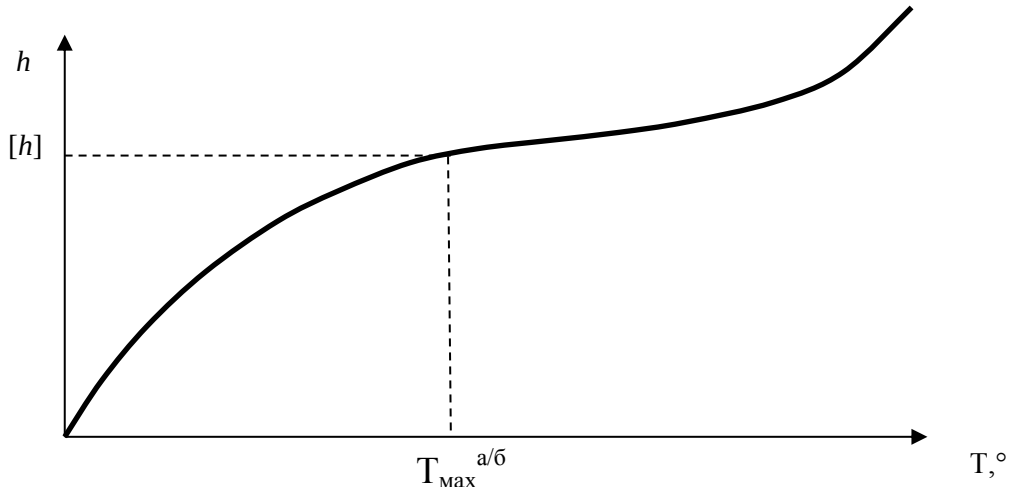


Рисунок 6.5 – Графічне встановлення максимальної температури

Граничне значення залишкова деформація [*w*], мм, при температури повинно відповідати вимогам таблиці 6.1. Для встановлення розрахункової температури покриття для вибору марки асфальтобетону рекомендується застосувати наступну методику. Максимальну температуру $T_{\max}^{n}$ покриття даного регіону встановлюють за аналітичними залежностями (2,29, 2,30). Значення параметрів аналітичної залежності (2,29, 2,30). $T_{\max}^{пов}$ встановлюють з урахуванням [507]. Емпіричні коефіцієнти аналітичної залежності (3,29) рекомендується уточнювати на основі метеорологічних даних за останні 15 років для відповідного району будівництва. Значення встановлюють $T_{\max}^{n}$ з вірогідністю 0,98.

6.1.4.4 Оцінка економічної ефективності асфальтобетонних сумішей для влаштування покриття на автодорожніх мостах

Суть полягає у оцінці економічної ефективності компонентів асфальтобетонної суміші для влаштування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах з урахуванням районування території України за кліматичними умовами роботи покриття і категорії доріг згідно [142, 449 – 452, 504], яка базується на даних [508 – 512]. При оцінці економічної ефективності асфальтобетонних сумішей для влаштування покриття на мостах, отриманих з використанням в їх складі таких компонентів, як: бітум нафтовий дорожній, бітумів дорожніх, модифікованих полімерами; кубовидний щебінь, модифікуючи добавки; стабілізуючі добавки, структуруючи добавки; адгезивні добавки; активованих мінеральних матеріалів. Запропонований метод пропонується використовувати для вибору економічної ефективності компонентів при проектуванні зернового складу асфальтобетонних сумішей.

Ефективність компонентів асфальтобетонних сумішей – характеристика, яка визначає можливість компонентів різних видів, які покращують фізико-механічні властивості і інші показники асфальтобетону, що визначають строк служби покриття на автодорожніх мостах.

Річний економічний ефект (*E*) від створення і використання асфальтобетонного покриття підвищеної колієстійкості за рахунок високоякісної

асфальтобетонної суміші (в тому числі з модифікуючими добавками) виконується на основі визначених строків служби покриття по формулі:

$$E = \left[\left(З_1 + З_{с1} \right) \cdot \varphi + E_E - \left(З_2 + З_{с2} \right) \right] \cdot A_2 \qquad (6.4)$$

де $З_1$ і $З_2$ – приведені витрати на заводське виготовлення матеріалів з урахуванням вартості транспортування по базовій і новій техніці в грн.;

$З_{С1}$ і $З_{С2}$ – приведені витрати на влаштування покриття по порівняльним варіантам, в грн. ;

φ – коефіцієнт, що враховує термін служби нової будівельної конструкції в порівнянні з базовим варіантом.

Коефіцієнт, що враховує термін служби нового дорожнього покриття на автодорожньому мосту в порівнянні з базовим варіантом визначається за формулою:

$$\varphi = \frac{P_1 + E_н}{P_2 + E_н} \qquad (6.5)$$

де P_1, P_2 – доля кошторисної вартості асфальтобетонного покриття в розрахунку на 1 рік їх строку служби по порівняльним варіантам, визначаються в залежності від терміну експлуатації відповідно до [508, 509];

$E_н$ – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень, рівний 0,12.

E_E – економія в сфері експлуатації асфальтобетонного покриття за весь період їхньої служби (може бути прийнятим рівним 0, якщо передбачається, що асфальтобетонне покриття на мосту експлуатуватиметься весь термін без появи колій);

A_2 – річний обсяг будівельних робіт з використанням нових асфальтобетонних покриттів в розрахунковому році в натуральних одиницях.

Виходячи із залежності (6.4) та з урахуванням рекомендацій [508, 509] можна отримати залежність для визначення долі кошторисної вартості асфальтобетонного покриття в розрахунку на 1 рік його терміну експлуатації з урахуванням нормативного коефіцієнта порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень $(P_1 + E_H)$, яки позначимо P_{E_H} та рівний функцією загального рівня надійності $f(P)$, що визначається за формулою [509]. Для спрощення проведення випробувань і розрахунків, загальний рівень надійності може бути виражений через показники фізико-механічних властивостей та колійності досліджуваного асфальтобетону, а саме: границя міцності при стиску, (R_{20}) МПа; границя міцності при стиску, (R_{50}) МПа; водонасичення (W), %; коефіцієнт водостійкість при тривалому водонасиченні ($K_{\text{ТР/вод}}$); глибина колії (h^{ϕ}) після 10000 проходів колеса при еквівалентному навантаженні на нього 57,5 кН та температурі випробувань 50 °С, мм; $E_{\text{р}}$ – показник стікання, %; глибина вдавлювання ($P_{гл.вдав.}$) штампу площею 5 см^2 за температурою 40 °С хв. дії навантаження, мм; $П_{З/П}$ – залишкова пористість, %.

Величина загального рівня надійності може бути виражена через коефіцієнт збільшення показників фізико-механічних властивостей та колійності визначається за формулою:

- *для дрібнозернистих асфальтобетонів*

$$I_{заг}^{а/б} = \sqrt[5]{I_1^{а/б} \times I_2^{а/б} \times I_3^{а/б} \times I_4^{а/б} \times I_5^{а/б}}\,, \qquad (6.6)$$

$$I_{1}^{а/б} = \frac{R_{50}^{\text{ф}}}{R_{50}^{\text{вим}}},\ I_{2}^{а/б} = \frac{R_{20}^{\text{ф}}}{R_{20}^{\text{вим}}}\ I_3^{а/б} = \frac{W^{\text{вим}}}{W^{\text{ф}}},\ I_4^{а/б} = \frac{K_{\text{ТР/вод}}^{\text{ф}}}{K_{\text{ТР/вод}}^{\text{вим}}},\ I_5^{а/б} = \frac{h^{\text{вим}}}{h^{\text{ф}}}, \qquad (6.7)$$

- *для щебенево-мастикового асфальтобетону*

$$I_{заг}^{ЩМА,} = \sqrt[5]{I_1^{ЩМА} \times I_2^{ЩМА} \times I_3^{ЩМА} \times I_4^{ЩМА} \times I_5^{ЩМА}} \qquad (6.8)$$

$$I_1^{ЩМА} = \frac{R_{50}^{ф}}{R_{50}^{вим}},\ I_2^{ЩМА} = \frac{\left(R_{20}^{ф}/R_0\right)^{ф}}{\left(R_{20}/R_0\right)^{вим}}\ I_3^{ЩМА} = \frac{W^{вим}}{W^{ф}},\ I_4^{ЩМА} = \frac{E^{вим}}{E_р^{ф}},\ I_5^{ЩМА} = \frac{h^{вим}}{h^{ф}}, \quad (6.9)$$

- *для асфальтобетону литого*

$$I_{заг}^{ЛА,} = \sqrt[5]{I_1^{ЛА} \times I_2^{ЛА} \times I_3^{ЛА} \times I_4^{ЛА} \times I_5^{ЛА}} \quad (6.10)$$

$$- \quad I_1^{ЛА} = \frac{R_{50}^{ф}}{R_{50}^{вим}},\ I_2^{ЛА} = \frac{\left(R_{20}^{ф}/R_0\right)^{ф}}{\left(R_{20}/R_0\right)^{вим}}\ I_3^{ЛА} = \frac{П_{З/П}^{вим}}{П_{З/П}^{ф}},\ I_4^{ЛА} = \frac{P_{гл.вдав}^{вим}}{P_{гл.вдав.}^{Ф}},\ I_5^{ЛА} = \frac{h^{вим}}{h^{ф}}, \quad (6.11)$$

де $R_{50}^{ф}$ $R_{20}^{ф}$ – фактичне значення границі міцності при стиску за температури 50 °С, 20 °С по результатам отриманих досліджень, МПа;

R_0 – фактичне значення границі міцності при розколюванні за температури 0 °С, МПа;

$W^{Ф}$ – фактичне значення водонасичення по результатам отриманих досліджень;

$K_{ТР/вод}^{ф}$ – фактичне значення коефіцієнт водостійкість при тривалому водонасиченні по результатам отриманих досліджень;

$h^{ф}$ – фактичне значення глибина колії по результатам отриманих досліджень;

$E_р^{ф}$ – фактичне значення показник стікання у щебенево-мастиковій суміші, %;

$P_{гл.вдав}^{Ф}$ – фактичне значення глибини вдавлювання штампу в асфальтобетоні литому, мм;

$П_{З/П}^{ф}$ – фактичне значення залишкової пористості у асфальтобетону литому, %.

$R_{50}^{вим}$, $R_{20}^{вим}$, $R_0^{вим}$, $W^{вим}$, $K_{ТР/вод}^{вим}$, $E^{вим}$, $П_{З/П}^{вим}$. $P_{гл.вдав}^{вим}$, $h^{вим}$ – нормативні вимоги вищенаведених показників приймаються за діючими нормативними документами та таблицею 6.1.

Використовуємо емпіричну формулу [509] для визначення долі кошторисної вартості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах з розрахунку на один рік його строку служби ($P_{Eн}$) з урахуванням нормативного коефіцієнту порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень, рівного 0,15:

$$P_{Eн} = 0{,}22 \cdot I_{заг}^{-0{,}75} \tag{6.12}$$

Визначаємо показник ефективності від зміни строку служби асфальтобетону в покритті на автодорожніх мостах ($П_\beta$), який показує в скільки разів модифікована асфальтобетонна суміш (з модифікуючими добавками - полімерними, мікроармуючими, стабілізуючими або бітуми модифіковані різними добавками, на рядовому чи кубовидному щебені та ін.) може бути дорожче асфальтобетонної суміші без добавок (стандартна суміш на рядовому щебені і бітумі нафтовому дорожньому):

$$П_\beta = \frac{P_{Ei}^0}{P_{Ei}^1} \tag{6.13}$$

P_{Ei}^0 – доля кошторисної вартості стандартного асфальтобетону;

P_{Ei}^1 – доля кошторисної вартості модифікованого асфальтобетону.

Використовуємо умову [509] для оцінки вартості модифікованої асфальтобетонної суміші, яка не може бути вище більше ніж в $П_\beta$ раз, з точки зору забезпечення техніко-економічної ефективності, у порівнянні з стандартною вартістю асфальтобетонної суміші, тобто потрібно щоб виконувалась умова:

$$\frac{B_1}{B_0} \le П_\beta \tag{6.14}$$

де B_1 – вартість однієї тони модифікованої асфальтобетонної суміші;

B_0 – вартість однієї тони стандартної асфальтобетонної суміші.

Для порівняння декількох зернових складів асфальтобетонних сумішей з різним варіюванням компонентів (наприклад, різних добавок, кубовидного щебеню та бітуму модифікованого полімером різних виробників), визначаючих підвищення міцностних та деформаційних властивостей, для виробництва вибирається склад, для якого показник $П_\beta$ має найбільше значення більше 1,00 при виконанні умови (6.14). Приклад розрахунку вибору економічної ефективності асфальтобетонної суміші наведено в додатку Д.

6.2 Конструктивні способи

Конструктивні способи з направлення регулювання характеристик асфальтобетонного покриття пов’язані з попереднім конструюванням асфальтобетонними шарами на проїзній частині автодорожніх мостів та з наступним виконанням розрахунків для конкретних вихідних умов за чинними нормативними документами з метою визначення загальної товщини асфальтобетонних шарів.

Загальна товщина асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах визначається відповідно до (розділу 3) [5, 363, 379, 448]. Основне завдання конструювання асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах полягає у підвищенні колієстійкості за рахунок раціонального розташування в межах загальної товщини асфальтобетонних шарів відповідних типів та видів асфальтобетону у відповідності з додатком Б таблиці 6.2, використовуючи, при необхідності, зчіпні та армуючі прошарки.

Асфальтобетонне покриттів на автодорожніх мостах автомобільних дорогах I і II категорій розраховують на навантаження 130 кН, 115 кН, III-IV категорій – 100 кН, V категорії – 60 кН згідно з ДБН Б.В.2.3-4 та ВБН В.2.3-218-186.

6.2.1 Основні положення по визначенню і вибору конструкції асфальтобетонного покриття

Проектування дорожніх покриттів на мостах полягає у виборі конструкції (взаємному розміщенні шарів) і її розрахунку на колієстійкість та міцність. Вибирається конструкцію дорожнього покриття в залежності від її призначення, умов експлуатації і можливостей будівельних організацій згідно [448]. При конструюванні та розрахунку дорожнього покриття на автодорожніх мостах необхідно враховувати: а) район проектування; б) категорія автомобільної дороги та розрахункове навантаження згідно з [356, 363, 379, 448]; в) інформацію про наявність місцевих дорожньо-будівельних матеріалів; г) можливість застосування місцевих дорожньо-будівельних матеріалів і відходів виробництва; д) технологію влаштування шару, яка забезпечить максимальну механізацію і автоматизацію виконання робіт; е) умови проведення ремонтно-будівельних робіт та досвід застосування цих матеріалів в даному дорожньо-кліматичному районі згідно з ВБН В.2.3-218-186.

Районування території України за кліматичними умовами роботи асфальтобетонного покриття прийнято згідно з [356, 363, 379, 448]. Варіанти типових конструкцій дорожнього покриття мостового полотна розраховано на сумарну кількість прикладання розрахункового навантаження на смугу руху за термін служби дорожнього покриття за категоріями автомобільних доріг (розділ 3) наведено в [379, 448]. Сумарну кількість прикладання розрахункового навантаження на смугу руху визначено згідно з (розділом, 2, 3) [448] з урахуванням середньодобової інтенсивності руху та складу транспортного потоку по регіонах. Термін служби асфальтобетонного покриття приймають згідно з [356] та розраховують з урахуванням (розділу 2, 3, п.6.1) і [379, 448]. При виборі конструкції асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту під час розрахунку, вона повинна відповідати: вимогам до стандартних фізико-механічних властивостей (температурні, деформаційні і міцнісні характеристики дорожньо-будівельних матеріалів), а також має найнижче значення показника стійкості асфальтобетону до накопичення залишкових деформацій згідно з п. 6.1.3

та п.6.1.4 та розділу 4; при застосуванні шарів асфальтобетонного покриття з підвищеною коліестійкістю рекомендується перевіряти асфальтобетони різної гранулометрії за методикою згідно з розділом 3, 4 та пунктом 6.1.4. цього розділу.

Конструювання дорожнього покриття на автодорожніх мостах наведено в альбомі типових конструкцій [448], який розроблено під керівництвом автора. Альбом призначений для використання дорожніми проектними, науково-дослідними, будівельними і експлуатаційними організаціями при розробленні проектної документації з капітального ремонту, нового будівництва та реконструкції мостів та шляхопроводів та виконанні будівельно-ремонтних робіт.

6.2.2 Проектування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах підвищеної довговічності

Загальні положення при проектуванні покриття на автодорожніх мостах необхідно дотримуватись усіх вимог і правил чинних будівельних норм та стандартів, а також положень [379]. Розрахунок покриття спрямована на підвищення його довговічності за рахунок удосконалення проектування. Таке проектування полягає в конструюванні і методиці розрахунку з урахуванням багаторазового прикладання статичних і короткочасних динамічних навантажень. Асфальтобетонне покриття підвищеної коліестійкості (довговічності) на автодорожніх мостах складається з одного, двох або трьох шарів асфальтобетону, зчепленого з еластичним прошарком та плитою проїзної частини мосту.

Розрахунок покриття виконують за критерієм стійкості до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонному покритті, від дії транспортних засобів та температури та міцністю зчеплення при зсуві між асфальтобетонним покриттям, еластичним прошарком і плитою проїзної частини мосту. З метою підвищення загальної довговічності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах, необхідно виконувати розрахунок за допустимими напруженнями на розтяг при згині покриття [379].

Метод розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах включає в себе: постановку проблеми, загальні підходи до

вирішення; принципи конструювання асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах; розрахунку температури в асфальтобетонному покритті з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів; Розрахунку інтенсивності руху транспортних засобів; Критерію колієстійкості асфальтобетону в покритті на автодорожніх мостах; прогнозування колієутворення в покритті; Оцінка надійності при прогнозуванні колії в асфальтобетонному покритті на основі теорії ймовірності та алгоритму розрахунку, який запропоновано в розділі 3.

При розрахунку покриття враховують багаторазову дію короткочасних і статистичних навантажень, час дії навантаження для розрахунків призначають згідно [379]. При цьому необхідно враховувати дію горизонтального зусилля (час дії навантаження [379].) при гальмуванні транспортних засобів на автомобільних дорогах місцевого значення. Значення розрахункового діаметра відбитку колеса приймають згідно з [363]. При дії навантаження 0,1 с для розрахунку використовується динамічне значення діаметра відбитку колеса $D_д$, а при часу дії навантаження 1,0 і 10,0 с необхідно використовувати статичне значення діаметра відбитку колеса $D_н$ згідно з [363].

Дослідження напружено-деформованого стану системи «асфальтобетонне покриття – еластичний прошарок – плита проїзної частини» проводиться шляхом чисельного моделювання із залученням методу скінченних елементів та (або) з використанням аналітичних рішень теорії пружності.

Кліматичні дані – географічні межі дорожньо-кліматичних зон України і дорожнє районування України за умовами роботи асфальтобетону визначають згідно з [379, 363]. Середньомісячні, середні максимальні і мінімальні місячні температури повітря призначають згідно з [507].

6.2.2.1 Метод проектування асфальтобетонного покриття підвищеної стійкості до утворення колії. Метод проектування базується на математичній моделі (розділ 2) прогнозування та методі (методі 3) розрахунку утворення колії на асфальтобетонному покритті. Вихідними даними є: параметри зовнішніх і внутрішніх факторів умов роботи асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини та параметри

термов'якопружнопластичних характеристик асфальтобетону, що встановлюються експериментально. Алгоритм проектування представлено на рисунку 6.6. Послідовність методу розрахунку колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Розрахунок колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах слід виконувати у такій послідовності:

6.2.2.1.1 Встановлюємо вихідні дані асфальтобетонного покриття, що проектується згідно проекту та експериментально визначаємо термореологічні параметри матеріалів асфальтобетону, а саме типів Г, В, Б, А з максимальною крупністю щебеню 10, 15, 20 мм (Типи: Г, В-10, В-15, В-20, Б-10, Б-15, Б-20, А-10, А-15, А-20), щебенево-мастиковий асфальтобетон з максимальною крупністю щебеню 10, 15, 20 мм (ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20), асфальтобетон литий «Гусасфальт» з максимальною крупністю щебеню 10, 15 мм (АЛГ-10, АЛГ-15). Призначаємо тип покриття із асфальтобетону (Г, В-10, В-15, В-20, Б-10, Б-15, Б-20, А-10, А-15, А-20, ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20, АЛГ-10, АЛГ-15) на основі бітуму модифікованого полімером і експериментально встановлюємо його термореологічні характеристики (функція деформації, функцію релаксації та модуль пластичності, які залежать від температури і часу дії навантаження, функцію температурно-часового зміщення). Призначаємо крок (Δq_i) збільшення кількості полімеру (i =*SBS*, i =*SBR*, i =*EVA*) в бітумі. Призначаємо крок (Δh) збільшення товщини асфальтобетонного покриття. Призначаємо крок (Δp) збільшення тиску від дії пневматичного колеса транспортного засобу на покриття. Згідно аналітичних залежностей, отриманих у розділі 2, 3 визначаємо температуру в полосі накату асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту з урахуванням тертя пневматичних шин транспортних засобів ($T^{\max}$). Згідно аналітичних залежностей, наведених у розділі 2, 3 визначаємо сумарну інтенсивність руху ($\sum N_{сф}$) прикладення навантажень від дії транспортного засобу.

6.2.2.1.2 Згідно аналітичних рівнянь, які отримані за теорією у розділі 2 визначаємо розрахункову глибину колії ($h_p(\sum N_{сф})$) в асфальтобетонному покритті від сумарної інтенсивності руху ($\sum N_{сф}$) транспортного засобу і температури ($T^{\max}$).

6.2.2.1.3 На основі отриманої температури ($T^{\max}$), сумарної інтенсивності руху ($\sum N_{сф}$) транспортних засобів та розрахункової глибини колії ($h_p(\sum N_{сф})$) в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах визначаємо максимальну глибину колії ($h^{\max}(\sum N_{сф})$), яка складається з: розрахункової глибини колії $h_p(\sum N_{сф})$; зносу покриття ($h_\tau(N_{сф})$); глибини колії внаслідок доущільнення (h_Δ) в асфальтобетонному покритті від дії транспортного засобу і температури , а також висоту випору.

6.2.2.1.4 Якщо виконується нерівність $h^{\max}(\sum N_{сф}) < h_{Г.Д.}$ то можна вважати, що запропонована конструкція асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту відповідає заданому строку служби. Якщо в разі не виконання умови $h^{\max}(\sum N_{сф}) > h_{Г.Д.}$ то потрібно збільшити товщину покриття та / або кількість полімеру в бітум і привести відповідні розрахунки починаючи з пункту 6.2.2.1.1 та 6.2.2.1.3.

6.2.2.1.6 Також, при невиконанні умови $h^{\max}(\sum N_{сф}) > h_{Г.Д.}$ та автодорожньому мосту можливо призначення іншого типу асфальтобетону. Необхідно знову встановити його термореологічні характеристики і привести послідовно аналогічні розрахунки починаючи з п. 6.2.2.1.1.

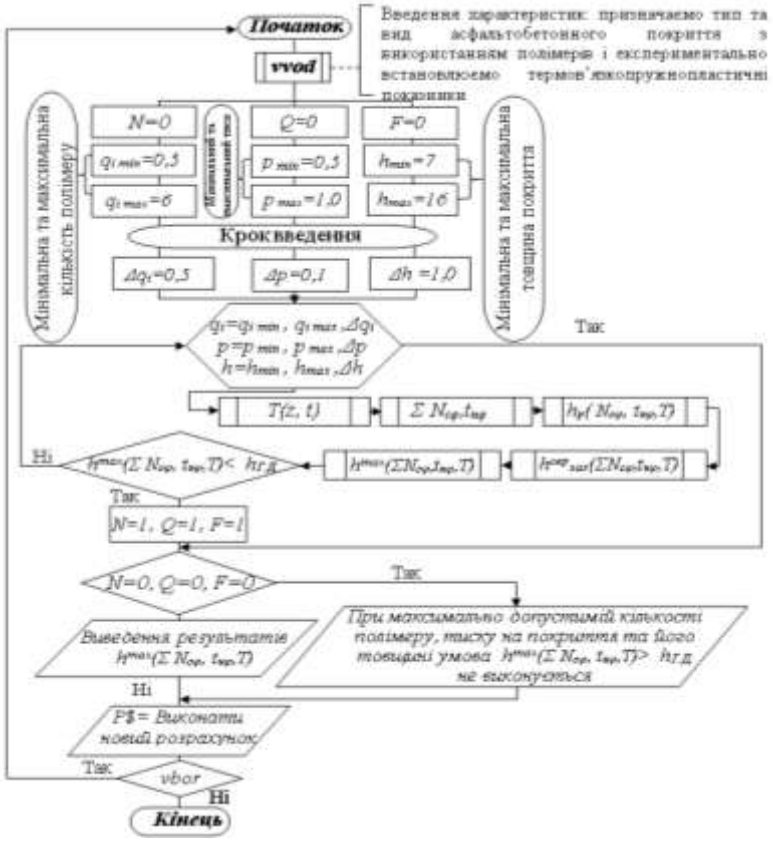


Рисунок 6.6 – Алгоритм проектування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, стійкого до утворення колії

6.2.2.1.7 При забезпеченні умови (п. 6.2.2.1.4) для даного асфальтобетонного покриття, підбираються ще 2 – 3 склади асфальтобетонів, що найкраще зарекомендували себе для використання на автодорожніх мостах і виконують відповідні розрахунки (починаючи з п. 6.2.2.1.1) для забезпечення умови п. 6.2.2.1.4.

6.2.2.1.7 Таким чином, підібравши декілька типів асфальтобетону з використанням полімерів, визначають більш оптимальний із розрахункових, з урахуванням техніко-економічного обґрунтування.

6.2.2.2 Метод розрахунку міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям та залізобетонною плитою проїзної частини автодорожнього мосту при зсуві. Метод застосовується для вибору гідроізоляційних матеріалів з метою забезпечення необхідної міцності при зсуві за високих літніх температур між асфальтобетонними шарами та залізобетонною плитою проїзної частини

автодорожнього мосту. Метод реалізовується у такій послідовності: відповідно до моделі визначення температурного режиму покриття встановлюється середньодобова максимальна температура кожного конструктивного шару; за результатами експериментального визначення термов'язкопружнопластичних характеристик асфальтобетону, для встановленої температури та розрахункового часу дії навантаження під час гальмування, встановлюють модулі деформації асфальтобетону та гідроізоляційного матеріалу; це дозволяє визначити граничне значення дотичних напружень $\tau_{лаб}$ з урахуванням визначеної температури між асфальтобетонним покриттям, залізобетонною плитою проїзної частини та відповідним видом еластичного прошарку, яке приводиться до розрахункового $\tau_{роз}$ за рахунок введення коефіцієнтів морозостійкості, варіації та нормованого відхилення; за допомогою номограм, встановлюють максимальне дотичне напруження τ від гальмування пневматичного колеса по асфальтобетонному покритті на контакті між асфальтобетоном і гідроізоляцією, а також максимальну горизонтальну відносну деформацію нижньої поверхні асфальтобетону ε; їх значення встановлюється за допомогою сучасних комп'ютерних програм і порівнюється з гранично допустимими величинами, що встановлюються експериментально. Міцність зчеплення при зсуві на контакті покриття і плити проїзної частини оцінюється за величиною дотичних напружень від дії вертикального і горизонтального зусилля при літній температурі на границі покриття і плити проїзної частини згідно з [368, 369, 467, 515].

Для забезпечення заданої надійності і необхідного коефіцієнту запасу міцності запроектованого типу асфальтобетону за критерієм міцності зчеплення при зсуві, він не повинен бути нижчим вимог табл. 6.3.

Визначають: максимальну температури ($t^{max}_{покр}$) асфальтобетонного покриття вдень; температуру ($t^{h}_{аб}$) між асфальтобетонним покриттям і прогоновою будовою мосту визначають за методикою (додаток В) [467, 515]. Якщо згідно розрахунку, температура між покриттям і плитою проїзної частини виявилася нижчою ніж 40 °С, тоді приймають для розрахунку температуру 40 °С.

Таблиця 6.3 – Розрахункові значення коефіцієнту надійності та коефіцієнту запасу міцності за критерієм міцності зчеплення при зсуві

Категорія дороги	Тип дорожнього одягу	Коефіцієнт надійності, $K_н$	Коефіцієнт запасу міцності, $K_{мц}$, за критерієм граничного стану – міцності зчеплення покриття з плитою мосту при зсуві	Коефіцієнт нормованого відхилення, t
1	2	3	4	5
I-а	Капітальний	0,97	1,2	2,19
I-б - II	Капітальний	0,95	1,1	1,71
III -V	Капітальний	0,90	1,0	1,32

Призначають модуль пружності асфальтобетону та еластичного прошарку (таблиця 6.4) згідно з [379] при розрахунковій температурі в нижній частині покриття.

Таблиця 6.4 – Розрахункові значення еластичного прошарку

Вид еластичного прошарку	Розрахункові значення короткочасного модуля пружності E, МПа, при температурі			Коефіцієнт морозостійкості	Коефіцієнт варіації
	40 °С	45 °С	50 °С		
наплавна	400	320	220	0,90	0,12
розпилювальна	210	160	100	0,75	0,18
оклеювальна	350	280	200	0,85	0,16
мастикова	260	210	140	0,80	0,14

Визначають модуль пружності багатошарової конструкції асфальтобетонного покриття з урахуванням еластичного прошарку внаслідок приведення до двошарової розрахункової моделі визначається за формулою:

$$E_{сер} = \sum_{i=1}^{n} E_i \cdot H_i \div \sum_{i=1}^{n} H_i \,, \qquad (6.15)$$

де n – кількість шарів дорожнього одягу;

E_i – модуль пружності і-го шару;

h_i – товщина і-го шару.

Визначають граничне значення дотичних напружень $\tau_{лаб}$ з урахуванням визначеної температури ($t_{аб}^{h}$) між покриттям і плитою проїзної частини і відповідного виду еластичного прошарку [467, 515]:

$$\tau_{лаб} = A \times t_{аб}^{h} + B, \tag{6.16}$$

де A, B – розрахункові параметри, які вибирають в залежності від виду еластичного прошарку згідно з табл. 6.5;

$t_{аб}^{h}$ – розрахункова температура між покриттям і плитою проїзної частини, що визначається за методикою (додаток В).

Таблиця 6.5 – Розрахункові параметри еластичного прошарку

Вид еластичного прошарку	Значення розрахункових параметрів		$k_г$
	А	В	
наплавний	мінус 0,031	2,11	1,0
мастиковий	мінус 0,030	2,03	0,95
розпилювальний	мінус 0,028	1,90	0,9
оклеювальний	мінус 0,027	1,84	0,87

Призначають коефіцієнт морозостійкості еластичного прошарку за показником міцності зчеплення при зсуві згідно з табл. 6.4. Визначають коефіцієнта варіації за показником міцності зчеплення при зсуві відповідно до призначеного виду еластичного прошарку згідно з табл. 6.4. Використовуючи номограму (рис. 6.7) призначають граничне дотичне напруження $\tau_{зс}^{0,3}$, яке виникає між покриттям і плитою проїзної частини для доріг місцевого значення (горизонтальне навантаження в даному випадку складає 0,3 від вертикального навантаження). Отримане значення необхідно помножити на коефіцієнт $k_г$ (згідно табл. 67.5), який враховує вплив виду еластичного прошарку на дотичні зусилля.

Використовуючи номограму (рис. 6.8) призначають максимальні дотичні напруження $\tau_{зс}^{0,7}$, які виникають між покриттям і плитою проїзної частини для доріг державного значення (горизонтальне навантаження в даному випадку

складає 0,7 від вертикального навантаження). Отримане значення необхідно помножити на коефіцієнт $k_г$ (призначають за табл. 6.5), який враховує вплив виду еластичного прошарку на дотичні напруження.

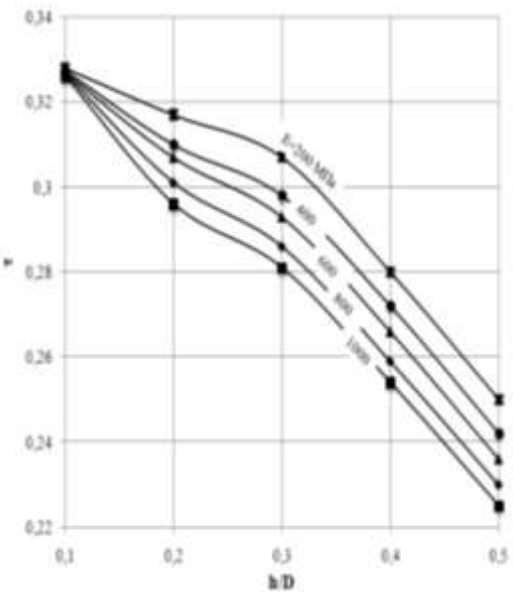


Рисунок 6.7 – Номограма для визначення дотичних напружень від дії вертикального навантаження (для доріг місцевого значення)

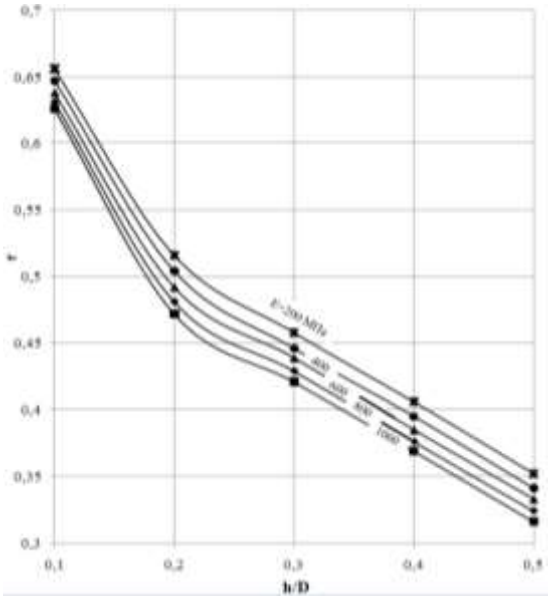


Рисунок 6.8 – Номограма для визначення дотичних напружень від дії вертикального навантаження (для доріг державного значення)

Вертикальне навантаження, що діє на асфальтобетонне покриття призначають за [363].

Визначають розрахункове значення зсувних напружень на контакті покриття з плитою проїзної частини [379, 467, 515]:

$$\tau_{роз} = \tau_{лаб} \times k_{тр} \times (1 - \upsilon_{\tau} \times t), \tag{6.17}$$

де $\tau_{лаб}$ – зсувні дотичні напруження, які виникають між покриттям, еластичним прошарком і плитою проїзної частини, що визначені експериментально згідно з методикою (розділу 4) [379], МПа;

$k_{тр}$ – коефіцієнт, який враховує вплив водоморозних факторів на еластичний прошарок (табл. 6.5 або згідно з методикою, [379]);

υ_τ – коефіцієнт варіації міцності зчеплення при зсуві (табл. 6.4);

t – коефіцієнт нормованого відхилення (табл. 6.6).

Визначають граничні допустимі зсувні дотичні напруження для доріг місцевого значення [379, 467, 515]:

$$\tau_{зс}^{н} = \tau_{зс}^{0,3} \cdot p, \tag{6.18}$$

де $\tau_{зс}^{0,3}$ – максимальні дотичні напруження, які виникають між покриттям і плитою проїзної частини, визначають згідно з рис. 6.7, МПа;

p – розрахунковий питомий тиск від колеса на покриття, який призначають згідно [363];

Таблиця 6.6 – Розрахункові значення коефіцієнту надійності та коефіцієнту запасу міцності за критерієм міцності зчеплення при зсуві

Категорія дороги	Тип дорожнього одягу	Коефіцієнт надійності, $K_н$	Коефіцієнт запасу міцності, $K_{мц}$, за критерієм граничного стану – міцності зчеплення покриття з плитою мосту при зсуві	Коефіцієнт нормованого відхилення, t
1	2	3	4	5
І-а	Капітальний	0,97	1,2	2,19
І-б - ІІ	Капітальний	0,95	1,1	1,71
ІІІ -V	Капітальний	0,90	1,0	1,32

Визначають граничне допустиме значення зсувних дотичних напружень для доріг державного значення [379, 467, 515]:

$$\tau_{зс}^{н} = \tau_{зс}^{0,7} \cdot p, \tag{6.19}$$

де $\tau_{зс}^{0,7}$ – максимальні дотичні напруження, які виникають між покриттям і плитою проїзної частини, визначають згідно з рис. 6.8, МПа.

Виконують перевірку міцності зчеплення при зсуві на контакті покриття з плитою проїзної частини для всіх доріг [379, 467, 515]:

$$K_{мц}^{\tau} < \frac{\tau_{роз}}{\tau_{зс}^{н}}, \qquad (6.20)$$

де $K_{мц}^{\tau}$ – мінімальний необхідний коефіцієнт міцності з урахуванням нормативного коефіцієнту надійності, табл. 6.6, то конструкцію вважають такою, що відповідає вимогам міцності при дії зсувних дотичних напружень. В іншому випадку потрібно коригувати товщину асфальтобетонного покриття;

$\tau_{роз}$ – розрахункове значення зсувних напружень на контакті покриття з плитою проїзної частини, МПа;

$\tau_{зс}^{н}$ – граничне допустиме значення зсувних дотичних напружень, МПа.

У випадку, якщо умова міцності зчеплення при зсуві не виконується, необхідно замінити матеріал покриття або еластичного прошарку і знову виконати розрахунок в наведеній послідовності. Приклад розрахунку перевірки умови міцності зчеплення асфальтобетонного покриття між плитою мосту при зсуві наведено в Додатку В.

6.2.2.3 Метод оцінки довговічності асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини.

Метод розрахуноку асфальтобетонного покриття на розтяг при згині, з урахуванням впливу водоморозних факторів та параметрів навантаження на порушення суцільності асфальтобетону, що дає можливість підвищувати стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії без утворення дефектів у вигляді тріщин

Відповідно до загальних положень п. 6.2.1 необхідно виконувати розрахунок асфальтобетонного покриття на розтяг при згині з урахуванням різного часу дії навантаження з метою підвищення довговічності

асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах [379]. Тому для забезпечення нормованої надійності згідно з [363] та коефіцієнту запасу міцності запроектованого асфальтобетону за критерієм міцності на розтяг при згині, повинний відповідати вимогам табл. 6.7 [379].

Потрібний рівень проектної надійності і строк служби асфальтобетонного покриття повинен бути в кожному конкретному випадку зазначений в завданні на проектування, проте строк служби не може бути нижче за норми строків експлуатації дорожніх одягів між капітальними ремонтами згідно [356, 363]. Розрахункові значення деформаційних характеристик (модуль пружності) асфальтобетонів наведені в [379].

Таблиця 6.7 – Розрахункові значення коефіцієнту надійності та коефіцієнту запасу міцності за критерієм згину асфальтобетонного покриття

Категорія дороги	Тип дорожнього одягу	Коефіцієнт надійності, $K_н$	Потрібний коефіцієнт запасу міцності, $K_{пр}^{пр}$, за критерієм граничного стану міцність при згині асфальтобетону	Коефіцієнт нормованого відхилення, t
1	2	3	4	5
I-а	Капітальний	0,97	1,50	2,19
I-б - II	Капітальний	0,95	1,43	1,71
III - V	Капітальний	0,90	1,33	1,32

При визначенні модуля пружності багатошарового асфальтобетонного покриття з урахуванням еластичного прошарку можна приводити до двошарової розрахункової моделі (6.15) [379].

При розрахунку асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності за критерієм міцності на розтяг при згині, при коефіцієнті завантаження понад 0,7 з повільним рухом транспортних засобів та екстремальних зупинок з тривалістю дії навантаження t_n (0,1) с і t_i (1,0, 10,0) с виникаючі горизонтальні розтягуючі нормальні напруження під дією повторних короткочасних навантажень не повинні перевищувати протягом заданого строку служби призводити до

утворення тріщин від втомного руйнування [379, 356, 363]. Для цього має бути забезпечена умова:

$$\sigma_r^{t_n} < \frac{R_N^{t_n+t_i}}{K_{np}^{mp}}, \tag{6.21}$$

де K_{np}^{mp} – необхідний коефіцієнт міцності з урахуванням заданого рівня надійності (табл. 6.7) [379];

$R_N^{t_n+t_i}$ – міцність матеріалу шару на розтяг при згині, з урахуванням втомних явищ від дії розрахункового циклічного навантаження з тривалістю дії t_n (0,1) с і t_i (1,0, 10,0) с, [379];

$\sigma_r^{t_n}$ – найбільше напруження розтягуюче в асфальтобетонному шарі при тривалості дії навантаження t_n (0,1) МПа, згідно з [379].

Розрахункові розтягуючі напруження визначають за формулою:

$$\sigma_r^{t_n} = \overline{\sigma_r^{t_n}} \times p \times K_б \tag{6.22}$$

де $\overline{\sigma_r^{t_n}}$ – розтягуюче напруження з часом при тривалості дії навантаження t_n (0,1), при розрахунковому відбитку колеса [363], яке передає навантаження. Розтягуюче напруження визначається за номограмою (рис. 6.9);

p – питомий тиск колеса на покриття, МПа, приймають згідно з [363];

$K_б$ – коефіцієнт, що враховує особливості напруженого стану покриття під колесом автомобіля (колесо зі спареними балонами, $K_б$ = 0,85, колесо з одним балоном $K_б$ = 1,0).

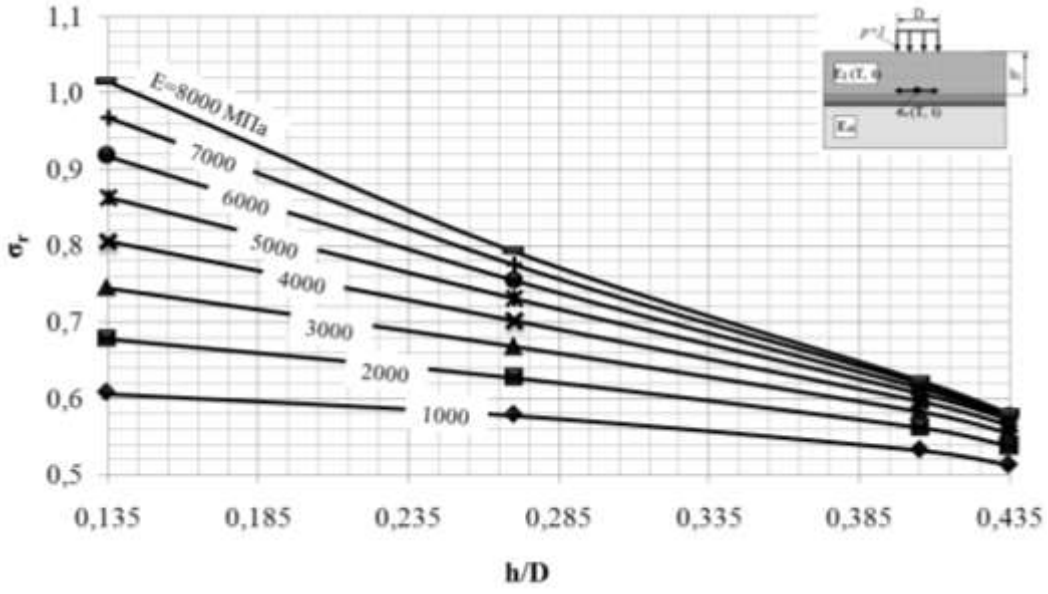


Рисунок 6.9 – Номограма для визначення розтягуючого напруження $\overline{\sigma_r^{t_n}}$ при згині від одиничного навантаження в нижній частині асфальтобетонного покриття

Для визначення розтягуючого напруження $\overline{\sigma_r^{t_n}}$ за формулою (6.22) визначають середній модуля пружності з часом дії навантаження t_n (0,1)с, з урахуванням розрахункових характеристик модуля пружності для асфальтобетону [379] і еластичного прошарку [379].

Міцність асфальтобетонного шару $R_N^{t_n+t_i}$ на розтяг при згині з урахуванням втомних явищ від дії розрахункових циклічних навантажень з тривалістю дії t_n (0,1) с і t_i (1,0, 10,0) с визначається за формулою:

$$R_N^{t_n+t_i} = R_0^{t_n} \times k_T \times k_{mp} \times k_{кп}^{t_n+t_i} \times (1-\nu_R \times t), \qquad (6.23)$$

де $R_0^{t_n}$ – нормативне значення міцності на розтяг при згині при розрахунковій температурі 0 °С та однократному прикладанні навантаження з часом дії t_n (0,1) с, приймають за даними [379];

k_T – коефіцієнт, який враховує зниження міцності матеріалу покриття [379];

k_{mp} – коефіцієнт, який враховує температурну тріщиностійкість матеріалу згідно з [379];

$k_{кп}^{t_n+t_i}$ – коефіцієнт, який враховує зниження міцності внаслідок втомних явищ при багаторазовому збільшенні навантаження, при тривалістю дії t_n (0,1) с і t_i (1,0, 10,0) с;

ν_R – коефіцієнт варіації міцності на розтяг при згині, приймають згідно з [379].

Коефіцієнт $k_{кп}^{t_n+t_i}$, який відображає вплив на міцність втомних процесів, визначається за формулою:

$$k_{кп}^{t_n+t_i} = k_{пр} \times \sum N_{t_n+t_i}^{-\left(\frac{1}{m}\right)}, \tag{6.24}$$

де $\sum N_{t_n+t_i}$ – розрахункова еквівалентна сумарне число збільшеного розрахункового навантаження, як з тривалістю дії t_n (0,1) с, і t_i (1,0, 10,0) с, за строк експлуатації асфальтобетонного покриття, визначається за формулою:

$$\sum N_{t_n+t_i} = \delta_{10} \times \sum N_p \times \beta_{t_n+t_i} + \left(1-\delta_{t_i}\right) \times \sum N_p, \tag{6.25}$$

де δ_{t_i} – частка автомобілів від загальної кількості автомобілів в потоці, які затримуються (визначається на етапі техніко-економічних вишукувань при визначенні інтенсивності руху і складу транспортного потоку);

$\sum N_p$ – розрахункове сумарне число збільшення розрахункового навантаження за строк служби покриття;

$\beta_{t_n+t_i}$ – коефіцієнт, що запропоновано проф. Мозговим В.В, який відображає вплив на втомне руйнування розрахункових циклічних навантажень з тривалісю дії t_n (0,1) с і t_i (1,0, 10,0) с, і визначається за формулою:

$$\beta_{t_n+t_i} = \left(\frac{R_0^{t_n} \times \sigma_r^{t_i}}{R_0^{t_i} \times \sigma_r^{t_n}} \right)^{-\frac{1}{m}}, \qquad (6.26)$$

де $R_0^{t_n}$ – нормативне значення граничного опору розтягу при згині при розрахунковій температурі 0 ^{0}С та одноразовому збільшенні навантаження з тривалістю дії t_n (0,1) с, яке приймають за [379], МПа;

$R_0^{t_i}$ – теж саме, але з тривалістю t_i (1,0, 10,0) с, МПа;

$\sigma_r^{t_i}$ – найбільше напруження розтягуюче в асфальтобетонному шарі при тривалості дії навантаження t_i (1,0, 10,0) с МПа.

Приклад розрахунку наведений в методиці проектування асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів [379].

6.3 Технологічні способи

Методи контролювання з виготовлення, транспортування, укладання та ущільнення асфальтобетонних сумішей при будівництві асфальтобетонних покриттів. Контролювання властивостей при виготовленні асфальтобетонної суміші. Контроль якості приготування та приймання асфальтобетонної суміші повинен здійснюватись при дотриманні вимог [5, 142, 344, 354, 370, 453, 475, 482, 449 – 452, 504] та таблиці 6.1.

Контролювання властивостей асфальтобетонної суміші при її транспортуванні. З метою підвищення колієстійкості покриття необхідно контролювати властивості досліджуваних асфальтобетонів в залежності від часу транспортування асфальтобетонної суміші. Необхідно перевіряти таки показники: зерновий склад асфальтобетонної суміші; фізико-механічні властивості асфальтобетону; стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону; стікання в’яжучого з щебенево-мастикової суміші; вдавлювання штампу у асфальтобетоні литому.

6.3.1 Зерновий склад асфальтобетонної суміші необхідно перевіряти з урахуванням часу її транспортування у зв’язку з тим, що із збільшенням часу транспортування суміш в кузові автомобіля починає розшаровуватись, це призводить до так званих процесів сегрегації [501]. Тому, необхідно відбирати асфальтобетонну суміш з конкретного об’єкту де буде вона застосовуватись. Зерновий склад асфальтобетонної суміші перевіряється за вимогами [142, 449 – 452, 504].

6.3.2 Фізико-механічні властивості асфальтобетону. Показники фізико-механічних властивостей асфальтобетону повинні відповідати вимогам [142, 449 – 452, 504] та таблиці 6.1 з урахуванням відповідного часу транспортування асфальтобетонної суміші в кузові автомобіля.

6.3.3 Методика оцінки впливу рівня невідповідності структурно-технологічних факторів на стійкість асфальтобетону до утворення колії. Суть методики полягає у співставленні результатів визначення показника стійкості асфальтобетону до утворення колії, як величини відношення до впливу $S_h^{до\ впл.}$ невідповідностей за цим показником, після їх впливу $S_h^{піс.впл.}$. Суть методики полягає оцінці стійкості асфальтобетону в залежності від часу транспортування в кузові автомобіля асфальтобетонної суміші на об’єкту. Як відомо з практики [501] на дальність перевезення асфальтобетонної суміші впливають так звані процеси сегрегації [501], які призводять до погіршення показник стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії. Тому необхідно відбирати асфальтобетонні суміші з даного об’єкту і в лабораторних умовах виготовляти зразки – плити та випробовувати на показник стійкості до накопичення залишкових деформацій $S_h^{піс.впл.}$ при температурі 50 ^{o}C та еквівалентному розрахунковому навантаженні 57,5 кН на огумлене колесо при кількості проходів (N=20000) по одному сліду асфальтобетонного зразка-плити за методикою (розділ

4) [501]. Отримане значення необхідно оцінювати за показником коліємкості асфальтобетону і перевіряють за умовою:

$$\frac{S_h^{піс.впл.}}{S_h^{до\ впл.}} \le [П], \tag{6.27}$$

де $S_h^{піс.впл.}$ – експериментальне значення інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонних зразках, який залежить від часу транспортування і визначається за методикою (розділ 4), [501];

$S_h^{до\ впл.}$ – значення інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій у асфальтобетонних зразках приймається за залежністю (6.28);

$[П]$ – показник невідповідності за стійкістю асфальтобетону до утворення колії, рівний 1.

Даний критерій (6.27) дозволяє оцінити коліємкість асфальтобетону з урахуванням часу транспортування, якщо умова становить $П_{S_w} > 1$ то такий асфальтобетон є не коліємким, а покриття, яке влаштоване на даному автодорожньому мосту призведе до інтенсивного колієутворення від дії транспортних засобів та температури покриття понад 50 ^{o}C. Якщо умова становить $П_{S_w} < 1$ то такий асфальтобетон є стійкий до утворення колії і має підвищену довговічність. Рекомендовано для I, II категорії, значення не більше $П_{S_w} = 0{,}8$.

$$S_h^{до\ впл.} = h_н \cdot N_к \tag{6.28}$$

N_K – кількість проходів навантаження після, яких знімається залишкова деформація за методикою (розділ 4) і приймається 10000.

Запропонований критерій (6.27) дозволить контролювати асфальтобетонну суміш на всіх об'єкта автодорожніх мостів за показником колієстійкості. Для забезпечення умови (6.27) необхідно забезпечувати однорідність суміші та температури за рахунок застосування перевантажувачів. Дана методика є ефективною для асфальтобетонів з вмістом щебеню понад 50%.

6.3.4. Методика визначення показника розшарування щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші від термінів її зберігання і транспортування. Методика полягає у встановленні допустимого значення (з точки зору забезпечення стійкості щебенево-мастикового асфальтобетону до утворення колії) показника стікання щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші, в залежності від часу транспортування та зберігання в накопичувальному бункері. Потрібно дотримуватись вимог до показника стікання E_p ЩМАС [5, 499, 451] в залежності від часу зберігання та транспортування за залежністю:

$$E_p(t_{Tp}) \le E_{don}(t_{Tp}) \tag{6.29}$$

Де E_p – розрахунковий показник стікання, який залежить від часу транспортування ЩМАС і визначається за методикою [5, 499, 451];

$E_{don}(t_{Tp})$ – допустимий показник стікання, який приймають в залежності від часу транспортування в кузові автомобіля і визначається за експоненційною (R^2=0,95) залежністю

$$E_p \le B \cdot e^{-b_1 \cdot t_{Tp}} \cdot \Delta_б \cdot (1 + \frac{t_б}{t_б^н})^l, \tag{6.30}$$

де E_p – фактичний показник стікання в'яжучого, який залежить від часу транспортування ЩМАС, %;

B – показник стікання в'яжучого із ЩМАС, що дорівнює 0,20 % за масою; b_1, $\Delta_б$, l – коефіцієнти, що встановлюються експериментально (b_1=0,005,

$\Delta_{накоп}$ – коефіцієнт, який враховує час зберігання суміші в накопичувальному бункері на асфальтобетонному заводі, що рівний 1 при часі зберігання до 30 хв., а 0,8 при часі зберігання понад 30 хв.);

$t_{Тр}$– час транспортування суміші, хв.;

$t_б$ – час зберігання суміші у бункері, хв.;

$t_б^н$ – безпечний час зберігання суміші у бункері, хв.

Для забезпечення однорідності суміші за показником стікання, а саме методом статистичної обробки значень показника стікання в'яжучого щебенево-мастикової асфальтобетонної суміші, який повинен бути не більше за нормативний показник стікання в'яжучого B відповідно до [451]. Для цього відбирають 10 локальних проб сумішей в окремих місцях кузова автосамоскида вагою від 2 кг до 3 кг кожна.

Перед укладанням кожен автомобіль з асфальтобетонною сумішшю проходить візуальний контроль якості, де оцінюють рівномірність розподілу мінеральних частинок та в'яжучого і колір. Додатково до цього, під час вивантаження, візуально оцінюють рухливість суміші, розшарування (за наявністю згустків в'яжучого та його прилипання до кузова), а також її зручноукладальність при влаштуванні [5, 499].

Контроль температури асфальтобетонної суміші проводиться відповідно до методики, викладеної в пунктах 6.3.5, 6.3.6 та [5, 499].

Середня температура ЩМАС у кузові автомобіля, в залежності від виду в'яжучого, повинна бути не менше ніж мінімально допустиме значення температури на початку укладання даної суміші [5, 499].

Зберігати та транспортувати модифіковані ЩМАС слід таким же чином як і традиційні асфальтобетонні суміші [5, 142, 499].

6.3.5 Методика встановлення мінімально допустимої температури ущільнення асфальтобетонної суміші при влаштуванні покриття. Контролювання температури доставленої на об'єкт суміші в кузові транспортного засобу. Перед

завантаженням асфальтобетонної суміші в бункер асфальтоукладальника, потрібно перевірити її температуру. При перевірці температури асфальтобетонної суміші використовують: переносні контактні вимірювачі (термометри) зі щупами довжиною від 25 до 50 см для вимірювання температури всередині (ядрі) асфальтобетонної суміші; · безконтактні термометри для вимірювання температури на поверхні. Вимірювання температури проводиться в точках верхнього, середнього та нижнього поясів, а також в ядрі. Точки верхнього поясу знаходяться на поверхні асфальтобетонної суміші в кузові автомобіля, точки середнього поясу знаходяться на глибині 20 см від поверхні асфальтобетонної суміші, точки нижнього поясу знаходяться на глибині 50 см. Температура асфальтобетонної суміші в кузові автомобіля орієнтовно визначається за формулою:

$$T = \frac{T_П + T_Я}{2} \tag{6.31}$$

де $T_П$ – температура на поверхні – середнє арифметичне значення температур в точках верхнього та середнього поясів (точки верхнього поясу знаходяться на поверхні, точки середнього поясу – на глибині 20 см);

$T_Я$ – температура ядра – середнє арифметичне значення температур в точках [1, 14] 25 нижнього поясу (в межах ядра, на глибині 50 см).

Завантаження асфальтобетонної суміші в бункер асфальтоукладальника дозволяється, якщо виконується умова:

$$T \geq T_{ПОЧ.УЩ} \tag{6.32}$$

де T – температура асфальтобетонної суміші в кузові автомобіля;

$T_{ПОЧ.УЩ}$ – температура початку ущільнення асфальтобетонної суміші.

Якщо умова $T \le T_{ПОЧ.УЩ}$ не виконується, то суміш бракується.

6.3.6 Контролювання властивостей асфальтобетонної суміші при її укладанні та ущільненні. Під час укладанні асфальтобетонної суміші контролюється неперервність і синхронність процесу влаштування шару. Ущільнення необхідно виконувати відразу після вкладання. Під час ущільнення контролюється температура його завершення. Ця температура встановлюється окремо для кожної суміші на основі визначення коефіцієнту ущільнення $К_{ущ}$. зразків асфальтобетону, виготовлених із даної суміші в залежності від температури. За температуру завершення ущільнення приймається така температура, при якій досягається коефіцієнт ущільнення не менше нормативного значення (0,98).

Для встановлення температур, при яких асфальтобетонна суміш може бути ущільнена до необхідного рівня за коефіцієнтом ущільнення не менше мінімально допустимого значення згідно [363, 499], слід використовувати методику ущільнення асфальтобетонної суміші за допомогою лабораторного секторного пресу згідно [460, 482]. Запроектована асфальтобетонна суміш розігрівається до відповідних температур і ущільнюється на секторному пресі [460, 482]. Отримані зразки, що ущільнені при різних температурах, в орієнтовному діапазоні від 80 ^{o}C до 180 ^{o}C використовуються для визначення щільності та коефіцієнта ущільнення.

На основі цих даних будують графічну залежність коефіцієнту ущільнення асфальтобетону від його температури ущільнення $K_{ущ} = f(T)$. За допомогою побудованої графічної залежності за схемою, що наведено в роботі [5, 499], встановлюють значення температури закінчення ущільнення $T_{ущ}^{зак}$ та значення максимально допустимої температури ущільнення $T_{ущ}^{\max}$ і робочого діапазону температур при ущільненні: $T_{ущ}^{\max} - T_{ущ}^{зак}$

Мінімально допустиме значення коефіцієнта ущільнення асфальтобетону визначається за формулою:

$$[T]_{\min}^{доп} = T_{ущ}^{зак} + \Delta T\,, \qquad (6.33)$$

де $[T]_{\min}^{доп}$ – мінімально допустима температура початку укладання;

$T_{ущ}^{зак}$ – мінімально допустима температура закінчення ущільнення, визначається за експериментальною залежністю $k_{ущ} = f(T)$ згідно методики, наведеної [499];

ΔT – температурний інтервал, що забезпечує можливість укладання і ущільнення асфальтобетону до його охолодження нижче $T_{ущ}^{зак}$

При цьому температура асфальтобетонної суміші не повинна перевищувати її максимально допустиме значення для кожного конкретного виду в'яжучого згідно з [142, 451, 452] та не повинна бути більше максимально допустимого свого значення при ущільненні, що визначається за методикою [142, 451, 452].

Для зменшення втрат тепла асфальтобетонною сумішшю під час транспортування слід застосовувати великовантажні автомобілі вантажопідйомністю 25-40 тон з кузовами, що підігріваються газами двигунів, повітряним або масляним прошарком кузова, а також обов'язковим укриттям гарячої суміші тентами. При цьому для збереження температури асфальтобетонної суміші на автосамоскидах необхідно влаштовувати повітряний прошарок між тентом та поверхнею суміші.

Рух автомобільного транспорту при транспортуванні асфальтобетонної суміші необхідно організувати таким чином, щоб забезпечити безперервну роботу бригади з укладання суміші.

Укладання асфальтобетонної суміші рекомендується виконувати асфальтоукладальниками, що обладнані подвійним трамбуючим брусом та вигладжуючою віброплитою або трамбуючим брусом, вигладжуючою віброплитою та гідравлічними пресувальними планками.

Контроль якості ущільнення асфальтобетонних сумішей і якості асфальтобетону у покритті здійснюється шляхом відбору трьох кернів або вирубок з покриття, що передбачений [483], та їх випробовування [142, 451, 452].

У процесі випробування визначають: середню густину та водонасичення зразків-кернів або зразків, відокремлених від вирубки; середню густину, водонасичення, границю міцності при стиску за [142, 451, 452] температури 20 ºС, коефіцієнт довготривалої водостійкості зразків, переформованих у лабораторії, коефіцієнт бокового деформування.

Вище нведена методика полягає у встановленні допустимих температур влаштування асфальтобетонних шарів для уникнення недостатнього ущільнення суміші, яке сприятиме утворенню колії у процесі експлуатації покриття за рахунок його доущільнення. Для цього використовуються результати двох експериментальних закономірностей, що отримуються за допомогою секторного пресу та коліємір у, одна з яких являє собою залежність коефіцієнта ущільнення асфальтобетону від температури ущільнення, а інша відображає залежність глибини колії асфальтобетону від коефіцієнта ущільнення. Отримані експериментальні дані використовуються для графічного способу встановлення допустимої температури, схема якого представлена на рисунку 6.10.

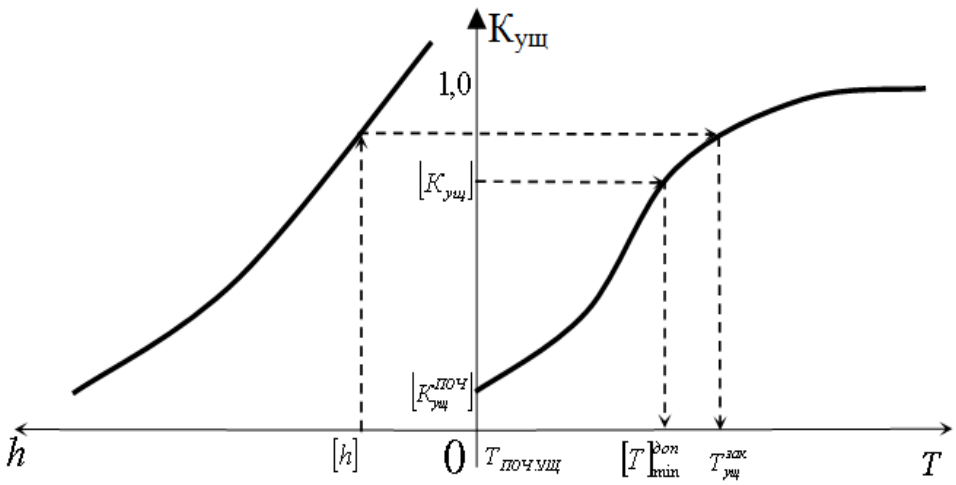


Рисунок 6.10 – Схема встановлення допустимих температур ущільнення асфальтобетонної суміші для забезпечення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії

6.3.7 Контролювання температури та властивостей асфальтобетонної суміші литої «Гусасфальт» при її укладанні та ущільненні. Гусасфальт перевозять у спеціальному Кохері, що обладнаний спеціальним механізмом горизонтального переміщення і системою нагрівання. Кохер місткістю 15 тон, який подається під завантаження суміші «Гусасфальт» тільки в прогрітому стані із обертовим валом системи перемішування. Прогрівання здійснює машиніст кохера протягом 45-50 хвилин до 70-100 ^{o}C.

У процесі транспортування асфальтобетону до місця призначення машиніст кохера повинен перевіряти якість «Гусасфальта» мінімум раз на годину, для цього він повинен контролювати його температуру 210-230 ^{o}C і тиск в системі гідроприводу механізму горизонтального перемішування суміші (хв. 180 мах..320 бар). Гусасфальт необхідно перемішувати в кохері, після додавання в суміш відповідних присадок [370], не менше 60 хвилин для забезпечення однорідності. Після вивантаження на об’єкті суміші кохером, який необхідно очистити від залишків суміші в спеціально відведеному для цього місці, тривалість становить 30-45 хв.

Контроль стану Гусасфальту виконується візуально: температура не повинна перевищувати 240 ^{o}C, при прибутті кохера на об’єкт, температура суміші повинна бути виміряна вручну за допомогою лазерного пірометром або тепловізором; при прибутті кохера на об’єкт в’язкість суміші контролюється за показниками манометра в системі гідроприводу механізму горизонтального перемішування; для досягнення оптимальної в’язкості додаються полімерні модифікатори до бітумі [370] безпосередньо в кохер з Гусасфальтом; в разі знаходження Гусасфальту в кохері понад 2-х годин, необхідно додавати в суміш полімерні модифікатори внаслідок вигорання полімерів при високій температурі; обсяг модифікаторів залежить від тиску в гідросистемі механізму перемішування кохера, зовнішнього вигляду суміші, а також часу перемішування.

Підготовка та монтаж направляючих рейок та репрофілювання вирівнювання (заповнення нерівностей) залізобетонної плити виконують у

відповідності до вимог, що наведено в монографії [370]. Особливості влаштуванні дорожнього покриття з Гусасфальту необхідно дотримуватись вимог згідно [370].

Контроль якості покриття з «Гусасфальту» виконують періодичну перевірку товщини і горизонтальності шарів. Товщину шарів перевіряють на фактичній основі, для цього проводяться перевірка з боків полотна і виконується замірюванням товщини шару за фінішером. Відбір проб «Гусасфальту» у вигляді зразків-плит для кожної партії. Факультативний відбір проб у вигляді зразків-кубів для виготовлення випробувань на статичне вдавлювання.

Випробування на статичне вдавлювання зразків-кубів «Гусасфальту» виконують у відповідності методики [370, 449, 450, 504] і перевіряють за вимогами таблиці 6.1. Після чого зразки плити розміром 228 х158 60 мм піддаються випробуванням на стійкість до накопичення залишкових деформацій за методикою (розділ 4) і значення глибини колії перевіряється за таблицею 6.1., а зерновий склад перевіряють за вимогами [370, 449, 450, 504].

6.4. Практичне застосування результатів наукових досліджень

Автором отримано теоретичні і експериментальні дослідження, які знайшли своє практичне застосування, а саме: отримані алгоритми і програми для виконання розрахунків асфальтобетонного покриття на колієстійкість на автодорожніх мостах розробці типових конструкцій підвищеної довговічності; розробці нормативних документів; розробці гідроізоляційних матеріалів; розробці зернових складів асфальтобетонів підвищеної колієстійкості; проектуванні рецептів бітуму модифікованого різними полімерами; проектуванні асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах підвищеної довговічності; розробці пропозиції по удосконаленню дорожньої галузі в Україні; запропоновано подальші наукові дослідження. Все вище наведене підтверджується довідками впровадження (додаток Ж).

Розроблено для практичного застосування комплексне бітумне в’яжуче з використанням полімерів «Полігум», яке дозволило створити виробництво по

виготовленню в Україні і країнах СНД компанію ТОВ «Петро - Хім Технології Україна» (додаток Ж).

Отримано сертифікат стажування в компанії «Rheinheim SA» по вивченню досвіду з виробництвом гідроізоляційних матеріалів «Eliminator» і системи якості ISO для транспортного будівництва, а також його практичного застосування (додаток Ж).

Запропоновано метод оцінки експлуатаційної стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії у асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Суть даної методики полягає у визначенні стійкості покриття до колієутворення в період його експлуатації. Тому даний метод дозволить з прогнозувати на конкретний термін служби покриття з відповідною інтенсивністю N, ремонтні заходи по відновленню рівності покриття на автодорожніх мостах. Даний метод дозволить зекономити кошти на ремонтні заходи покриття на автодорожніх мостах з урахуванням дорожньо - кліматичних умов його експлуатації.

З цією метою запропоновано в якості граничного стану асфальтобетонного покриття розрахункове значення накопичення залишкових деформацій приймати за залежністю (3.8), що є функцією чотирьох перемінних. У разі перевищення показник сумарної колії (3.8) в асфальтобетонному покритті, що утворилась в період експлуатації транспортних засобів за допустиме значення $П_{доп}$ то у такому випадку необхідно застосовувати заходи по відновлюванню рівності відповідно до вище наведених методів і пункту 6.4.5 та з урахуванням технологій Сларі-Сіл (Мультімак) [517] згідно діючих нормативних документів.

Тому пропонується для прогнозування ремонтних заходів оцінювати граничний стан за показником стійкості до накопичення залишкових деформацій $h^{max}_{заг/вип}$ в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, що накоплений за строк експлуатації і який повинен бути менший за допустиме значення $П_{доп}$ і перевіряється за умовою:

$$h_{\text{заг/вип}}^{\max} \le h_{\text{доп}} \qquad (6.37)$$

де $h_{\text{доп}}$ – допустиме значення стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії в асфальтобетонному покритті, визначається за формулою.

Гранично допустиме значення стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії в асфальтобетонного покриття визначають з урахуванням допустимої глибини колії $h_{доп}$ (табл. 6.8), що запропоновано в роботі [87]

Таблиця 6.8 – Допустима глибина колії $h_{доп}$

Шифр району	Глибина колії на різних категоріях дороги, мм/ розрахункова швидкість руху, км/год			
	I/>120	II/100	III/80	IV-V/60
А-1; А-2	5	10	15	20
А-3; А-4				
А-5; А-6				
А-7				

З урахуванням вищенаведених вимог рекомендується у зв'язку з небезпекою утворення глибокої колії встановити обмеження для покриттів по параметру допустимої глибини колії, що наведено в таблиці 6.8.

6.4.1 Методи боротьби з колійністю в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостів. Як відомо, в період експлуатації та високої температури на асфальтобетонному покритті можливе виникнення різних деформацій, в тому числі і колії. Основні причини і види виникнення колії в покритті на автодорожніх мостах сформульовані в розділі 2 , які діляться на дві групи: фізико-механічні та конструктивно-технологічні. На кожній полосі руху може утворюватись одна або дві колії, а саме зовнішня, яка розміщена в полосі накату з правої сторони по напрямку руху транспортного засобу та внутрішня, яка розміщена з лівої сторони в полосі накату по напрямку руху (розділі 2). В

основному інтенсивніше утворюється колія в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах з правої частини руху транспортних засобів у зв'язку з тим, що в основному сконцентрований рух великовагових транспортних засобів. Тому для вивчення причин утворення колії і обґрунтування видів по ремонту, необхідно виконувати обстеження стану покриття з колією на проїзній частині мосту. Колія в асфальтобетонному покритті, може бути утворена в результаті деформування поперечного профілю на проїзній частині автодорожнього мосту у вигляді поглиблення по полосам накату з гребенем випору (розділ 2) та без випорів (розділ 2).

Утворення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах у результаті: інтенсивного руху дії пневматичних коліс транспортних засобів при високій температурі повітря, а також від генерації тепла пневматичних шин, яке сконцентроване в полосі накату; недостатньої коліємстійкості асфальтобетонного покриття та його шарів; недостатнього зчеплення між асфальтобетонним покриттям та основою при зсуві; доущільнення покриття в полосі накату; стирання верхнього шару покриття в полосі накату від дії шипованих шин; пластичне деформування асфальтобетонного покриття.

Накопичення залишкових деформацій може відбуватись в одному або одразу в декількох шарах асфальтобетонного покриття. Поверхня асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах розміщена в зоні максимальних температур, а також сприймає максимальні навантаження від дії пневматичних коліс транспортних засобів. Тому, саме покриття піддається суттєвому деформуванню у найбільшій степені, це і являється причиною утворення колії. Також причиною утворення колії в асфальтобетонному покритті може бути за рахунок нижнього шару асфальтобетону та міцності його зчеплення з гідроізоляційним матеріалом та цементобетонною основою автодорожнього мосту. При боротьбі з колійності в асфальтобетонному покритті необхідно враховувати матеріалознавчі, конструктивні та технологічні методи, що наведено вище. Максимальна глибина колії складається із висоти випору і глибини впадини в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах.

Запропоновані методи з попередження і ліквідації колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, які базуються на теоретичних (розділ 2, 3), експериментальних (розділ 4, 5) та практичних результатах [5, 344, 354, 370, 418]. Пропонується основні методи з попередження і ліквідації колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, які можна розділити на сім основних груп: інструментальні заходи вимірювання глибини колії; матеріалознавчі, конструктивні та технологічні заходи з підвищення коліємкості; експлуатаційні заходи по зниженню темпів утворення колії; організаційно-технологічні заходи по зниженню темпів утворення колії; заходи з ліквідації колії без усунення або з частковим усуненням причин колієутворення; заходи з ліквідації колії з усуненням причин їх утворення; заходи з попередження колієутворення;

6.4.2 Експлуатаційні заходи в період високих літніх температур щодо зниження темпів утворення колії у покритті на автодорожніх мостах та автомобільних дорогах: Пропонується обмежувати рух великовагових транспортних засобів без спарених коліс на ведучу вісь (табл. 6.9).

Таблиця 6.9 - Допустимі осьові навантаження у транспортних засобів

Допустиме навантаження на кожну вісь транспортного засобу, не більше, т		
Одновісні	Двовісні	Тривісні
7	6,5	5,5

Здійснювати перевезення вантажів на транспортних засобах із збільшеним числом осей. Знижувати контактний тиск в пневматичних колесах великовагових транспортних засобів на 8 – 10 % від нормативного; Доцільно використовувати транспортний засіб з широкопрофільними пневматичними шинами; Необхідно передбачати суворий ваговий контроль по фактичній величині навантаження на вісь (табл. 6.9). З метою обмеження руху транспортних засобів в денний час при високих позитивних температурах пропонується вводити з урахуванням максимальної допустимого навантаження на вісь, визначається в залежності від

кількості осей транспортного засобу (табл. 6.9). Тому пропонується з урахуванням практичного досвіду та [516] пропонується температура повітря, при якій вводиться обмеження руху транспортних засобів по асфальтобетонному покриттю, вимоги наведені в таблиці 6.10.

Таблиця 6.10 – Вимоги до температури, при якій вводиться обмеження руху транспортних засобів по асфальтобетонному покриттю автодорожніх мостів

Шифр району	Допустиме навантаження на одиночну вісь, т	Температура повітря, при якій вводиться літнє обмеження, ^{o}C
А-1; А-2; А-3; А-4; А-5; А-6; А-7	Не більше 7	25

6.5. Шляхи подальшого розвитку наукових досліджень

Отримані теоретичні та практичні методи дозволять у подальшому розвинути наукові напрямки розрахунку довговічності з позиції стійкі покриття до утворення колії, між шарового зчеплення, тріщиностійкості, та об’єктивного оцінювання рівня залишкового ресурсу для будівництва, ремонтів та утримання асфальтобетонного покриття, що влаштоване на жорсткій основі та жорсткими прошарками, на злітно посадкових смугах та допоміжної інфраструктури аеропортів, а також на автодорожніх мостах з металевою та сталезалізобетонною плитами.

Розробка теорії і практичних методів з розрахунку довговічності асфальтобетонного покриття на ортотропній плиті автодорожніх мостів з позиції колієстійкості, зсувостійкості та тріщиностійкості. Теоретичне обґрунтування коефіцієнта колієстійкості та коефіцієнта відновлення, рівності покриття.

Розробка методики проектування асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах за рахунок стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії, міцності зчеплення (покриття –гідроізоляції-основи) при зсуві та тріщиностійкості з метою розробки національного стандарту України.

Розробка методу розрахунку залишкового ресурсу асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах. Отримано аналітичні залежності та встановлено критерій граничного стану для розрахунку залишкового ресурсу за тріщиностійкістю покриття на автодорожніх мостах з урахуванням спільної дії температури та транспортних засобів. Запропоновано оцінювати розрахунком строк служби покриття з урахуванням його ресурсу [5].

Удосконалення методу розрахунку на довговічність асфальтобетонного покриття на металевих транспортних спорудах. Отримано закономірність зміни горизонтальних розтягуючих напружень в асфальтобетонному покритті металевої транспортної спорудив залежності від основних змінних факторів. Запропоновано умову граничного стану покриття за тріщиностійкістю, з урахуванням різного часу дії навантаження на розтяг при згині. Розроблена для практичного застосування методика з проектування асфальтобетонного покриття на металевих транспортних спорудах автомобільних доріг підвищеної довговічності, а також номограма для визначення розтягуючих напружень при згині від одиничного навантаження в покритті [370]. Результати роботи знайшли своє застосування [370]: при капітальному ремонті асфальтобетонного покриття на ортотропній плиті вантової частини Південного (2014 – 2016 роки) та Московського (2014 – 2017 роки) мостового переходу через річку Дніпро в м. Києві; улаштуванні гідроізоляційних матеріалів на ортотропній плиті мосту; проектуванні складів асфальтобетонів «Гусасфальт» з підвищеною довговічністю за рахунок комплексу полімерів.

Прогнозування та оцінка залишкових деформацій асфальтобетонного покриття з використанням методу скінченних елементів є непростою і актуальним задачею у подальших дослідженнях.

6.6. Висновки по розділу

1. Розроблено вимоги вимоги до матеріалів асфальтобетонного покриття та параметрів його конструкції.

2. Розроблено метод контролювання процесу модифікації полімерами бітуму нафтового дорожнього з використанням лабораторної лопатевої мішалки.

3. Розроблені практичні методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, зокрема: метод проектування асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності, а також вимоги до матеріалів асфальтобетонного покриття та параметрів його конструкції. Впроваджені в практику підприємств та організацій дорожньої галузі України рецепти матеріалів, конструкцій покриття, технології його влаштування. За рахунок застосування практичних методик очікується збільшити строк служби асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, у порівнянні з існуючим терміном, в 1,5 – 1,8 рази.

4. Запропоновано техніко-економічну оцінку ефективності заходів з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії. Економічний ефект від впровадження наукових результатів дисертаційних досліджень досягається від підвищення у 1,7 – 2,3 рази розрахункового строку служби асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, а також зменшенням витрат у 1,2 рази на їх поточні ремонти та експлуатаційне утримання.

5. Розроблені і впровадженні практичні розробки по підвищенню стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії. Отримані рекомендації по проектуванню асфальтобетонних покриттів підвищеної стійкості. Установлено лабораторний показник і метод його визначення для оцінки стійкості асфальтобетону до осфальтобетону. Запропоновано раціональні способи підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття.

6. Розроблено методику оцінки експлуатаційної стійкості асфальтобетону до утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини.

7. Запропоновано методики: оцінки експлуатаційної стійкості до накопичення залишкових деформацій у вигляді колії у асфальтобетонному покритті; з попередження і ліквідації колії в асфальтобетонному покритті; експлуатаційні заходи в період високих літніх температур.

8. Результати дисертаційних досліджень знайшли застосування при розробці 18 нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації асфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах України.

9. Запропоновано шляхи подальшого розвитку наукових досліджень.

10. Основні результати досліджень п’ятого розділу висвітлено в роботах автора: [5, 219, 341-343, 370, 374, 394, 409, 410-443, 465, 467-470, 515].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нові вирішення наукових та практичних проблем. У дисертаційній роботі створені наукові основи з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини. У дослідженнях враховано комплексну дію основних факторів, а саме: термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону; високої температури асфальтобетонного покриття від впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс із покриттям при їх коченні; вертикального тиску на покриття пневматичних коліс транспортних засобів та часу його дії; інтенсивності прикладання вертикальних навантажень.

Результати дисертаційних досліджень дозволили сформулювати теоретичні та науково-практичні висновки, основними з яких є:

1. Із аналізу відомих літературних даних та досліджень стосовно мостового полотна автодорожніх мостів встановлено:

- переважна їх більшість має залізобетонну плиту проїзної частини з асфальтобетонним покриттям, в останні роки на яких спостерігається інтенсивне зростання дефектів у вигляді колії, у зв'язку з ростом параметрів транспортних навантажень та аномально високими літніми температурами (понад 50 % пластичних деформацій із загальної кількості дефектів);

- в існуючих наукових розробках не достатньо вивчено: причини та види утворення колії на асфальтобетонному покритті; не в повній мірі враховано комплексний вплив термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону та внутрішніх і зовнішніх факторів; підходи вивчення утворення колії не мають єдиної наукової та методологічної основи; існуючі експериментальні дослідження не достатньо відображають фактичні умови роботи покриття; не в повній мірі вивчено стійкість асфальтобетонного покриття до утворення колії при комбінованому застосуванні різних практичних заходів.

2. Розроблено теоретичні положення, які включають:

- математичну модель, яка дозволяє прогнозувати глибину утворення колії в асфальтобетонному покритті, що опирається на жорстку залізобетонну основу, від дії циклічного вертикального навантаження пневматичних коліс транспортних засобів при високих літніх температурах, яка включає в себе наступні параметри: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону (визначаються на основі експериментальних методів), параметри конструкції мостового полотна, дії вертикального навантаження та зміни температури;

- метод розрахунку стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, від дії вертикальних навантажень пневматичних коліс транспортних засобів, що дозволяє враховувати комплексну дію основних факторів, а саме: термов'язкопружнопластичні властивості асфальтобетону; температуру асфальтобетону; вертикальний тиск на покриття пневматичних коліс при проїзді транспортних засобів; інтенсивність прикладання вертикальних навантажень; час дії навантажень.

3. Удосконалено метод визначення температури асфальтобетону в смузі накату, з урахуванням впливу сонячної радіації та взаємодії пневматичних коліс з покриттям при їх коченні, що дозволяє врахувати додаткове нагрівання покриття за рахунок його взаємодії із пневматичними колесами транспортних засобів.

4. Розроблені методи експериментальних лабораторних, стендових та натурних досліджень, а саме: визначення параметрів термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону; оцінки міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям, гідроізоляційним матеріалом і бетонною основою при зсуві; параметрів оцінки стійкості асфальтобетону до накопичення залишкової деформації; встановлення параметрів кінетики утворення колії асфальтобетонного покриття на бетонній основі кільцевого стенду; контролювання процесу модифікації бітуму полімерами з використанням лопатевого змішувача; визначення в натурних умовах температури

асфальтобетонного покриття в смузі накату та параметрів утворення колії на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини.

5. На основі експериментальних результатів:

- отримані результати дослідження впливу рецептурно-структурних, конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів на утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини;

- визначенні параметри термов'язкопружнопластичних властивостей асфальтобетону, характеристики колієутворення, температуру асфальтобетонного покриття в смузі накату, міцність зчеплення між асфальтобетоном та залізобетонною основою при зсуві;

- одержані порівняльні результати випробування асфальтобетонів типів А, Б, В, Г (з максимальним розміром щебеню від 5 мм до 20 мм), щебенево-мастикових асфальтобетонів (ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20) та литих асфальтобетонів (ЛА-10, ЛА-15), із яких випливає, що мінімальне значення глибини колії спостерігається для ЩМА-20.

6. На основі чисельного аналізу встановлено:

- закономірності впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, зокрема доведено, що модифікація бітуму полімерами дозволяє зменшити глибину колії в асфальтобетонному покритті до 50 % за абсолютним значенням, при порівнянні однакових типів і видів асфальтобетонів;

- отримано поліноміальну модель оцінки величини утворення колії, в залежності від найбільш впливових факторів, що дозволяє проаналізувати зміну глибини колії при зміні значень вхідних параметрів та визначити раціональну комбінацію значень вхідних параметрів, які забезпечать мінімальне значення утворення колії.

7. Розроблені практичні методики з підвищення стійкості асфальтобетонного покриття до утворення колії на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів із залізобетонною плитою проїзної частини, зокрема: метод

проектування асфальтобетонного покриття підвищеної довговічності, а також вимоги до матеріалів асфальтобетонного покриття та параметрів його конструкції. Впроваджені в практику підприємств та організацій дорожньої галузі України рецепти матеріалів, конструкцій покриття, технології його влаштування. За рахунок застосування практичних методик, очікується збільшити строк служби асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, у порівнянні з існуючим терміном, в 1,5 – 1,8 рази. Результати дисертаційних досліджень знайшли застосування при розробці 18 нормативних документів для проектування, будівництва, реконструкції, ремонту та експлуатації асфальтобетонних покриттів на автодорожніх мостах України.

Економічний ефект від впровадження наукових результатів дисертаційних досліджень досягається від підвищення у 1,7 – 2,3 рази розрахункового строку служби асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах із залізобетонною плитою проїзної частини, а також зменшенням витрат у 1,2 рази на їх поточні ремонти та експлуатаційне утримання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування на 2013-2018 роки: Розпорядження КМУ від 3 вересня 2012 р. № 719-р. URL:zakon3.rada.gov.ua/laws/show/719-2012-р. (дата звернення : 11.05.2016)
2. Лучко Й. Й., Коваль П. М., Корнієв М. М., Лантух-Лященко А. І., Хархаліс М. Р. Мости: конструкції та надійність. Львів : Каменяр, 2005. 989 с.
3. Коваль П. М. Характеристика технічного стану існуючих мостів України // Дороги і мости. 2003. Вип. 1. С. 15-22.
4. Онищенко А. Н. Причины образования колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов и способы повышения колеестойкости // Дорожная техника. 2013. С. 134-144.
5. Онищенко А. М., Кузьмінець М. П., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В. Теоретичні та практичні дослідження ресурсу асфальтобетонного покриття на залізобетонних транспортних спорудах : монографія. К. : НТУ, 2015. 323 с.
6. Кожушко В. П., Катвицкий Р. Н., Клочкова Ю. К. О методах расчета элементов транспортных сооружений. *Повышение надежности искусственных сооружений на автомобильных дорогах Украины* : материалы всеукраинского научно-технического семинара молодых ученых и аспирантов. 2008. С. 45-48.
7. Руденко Ю. Д. Разработать и внедрить ремонтные конструкции городских мостов УССР и методы их эксплуатационной оценки с учетом остаточного ресурса. Отчет о НИР КАДИ. Киев, 1988. 137 с.
8. Сахарова И. Д. Опыт устройства конструкции одежды на плите вантового пролетного строения и деформационных швов моста через р. Днепр в г. Киеве. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1978. 83 с.

9. Сахарова И. Д. Исследование конструкций проезжей части мостов с выравнивающим и защитным слоями из асфальтобетона. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1977. 10 с.
10. Сахарова И. Д. Рекомендации по конструкции одежды ездового полотна на железобетонной плите проезжей части автодорожных мостов с гидроизоляцией из плотного бетона. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1989. 18 с.
11. Сахаров И. Д. Методические рекомендации по проектированию и технологии устройства конструкций одежды на мостах для обычных и суровых климатических условий. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1980. 84 с.
12. Методические рекомендации по устройству конструкции одежды автодорожных мостов. М. : Минтрансстрой : Союздорнии, 1986. 40 с.
13. Германюк К. С. Укладка мостовой изоляции и соединение пролетов дорожных мостов. Варшава : НИИ дорог и мостов, 1989. 22 с.
14. Васильев А. И. Оценка технического состояния мостовых сооружений // Дорожная держава. 2009. № 20. С. 49-51.
15. Методические рекомендации по строительству тонкослойных покрытий на основе полимерно-битумного вяжущего на стальных настилах автодорожных мостов. Ленинград : Ленфилиал Союздорнии, 1974. 36 с.
16. Сахаров И. Д. Проведение теоретических и экспериментальных исследований и выдача рекомендаций по устройству конструкции одежды на ортотропной плите Южного моста через р. Днепр в г. Киеве. Отчет о НИР Союздорнии, М., 1989. 22 с.
17. Сахарова И. Д. Провести исследования и разработать рекомендации по новым системам и конструкциям автодорожных и городских мостов больших пролетов. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1988. 33 с.
18. Сахарова И. Д. Рекомендации по устройству гидроизоляции на Южном мосту г. Киев. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1988. 22 с.
19. Сахарова И. Д. Конструкция одежды на мостах с ортотропными плитами

(ремонт конструкции одежды на Северном мостовом переходе через р. Днепр в г. Киеве). Отчет о НИР Союздорнии. М., 1989. 22 с.

20. Сахарова И. Д. Технологические правила по устройству одежды на мосту через р. Днепр в г. Киеве. Отчет о НИР Союздорнии. М., 1976. 64 с.
21. Виноградский Д. Ю., Руденко Ю. Д., Шкуратовский А. А. Эксплуатация и долговечность мостов. Киев : Будівельник, 1985. 104 с.
22. Быстров В. А. Расчетно-экспериментальная методика определения остаточного ресурса эксплуатируемых автодорожных и городских мостов // Дорожная держава. 2010. № 29. С. 62-64.
23. Шкуратовский А. А. Разработать и внедрить прогрессивные технические решения по повышению безопасности движения, эксплуатационной надежности и долговечности киевских городских мостов. Отчет о НИР КАДИ. Киев, 1990. 85 с.
24. Петров А. П., Тарбаев Н. А., Барашиков М. Ю. Круглый стол : причины реконструкции мостов // Дорожная техника. 2008. № 1. С. 66-75.
25. Friedrech H. Line reuzeitliche linbauhilfe // Bd. Baunaschienendieenst. 1979. № 6. P. 411-412.
26. Гегелия Д. И., Богуславская Т. С. Особенности проектирования состава и технологии приготовления дренируещего асфальтобетона // Автомобильные дороги. 1982. № 5. С. 7-10.
27. Рыбьев И. А., Мелик-Багдасаров М. С., Дерещук Л. В. Дренирующий асфальтобетон для дорожных покрытий // Автомобильные дороги. 1979. № 10. С. 26-27.
28. Гегелия Д. И. Фрикционные свойства дренирующего асфальтобетона. *Вопр. повыш. качества поверхности дор. и аэродром. покрытий.* М., 1983. С. 71-73.
29. Гохман Л. М. Применение полимерно-битумных вяжущих в дорожном строительстве. *Применение полимерно-битумных вяжущих на основе блоксополимеров типа СБС* : сб. трудов. 2001. С. 5-60.
30. Гордеев С. О. Деформации и повреждения дорожных асфальтобетонных

покрытий. М. : Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1963. 132 с.

31. Радовский Б. С. Обоснование применения дорожных одежд со щебеночными слоями между укрепленными основаниями и асфальтобетонными покрытиями. М., 1983. 14 с.
32. П–Г. 1–218–113:2009. Технічні правила ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування України. К. : Укравтодор, 2010. 168 с.
33. ДСТУ 3587–97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці і залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. К. : Держстандарт України, 1997. 24 с.
34. Бируля А. К. Эксплуатация автомобильных дорог. М. : Автотрансиздат, 1956. 340 с.
35. СН 200-62. Технические условия проектирования железнодорожных, автодорожных и городских мостов и труб. М. : Трансжелдориздат, 1962. 180 с.
36. СНиП 2.05.03–84. Мосты и трубы. М. : ЦИТМ Госстрой СССР, 1985. 199 с.
37. ДБН В.2.3–14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. К. : Мінбуд України, 2006. 217 с.
38. Демішкан В. Ф., Прусенко Є. Д. Науково-технічні проблеми структурно-інвестиційного розвитку дорожнього господарства України // Дороги і мости. 2003. Вип. 1. С. 9-15.
39. Соколов Б. Ф., Маслов С. М. Моделирование эксплуатационно-климатических воздействий на асфальтобетон. Воронеж : Издательство воронежского университета, 1987. 103 с.
40. Головко С. К., Бабінець А. Д., Фощ І. В. Сучасний підхід до дослідження колієутворення в асфальтобетонних покриттях // Дороги і мости. 2004. Вип. 2. С. 34-47.
41. ВБН В.2.3-218-186-2004. Дорожній одяг нежорсткого типу. Київ :

Державна служба автомобільних доріг України «УКРАВТОДОР», 2004. 71 с.

42. Конструкции дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями / Горелышев Н.В. [та ін.]. *Материалы V Всесоюзного научно-технического совещания*. 1972. Сб. 4(2). С.12-19.
43. Богуславский А. М. Дорожные асфальтобетонные покрытия М. : Высшая школа, 1965. 115 с.
44. Радовский Б. С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок : дис. … докт. техн. наук. Киев, 1983. 552 с.
45. Рыбьев И. А. Асфальтовые бетоны. М. : Высшая школа, 1969. 369 с.
46. Руденский А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия. М. : Транспорт, 1992. 253 с.
47. Бонченко Г. А. Асфальтобетон. Сдвигоустойчивость и технология модифицирования полимером. М. : Машиностроение, 1994. 175 с.
48. Радовский Б. С. Проектирование состава асфальтобетонных смесей в США по методу Суперпейв // Дорожная техника. 2007. № 2. С. 86-99.
49. Superpave series № 2 (SP-2). Superpave Mix Design. USA: Asphalt institute, 2001. 83 p.
50. Антипов В. Н. Влияние годовых колебаний температуры на деформационные характеристики асфальтобетонных покрытий. *Повышение работоспособности автомобильных дорог* : труды Гипродорнии. 1975. Вып. 13. С. 30-33.
51. Шульман З. П., Ковалев Я. Н., Зальцгендлер Э. А. Реофизика конгломератных материалов. Минск : Наука и техника, 1978. 240 с.
52. Гончаренко Ф. П., Прусенко Є. Д., Скорченко В. Ф. Експлуатаційне утримання та ремонт автомобільних доріг за складних погодних та екологічних умов. К. : МОН України, 1999. 264 с.
53. Ремонт и содержание автомобильных дорог : справочник инженера дорожника / под ред. А. П. Васильева. М. : Транспорт, 1989. 237 с.

54. Семенов В. А. Качество и однородность автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1989. 125 с.
55. Смирнов В. А. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. Омск : Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1975. 155 с.
56. Антипов В. И., Богуславский А. М. Методика расчета асфальтобетонных покрытий на сдвиг. М. : Аэропорт, 1979. 11 с.
57. Золотарев В. А. Исследование свойств асфальтобетонов различной структуры : автореф. дис… канд. техн. наук. Харьков, 1967. 24 с.
58. Золотарев В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов. Харьков : Вища школа, 1977. 116 с.
59. Матуа В. П., Баранов Е. М., Джанашия Д. Р. Методы прогнозирования, развития и учета накопления остаточных деформаций при конструировании дорожных одежд // Дороги і мости. 2006. Вип. 4. С. 181-199.
60. Золотарев В.А. Закономерности деформирования и разрушения битумов и асфальтобетонов как основа улучшения и регулирования их свойств : дис. … докт. техн. наук. Москва, 1983. 575 с.
61. Колбановская А. С., Михайлов В. В. Дорожные битумы. М. : Транспорт, 1973. 261 с.
62. Руденская И. М., Руденский А. В. Реологические свойства битумов. М. : Высшая школа, 1967. 118 с.
63. Гун Р. Б. Нефтяные битумы. М. : Химия, 1989. 152 с.
64. Гоглидзе В. М. Расчеты нежестких дорожных покрытий на сдвигоустойчивость. *Тезисы докладов на XIX научно-технической конференции ВУЗов Закавказских республик*. Тбилиси, 1977. С. 110-111.
65. Гоглидзе В. М. Асфальтобетон в условиях южного климата. *Труды научно-технической конференции ГПИ.* Вып. 13. Тбилиси, 1970. С. 54-60.
66. Гоглидзе В. М. Пути повышения устойчивости асфальтобетонных покрытий в южных климатических условиях. *Сборник докладов и совещаний на научно-техническом совещании по строительству*

автомобильных дорог. М. : СоюздорНИИ, 1963. С. 379-384.

67. Чугуенко С. А. Сдвигоустойчивость асфальтобетонов на битумах, модифицированных полимерами: дис. … канд. тех. наук. Харьков, 2006. 185 с.
68. Воловик А. А., Костин Д. Ю., Чугуенко С. А., Жданюк В. К. Колееустойчивость мелкозернистого асфальтобетона на битумах разных марок. *Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений* : международная научно-практическая конференция молодых ученых. Харьков, 2009. С. 92-97.
69. Поздняков М. К., Быстров Н. В. Разработка метода оценки сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию. *Ассоциация исследователей асфальтобетона* : сб. докладов. 2010. С. 91-99.
70. Гезенцвей Л. Б., Горелышев Н. В., Богуславский А. М., Королев И. В. Асфальтовый бетон. М. : Транспорт, 1985. 350 с.
71. Жданюк В. К., Даценко В. М., Чугуєнко С. А., Воловик О. О. До питання про методи оцінки та показники зсувостійкості асфальтобетонів // Автошляховик України. 2008. №3. С.28-30.
72. Жданюк В. К., Даценко В. М. Стійкість асфальтобетонів різних гранулометричних типів до накопичення пластичних деформацій у вигляді колії // Автошляховик України. 2009. №1. С. 31-34.
73. Жданюк В. К., Даценко В. М., Зражевец Е. М., Чугуенко С. А., Воловик А. А. Устойчивость асфальтобетонов различных гранулометрических типов к накоплению пластических деформаций в виде колеи. *80 лет Белоруской дорожной науке* : материалы юбилейной научно-технической конференции. Минск, 2008. С. 105-111.
74. Кирюхин Г. Н., Смирнов Е. А. Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. М. : Информавтодор, 2003. 96 с.
75. Hennequin J., Monfort G., Charbonneau D. Refectlon du tablier du pont

d'Agulteine a Bordeaux en compoflex claute // Revue general des Routes et des Aerodromes. 1984. № 604. P. 45-50.

76. Сахарова И. Д. Исследование одежды на мостах с ортотропными плитами. Науч.-техн. отчет Союздорнии Тема: ИС-Х-7-78. М., 1978. 117 с.
77. Сахарова И. Д. Разработать руководство по ремонту элементов проезжей части автодорожного моста (по программе 0.55.11 Р), отчет о НИР Союздорнии. Тема: ХОЗ-ИС-86, 1987. 15 с.
78. Standard Spesification for Asphalt plank. Designation: D 517-70 (Reapproved 1981).
79. Elastomer modified asphalt pavment for bridge decks // Public Works. 1988. № 1. 51 p.
80. Сильянов В. В. Транспортно-эксплуатационные качества автомобильных дорог. М., 1984.
81. Шестериков В. И., Шейнцвит М. И., Лушников Н. А., Поздняева Л. В Результаты обследования мостов и испытания кернов, анализ зарубежного и отечественного опыта борьбы с колееобразованием. *Исследование процесса колееобразования на мостовых с разработкой требований к покрытию для различных условий эксплуатации на основе опытно-экспериментальных работ* : отчет о научно-исследовательской работе. Москва, 2008. 108 с.
82. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колейности / В. В. Мозговой, А. Н. Онищенко, О. В. Прудкий и др. // Дорожная техника. 2010. С.114-128.
83. Овчинников И. Г., Макаров В. Н., Распоров О. Н. Выбор оптимального решения конструкции дорожной одежды и технологии ее устройства на объектах мостового перехода у села Пристанное Саратовской области // Дороги России XXI века. 2004. № 2. С. 66-72.
84. Komel Almassy, Christ van Gurp. Prediction of resistance to permanent deformation of granular road bases by deflection testing. Budapest, 1998.
85. Мозговой В. В. Оценка температурной трещиностойкости асфальто- и

дегтебетонов в покрытиях автомобильных дорог : дис... канд. техн. наук. К., 1986. 330 с.

86. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий : дис... докт. техн. наук. К., 1996. 406 с.
87. Рекомендации по выявлению и устранению колей на нежестких дорожных одеждах. Москва : Росавтодор, 2002. 179 с.
88. Обзорная информация об отечественных и зарубежных методах предотвращения колееобразования на асфальтобетонных покрытиях в условиях современных транспортных нагрузок / М-во трансп. Российской Федерации, Федер. дор. агентство (Росавтодор). М., 2005. 130 с.
89. Bridge pavements- what makes them long-lasting // Nordic Road and Transport Research. 2000.12, N 1. P.10-11.
90. Nies V. Dusseldorfer Belag ein SMA mit 33 Jaren Standzeit auf Stahlbruke // Bitumen. 2002. N4. S. 134-140.
91. Устройство конструкции дорожной одежды на объектах мостового перехода через р. Волгу у с. Пристанное Саратовской обл. : СТП / Союздорнии. М., 2000.
92. Минин А. В. Повышение долговечности мостов в агрессивных средах за счет использования эффективных химических и эмульсионно-минеральных материалов : автореф. дис... канд. техн. наук. М., 2002.
93. Marchand J.-P., Barth R. Developpement d/un beton bitumineux anti-ornierant en Allemagne, RGRA № 780. 2000. S. 47-50.
94. Труды IV Международного конгресса ISSA. Франция. Париж, 1997.
95. Eero Lehtipuu. Asfalttipp llysteet. Helsinki, 1983.
96. Gr tz B. Beurteilung dunner Asphaltdeckschichten im Heiss – und Kaltenbau, insbesondere in Bezug auf die Oberflacheneinschaften, Griffiakeit und Dichtigkeit, Forschung Strassenbau und Strassenvtrkehrstechnik, 1993. № 649.
97. Hot Mix Asphalt Materials. Mixture Design and Construction. USA, 1991.
98. Baksay J., Schvab Z. Assessment of the condition of low traffic roads. *Мосты*

и дороги Европы : материалы 8-й Международной конференции. Будапешт, 2000.

99. Tappert A. Kriterien fur die Auswohl der Bauweisen der Strassenerhaltung. Международная дорожная конференция. Варшава, 1993.
100. Graf K., Vassiliou K., Schneider M. Quantifizierung des Schichtenverbundes von dunnen Asphaltschichten im Heisseinbau mit dem Abziehversuch Forschung Strassenbau und Strassenvernehrstechnik. H. 2002. №830.
101. Robert J., Bauduin A. Utilisation du procede metalflex pour le traitement de zones ornierees sur route a tres fort traffic // RGRA. 1999. № 777. P. 62-65.
102. Aide a la gestion de l entretien des reseaux routiers. LCPC. SETRA. 2000. 64 s.
103. Saubot M., Loup F. Mise au point d/ un enrobe hors nirmts pour le tablier du viaduct de Millau // RGRA. 2003. № 819. P. 73-75.
104. The Maintanance and Management of Roadways and Bridges. AASHTO. Maintanance Manual. Washington, 2001.
105. Hode Reyser J., Resistance of various types of bituminous concrete and cement concrete to wear by studded tires // Highway Res. Rec. 1971. № 352. P. 16-38.
106. Hode Reyser J.,C. Thurman - Mac T. Characteristic des revete bitumineux resistant a l usure. // Bull. Liais/ Lab. Ponts enechaussees. 1972. № 62. P. 69-78.
107. Перрет, Думонт. Оценка сопротивления колееобразованию высокопрочных асфальтобетонных смесей, используя метод испытания ускоренными нагрузками, идентичными реальным. *Материалы конгресса 3rd Eurasphalt & Eurobitume*. Вена, 2004.
108. Larry L. Galehouse. The formulation of a preventive maintenance program. *Труды IV Международного конгресса ISSA*. Париж, 1997.
109. Schmalz M. Eigenschaften von Bitumen und polymermodifizierten Bitumen bei Heft 1. 1995.
110. Kazmierowski T. J., Helali K., Brabury A., Karan M. A. Optimilization of

innovative rehabilitation strategien for a unigue pavement deterioration problem.

111. Радовский Б. С., Телтаев Б. Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. Алматы : «Былым», 2013. 152 с.
112. Мішутін А. В., Смолянець В. В., Даценко В. М. Аналіз стану покриття на транспортних спорудах України // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 93. С. 263-272.
113. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М. : Наука, 1979. 744 с.
114. Рахимов С., Репников Л. Н. Метод определения деформационных характеристик упругого основания, совмещающего упругое полупространство и основание Винклера // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1971. № 4.
115. Репников Л. Н. Расчет балок на упругом основании, объединяющем деформативные свойства основания Винклера и линейно-деформируемой среды // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1967. № 6. С. 15-28.
116. Александров А. С. Применение теории наследственной ползучести к расчету деформаций при воздействии повторных нагрузок : монография. Омск : СибАДИ, 2014. 152 с.
117. Барашков В. А. Повышение эффективности эксплуатации колесных лесозаготовительных машин на переувлажненных почвогрунтах: автореф. дис... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2012. 20 с.
118. Барвашов В. А., Федоровский В. Г. Трехпараметрическая модель грунтового оснвания и свайного поля, учитывающая необратимые стурктурыне деформации грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1978. № 4. С. 17-19.
119. Базаров С. М., Барашиков И. А., Никофорова А. И., Хахина А. М. Математическая модель колееобразование в почвогрунтах под воздействием лесных машин // Известия СПьГЛТА. 2011. № 197.

С. 54-65.

120. Базаров С. М., Барашиков И. А., Никофорова А. И., Хахина А. М. Теория колееобразование в почвогрунтах под воздействием гусеничных лесных машин // Известия СПьГЛТА. 2012. № 198. С. 59-70.
121. Овчинников И. Г., Щербаков А. Г., Бочкарев А. В., Наумова Г. А. Прикладная механика дорожных одежд на мостовых сооружениях : монография. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. 310 с.
122. Цытович Н. А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
123. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия : монография. М. : Мир, 1989. 510 с.
124. Золотарь И. А. К определению остаточных деформаций в дорожных конструкциях при многократных динамических воздействиях на них подвижных транспортных средств. Санкт-Петербург : Изд-во "ВАТТ", 1999. 31 с.
125. Ишлинский А. Ю., Ивлев Д. Д. Математическая теория пластичности : монографія. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 704 с.
126. Ишлинский А. Ю. Механика вязкопластических и не вполне упругих тел. М. : Наука, 1986. 360 с.
127. Матуа В. П., Панасюк Л. Н. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях. Ростов-на-Дону : РГСУ, 2001. 327 с.
128. Матуа В. П. Исследование напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций с учетом их неупругих свойств и пространственного нагружения : автореф. дис... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону : Изд-во РГСУ, 2002. 40 с.
129. Матуа В. П., Чирна Д. В., Матуа Р. В. Влияние упруговязкопластических свойств асфальтобетонов на накопление остаточных деформаций в слоях покрытий автомобильных дорог // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 10. С. 71-77.
130. Комплексный подход к решению проблемы колееобразования на

федеральных автомобильных дорогах Российской Федерации / В. П. Матуа, Д. В. Чирва, Р. В. Матуа и др. *Второй Всероссийский дорожный конгресс*. М. : МАДИ, 2010. С. 176-180.

131. Мевлединов З. А. Обоснование основных показателей, учитывающих влияние остаточных деформаций при расчете дорожных одежд нежесткого типа : автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1977. 17 с.
132. Фадеев В. Б. Влияние остаточных деформаций грунта земляного полотна на колееобразование на проезжей части дорог с нежесткими дорожными одеждами : автореф. дис... канд. техн. наук. М. : Изд-во МАДИ, 1999. 21 с.
133. Хархута Н. Я., Васильев Ю. М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1975. 592 с.
134. Казарновский В. Д. Проблема колеобразования на дорогах с асфальтобетонным покрытием // Наука и техника в дорожной отрасли. 2000. № 2. С. 3-4.
135. Validation of asphalt binder and mixture tests that measure rutting susceptibility / Kevin D. Stuart, W.S. Mogawer, P. Romero, FHWA-RD-99-204, 2000.
136. Santucci L. Rut resistant asphalt pavements, Institute of transportation studies. 2002.
137. Экспериментальные исследования асфальтобетонов верхних слоев покрытия (ЩМА, плотных асфальтобетонов на ПБВ и др.) для определения расчетных характеристик, используемых при проектировании нежестких дорожных одежд (дополнительно к ОДН 218.046-01) / Открытое акционерное общество «Дорожный научно-исследовательский институт «СоюздорНИИ» (ОАО «СоюздорНИИ»). – Государственный контракт № УД-47/310. Балашиха, 2009. 112 с.
138. Волков М. И. Некоторые вопросы теории асфальтобетона // Труды МАДИ. 1958. Вып. 23. С. 23-27.
139. Ладыгин Б. И., Деркаченко И. Л. Принцип направленного

структурообразования дорожного асфальтобетона. *Доклады Академии наук БССР*. 1972. Том 16, № 5. С. 424-426.

140. Шестоперов С. В. Дорожно-строительные материалы. М. : Высшая школа, 1969. 672 с.
141. Гордеев С. О. Деформации и повреждения дорожных асфальтобетонных покрытий. М. : Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1963. 132 с.
142. ДСТУ Б В.2.7–119–2011. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Технічні умови. К. : Мінрегіонбуд України, 2011. 37 с.
143. Яромко В.Н. Влияние полимерных добавок на свойства асфальтобетона // Наука и техника в дорожной отрасли. 2003. № 2. С. 27-29.
144. Баловнева И. И. К вопросу сопротивляемости асфальтобетона сдвигу / И. И.Баловнева// Труды СоюзДорНИИ. – 1967. – Вып. 11. – С. 126-134.
145. Горелышев Н. В. Принципы структурообразования асфальтобетона // Труды СоюзДорНИИ. 1966. Вып. 7. С. 39-53.
146. Иванов Н. Н. Дальнейшие исследования в области устойчивости и сопротивления износу усовершенствованных и переходных покрытий и прочности оснований // Труды МАДИ. 1958. Вып. 22. С.5-13.
147. Иванов Н. Н. Прочность и устойчивость покрытий из смесей каменных материалов с органическими вяжущими // Труды МАДИ. 1956. Вып. 18. С. 61-74.
148. Duriez M., Arrambide J. Nouveau traite de materiaux de construction. Paris : Dunod, 1962. V. 3. 1543 p.
149. Лобзова К. Я., Горелышев Н. В., Маркин Б. В. Битумо-минеральные смеси с уменьшением содержания битума для устройства оснований под асфальтобетонные покрытия. *Материалы IV Всесоюзного совещания по основным направлениям научно-технического прогресса в дорожном строительстве*. М., 1976. С. 45-50.
150. Cartallas E., Couturier Y. Deformation de revetements en enrobes denses a

chauld // Bull. Liaison Labo. Routiers P. et Ch. 1966. № 21. P. D.1-D.10.

151. Ганжула Д. И. К вопросу об устойчивости асфальтобетонных покрытий при высоких температурах // Труды МАДИ. 1958. Вып. 22.С. 30-37.
152. Кирюхин Г. Н., Смирнов Е. А. Проектування из щебеночно-мастичного асфальтобетона. М. : ООО «Издательство Элит», 2009. 176 с.
153. Золотарев В. А. Проблема зсувостійкості асфальтобетонів потребує поглиблених консолідованих досліджень // Автошляховик України. 2008. № 5. С. 26-28.
154. Богомолов В. О., Жданюк В. К., Богомолов С. В. Щодо критеріїв міцності для дорожніх одягів нежорсткого типу // Автошляховик України. 2011. № 5. С. 29-33.
155. Кирюхин Г. Н. Остаточные деформации в асфальтобетонных покрытиях // Наука и техника в дорожной отрасли. 1998. № 3. С. 14-16.
156. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. К. : Наукова думка, 1975. 704 с.
157. Дерягин Б. В., Лазарев В. П. Применение обобщенного закона трения к граничной смазке и механическим свойствам смазочного слоя. *Тр. II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах*. 1949. Т. 3. С. 106-124.
158. Грушко И. М., Королев И. В., Борщ И. М., Мищенко Г. М. Дорожно-строительные материалы. М. : Транспорт, 1991. 357 с.
159. Barksdale R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. 1972. Vol. 1. P. 161-174.
160. Romain, J. E. Rut Depth Prediction in Asphalt Pavements. *Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. 1972. Vol. 1. P. 205-210.
161. Гезенцвей Л. Б. Асфальтовый бетон. М. : Стройиздат, 1964. 447 с.
162. Радовский Б. С. Методы проектирования состава асфальтобетонных смесей в США // Дорожная техника. 2006. С. 68-81.

163. Ломтадзе В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов. М. : Госгеолиздата, 1952. 234 с.
164. Аррамбид Ж. Дюрье М. Органические вяжущие и смеси для дорожного строительства. М. : Автотрансиздат, 1961. 271 с.
165. Сахаров П. В. Способы проектирования асфальтобетонных смесей // Транспорт и дороги города. 1935. № 12. С. 22-26.
166. Иванов Н. Н. Устойчивость асфальтобетонных покрытий при высоких температурах. *Повышение качества асфальтобетона* : Труды СоюздорНИИ. 1961.С. 21-25.
167. Лысихина А. И. Дорожные покрытия и основания с применением битумов и дегтей. М. : Автотрансиздат, 1962. 360 с.
168. Золотарев В. А. Разжалованный Маршалл // Автомобильные дороги. – 2008. № 7. С. 128-132.
169. Корсунский М. Б., Булавко А. Г. Напряжения и деформации многослойных упругоизотропных систем при осесимметричной нагрузке. *Практические методы определения напряженно-деформированного состояния конструкций дорожных одежд*. М. : Транспорт, 1966. 124 с.
170. Волков В. В. Гузненок С. А. Факторы образования остаточной деформации основания и асфальтобетонного покрытия дороги *Эффективные материалы, технологи, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортних сооружений* : международная научно-практическая конференция молодых ученых : сб. докладов. 2009. С. 66-70.
171. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Под ред. Иванова Н. Н. М. : Транспорт, 1973. 328 с.
172. Маглакелидзе Р. Д. Повышение сдвигоустойчивости асфальтобетона в дорожных одеждах, работающих в условиях жаркого климата и горного рельефа : автореф. дис… канд. техн. наук: спец. Харьков, 1983. 21 с.
173. Богуславский А. М., Богуславский Л. А. Основы реологии

асфальтобетона. М. : Высш. Шк., 1972. 200 с.

174. Fitzgerald I. E., Vakili T. Nontinear character riration at sand-asphalt concrete by means of permanent-memory // Norm. proc. of the SESA. – 1973. № 2. P. 504-510.
175. Радовский Б. С. Современное состояние разработки американского метода проектирования асфальтобетонных смесей Суперпейв // Дорожная техника. 2008. С. 12-22.
176. Золотарьов В. О., Космін О. В. Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів : конспект лекцій. Харків : ХНАДУ, 2001. 115 с.
177. Илиополов С. К., Углова Е. В. Научные наблюдения за дорогой // Дорожная держава. 2009. № 23. С. 38-40.
178. Allen L., Cooley Jr., Prithvi S., Kandhal, M., Buchanan S. Loaded wheel testers in the United States: state of the practice. NCAT Report 00-04, 2000. 83 p.
179. Kevin D., Walaa S., Romero P. Validation of Asphalt binder and mixture tests that measure rutting susceptibility. FHWA-RD-99-204, 2000. 114 p.
180. John B. Application of Full-scale Accelerated Pavement Testing. NCHRP SYNTHESIS 235, 1996. 43 p.
181. Significant Findings from Full-Scale Accelerated Pavement Testing. NCHRP SYNTHESIS 325, 2004. 67 p.
182. Prithvi S., Kandhal L., Cooley A. Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer. NCHRP Report 508, 2003. 76 p.
183. Perret J., Dumont A.-G., Turtschy J.-C. Assessement of resistance to rutting of high modulus bituminous mixtures using full-scale accelerated loading tests. *3-rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna*. 2004. Paper 208. P. 504-508.
184. Веренько В. А. Деформации и разрушения дорожных покрытий причины и пути устранения. Минск, 2008. 304 с.
185. Поздняков М. К., Быстров Н. В. Зарубежный опыт оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона. *Сборник Статей и докладов ежегодной научной сессии Ассоциации исследователей асфальтобетона.*

M., 2009. С. 7-17.

186. Каталог оборудования CONTROLS. Рим, 1999. 220 с.
187. Каталог оборудования LCPC. Париж, 2000. 120 с.
188. Каталог оборудования INFRATEST. 2002. 210 с.
189. Guid for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. *Transportation research board, National research council.* NCHRP report 1-37 A. Washington, 2004. 78 p.
190. Анализ норм проектирования дорожных одежд зарубежных стран с подготовкой рекомендаций по совершенствованию отечественных норм проектирования по теме: Рекомендации по совершенствованию отечественных норм проектирования дорожных одежд. Рецензирование и доработка по замечаниям (3 этап, промежуточный) / ФГУП «РОСДОРНИИ». Москва, 2010. 134 с.
191. Oscarsson E. Deformations in asphalt concrete using the mechanistic-empirical pavement design. Department of Technology and Society Lund University, 2007. 158 p.
192. Research results digest 307: Independent review of the mechanistic empirical pavement design guide and software. *Transportation research board, National research council*. NCHRP report 2006 A-307. Washington, 2006. 125 p.
193. Monismith C. L., Deacon J. A., Harvey J. T. Westrack: Performance models for permanent deformation and fatigue. Reno : Pavement Research Center, 2000. 217 p.
194. Heukelom W., Klomp A. J. G. Road Design and Dynamic Loading // Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists. 1964. Vol. 33. P. 92-125.
195. Nijboer L. W. Plasticity as a Factor in the Design of Dense Bituminous Carpets, New York : Elsevier Publishing Co., 1948. 65 p.
196. Freeme C. R. Technical Report Covering Tour of Duty to the U.K. and U.S.A. Report R3/5/73, NITRR, Republic of South Africa, 1973. 79 p.
197. Lizenga J. On the Prediction of Pavement Rutting in the Shell Pavement

Design Method. *2nd European Symposium on Performance of Bituminous Materials.* 1997. P. 78-84.

198. Tracking rutting test, Laboratoire central des ponts et chausses, Paris, France, 1981.
199. Brecciaroly F., Kolisoja P. Deformation behaviour ofrailway embankment materials under repeated loading. Literaturereview // Finnish Rail Administration, Rail Network Department.Helsinki, 2006. 201 p.
200. Hornych. P., Corte. J.-F., Paute, J.-L. Étude desdéformations permanentes sous chargements répétés de trois gravesnon traitées // Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts etChaussèes. 1993. № 184. P. 77-84.
201. Veverka V. Raming van de Spoordiepte bij Wegen met CenBitumineuzeVerharding // De Wegentechniek. 1979. Vol. 24. №3.P. 25-45.
202. Eisenmann J. Hilmer A. Influence of Wheel Load and Inflation Pressure on the Rutting Effect at Asphalt-Pavements - Experiments and Theoretical Investigations, Proceedings. *Sixth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. 1987. Vol. I. P. 392-403.
203. Hilster E., Loo P. J. The Creep Test «Influence of Test Parameters», Koninklijke. Amsterdam : Shell-Laboratorium, 1977. 67 p.
204. Mahboub K., Little D. N. Improved Asphalt Concrete Design Procedure, Research Report 474-1F. Texas Transportation Institute, 1988. 93 p.
205. Monismith C. L. Rutting Prediction in Asphalt Concrete Pavements // Transportation Research Record. 1976. № 616. P. 2-8.
206. Kenis W. J. Predictive Design Procedures – A Design Method for Flexible Pavements Using the VESYS Structural Subsystem, Proceedings. *Fottrth hrtemational Conference on the Stntctural Design of Asphalt Pavements*. 1977. Vol. I. P. 101-130.
207. Majidzadeh K., Aly M., Bayomy F., El-Laithy A. Implementation of a pavement design system. Ohio : The Ohio State Univ. Engineering Experiment Station, Columbus, 1980. Vol. 1 and 2, Final Rep. № EES 578. 95 p.
208. Lytton R. L. Development and validation of performance prediction models

and specifications for asphalt binders and paving mixes. Washington :, Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1993. Rep. № SHRP-A-357.

209. Witczak M. W. Development of the 2002 guide for the design of new and rehabilitated pavements-flexible pavements overview. Hot topics, 2001.
210. Wolff H., Visser A. Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design // Proceedings of Institution of Civil Engineers Transport. 1994. Vol. 105. P. 259 – 272.
211. Francken L., Clauwaert C. Characterization and structural assessment of bound materials for flexible road structures. *Proceedings of the 6th International Conference on Asphalt Pavements.* Ann Arbor, Michigan, 1987. P. 130-144.
212. Theyse H. L. The development of mechanistic-empirical permanent deformation design models for unbound pavement materials from laboratory accelerated pavement. *Proceedings of the fifth International symposium on unbound aggregates in road.* Nottingham, 2000. P. 285-293.
213. Tseng K. H., Lytton R. L. Prediction of permanent deformation in flexible pavement materials, in implication of aggregate in the design, construction, and performance of flexible pavements // STP. 1989. № 106. P. 154-172.
214. Bjorklund A. Creep induced behavior of resurfaced pavements: Some studies with the aid of beams subjected to a temperature wave and loaded under plane strain conditions. VTI report 271 A., National road and traffic research institute, 1984. 45 p.
215. Glen A. Problems of stone mastic asphalt use in North Queensland : A thesis… of master of science in civil engineering. University of Southern Queensland, 2006. 234 p.
216. Huurman M. Permanent deformation in concrete block pavements : Dissertation … for the degree of Doctor of Philosophy. Delft University of Technology, The Netherlands, 1997. 423 p.
217. Александров А. С., Александрова Н. П., Киселева Н. Ю., Драгунцов А. А. О накоплении остаточных деформаций в слоях дорожных конструкций из

гранулированных материалов. *Новые дороги России:* сборник трудов международной конференции. 2011. С. 11-18.

218. Кірічек Ю. О., Сухоребрий А. А., Молчанов О. В. Визначення геометричних параметрів автомобільних доріг із колією та засоби ліквідації колійності // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2008. № 1-2. С. 22-26.
219. Онищенко А .М. Існуючі способи підвищення коліестійкості асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг. *Современные компьютерно-инновационные технологии проектирования, строительства, эксплуатации автомобильных дорог и аэродромов* : мат. Межд. науч.-практ. конф. (01–04 ноября 2012, г. Харьков). Харьков, 2012. С. 193-198.
220. EN 12697-22. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking. Brussels, EU : European Committee for Standardization, 2003. 32 p.
221. ДСТУ Б В.2.7–89–99 (ГОСТ 12801–98). Матеріали на основі органічних в'яжучих для дорожнього будівництва. Методи випробувань. К. : Держбуд України, 2000. 42 с.
222. Schröder I., Kluge H. J. Erfarungen mit Splittmastixasphalt // Bitumen. 1992. № 4. P. 37-42.
223. Королев И. В. Дорожный теплый асфальтобетон. К. : Вища школа, 1975. 155 с.
224. Титарь В. С. Закономерности разрушения и долговременной прочности асфальто- и дегтебетонов : дис. … канд. тех. наук. Харьков, 1982. 252 с.
225. Newcomb D., Buncher M., Huddleston I. Concepts of perpetual pavements // Perpetual bituminous pavements. 2001. № 503. P. 4-11.
226. Mechanistic Evaluation of the Georgia Loaded Wheel Tester for Superpave Asphalt mixtures : Technical report (final) / The University of Akron, Department of Civil Engineering, College of Engineering; report № FHWA / OH- 2004/008; contract № 14751(0). A., 2004. 347 p.
227. Вольфганг Г. Полимер-модифицированные битумы – состав и

эксплуатационные характеристики // Автомобильные дороги. 2008. № 10. С. 46-53.

228. Sybilski D. Lepkosc zerowego scinania lub modul sztywnosci jako parametr odpornosci na koleinowanie lepiszcza bitumicznego. *Trwale I bezpieczne nawierzchnie drogowe* : IX Miedzynarodowa Konferencja. 2003.S. 197-204.
229. Полякова С. В. О состоянии вопроса качества органических вяжущих // Автомобильные дороги. 2007. № 2. С. 43-45.
230. Sybilski D., Hordecka R. Comparision of properties of bitumens mixtures with bitumens and elastomere-bitumens // Prace Institutu Badawaczego Drog i Mostov. Warszawa, 1997. № 3-4. S. 125-148.
231. Золотарев В. А. Битумы, модифицированные полимерами типа СБС: особенности состава, структуры и свойств. *Доклад на Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли»*. Харьков, 2003. 17 с.
232. Илиополов С. К., Мардиросова И. В. Влияние модификатора РТЭП и добавки «Viatop 66» на свойства ЩМА // Наука и техника в дорожной отрасли. 2010. № 2. С. 38-40.
233. Samanos J. Les liants pour hydrocarbones // Session de formation continue. Dourdan, ENPC, 1995. 53 p.
234. Planche P., Chaverot P., Lesueur D., Hines G. Valuation des bitumes modifies selon jes specifications SHRP sur les liants // RGRA. 1996. № 739. P. 34-38.
235. Vonk W., Korenstra J., Hek J., Hartemink R. Jak zapewnic najlepsze wlasciwosci funkcjonalne przy opracowywaniu scladu asfaltu zmodyfikowanego polimerem // RGRA. 1996. № 739. P. 34-38..
236. Золотарьов В. О. Яким чином зчеплення та внутрішнє тертя характеризують колієутворення в асфальтобетонному // Автошляховик України. 2009. № 3. С. 38-41.
237. Гохман Л. М., Гурарий Е. М., Давыдова А. Р., Давыдова К. И. Полимерно-битумные вяжущие материалы на основе СБС для дорожного строительства // Автомоб. Дороги : Обзорная информация. 2002. Вып.4.

112 с.

238. Всемирная дорожная ассоциация. Технический комитет «Нежесткие дороги» (С8). Модфицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве / Под общей ред. д.т.н. В. А. Золотарева, д.т.н. В .И. Братчуна. Харьков : Изд-во ХНАДУ, 2003. 229 с.
239. Corte J.-F., Brosseaud Y., Simoncelli J.-P., Caroff G. Investigation of rutting of asphalt surface layers: influence of binder and axle loading configuration // Transportatijn research record. 1994. № 1436. P. 28-37.
240. Corte J.-F., Brosseaud Y., Kerzreho J.-P., Spemol A. Study of rutting of wearing courses on the LCPC test track // 8th ISAP. 1997.P. 1555-1568.
241. Никишина М. Ф., Захаров В. А. Применение полимеров для улучшения свойств битумов и битумоминеральных смесей // Труды СоюздорНИИ. 1969. Вып. 34. С. 45-67.
242. Золотарев В. А. Об информативности показателей качества битумов // Наука и техника в дорожной отрасли. 2005. № 3. С. 38-42.
243. Стабников Н. В. Асфальтополимербетонные облицовки северных гидротехнических сооружений. Л. : Стройиздат, 1980. 176 с.
244. Попченко С. Н. О структуре и структурно-механических свойствах полимерно-битумных вяжущих // Труды СоюздорНИИ. 1975. Вып. 80. С. 125-130.
245. Зельманович Я. И., Андронов С. Г. Критерии качества СБС-модифицированных битумно-полимерных материалов // Строительные материалы. 2001. № 3. С. 12-13.
246. Широкова Т. С. Средство от колеи // Дорожная держава. Специальный выпуск. 2010. С. 38-39.
247. Радзишевский П. Свойства асфальтобетона на битумо-резиновом вяжущем // Наука и техника в дорожной отрасли. 2007. № 3. С. 38-41.
248. BS 598-110 Part 110: Methods of test for the determination of wheel-tracking rate and depth, London, British : British Standards Institution, 1998. 9 p.

249. Odeon H., Gramsammer J.-C., Caroff G. Asphalt mix fatigue behavior: experimental structures and modeling // 8th ICAP. 1997. P. 881-898.
250. Жданюк В. К. Результати порівняльних досліджень властивостей асфальтобетонів з добавкою «TrinidadEpureZ 0/8» // Автошляховик України. 2011. № 5. С. 38-43.
251. Соломатов В. И., Баловнева И. И., Шведко Я. И., Марьянов Э. Л. Эпоксидно-каменоугольный полимербетон для ремонта бетонных покрытий // Автомобильные дороги. 1971. № 2. С. 21-22.
252. Fiebach G. Malanges de resine epoxide et de goudron pour la construction routiere // Goudron routes. 1965. № 36. P. 13-16.
253. Руденская И. М., Руденский А. В. Обзор по важнейшим научным и научно-техническим проблемам, предусмотренным пятилетним планом развития народного хозяйства. Применение каменоугольных вяжущих при строительстве и ремонте автомобильных дорог. М. : ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1979. 70 с.
254. Даунс М., Кул Р., Мульдер Е., Гроем В. Некоторые перспективные новые вяжущие и их рентабельность. Чьи эластомеры обеспечат вашим дорогам хорошую память? 1992. № TR9.5 (R). С. 1-28.
255. Зубко З. Г. Бензо-маслостойкий пластбетон на углеводород-формальдегидной смоле для дорожного строительства : автореф. дис… канд. техн. наук: спец. Харьков, 1981. 22 с.
256. Костельов М. П. Зачем уплотнять асфальтобетон выше минимальной нормы // Дорожная техника. 2005. С. 133-138.
257. Claxton M., Lesage J., Planque L. When can bitumen rheological properties be used successfully to predict asphalt mix performance? // Congres Eurasphalt & Eurobitume. 1996. № 3. P. 1030-1042.
258. Gershkoff D., Carswell J., Nicholls C., Mercer J. The influence of binder properties on the wheel-traking rate of hot rolled asphalt // Congres Eurasphalt & Eurobitume. 1996. № 3. P. 1068-1077.
259. Ким А. Х., Леонович И. И. Расчет напряженно-деформационного

состояния асфальтобетонного дорожного покрытия // Теоретическая и прикладная механика. Минск, 1975. С. 3-9.

260. Радовский Б. С., Супрун А. С., Козак И. И. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. К. : Будівельник, 1989. 166 с.
261. Petkoven A. Verformungstbestandigkeit von Asfaltstrasse Berlin intenationale obersicht // Strasse and autobahn. 1977. № 28. P. 108-109.
262. Kask O. Beurteilung der standfestigkeit von Asphaltbeton – Decksehichten mit Hilf des Spurbildungstes // Bitumen. 1978. № 40. P. 180-183.
263. Финские нормы на асфальт. Хельсинки : Pankry, 2000. 103 с.
264. Воловик О. О. Підвищення стійкості асфальтобетонних покриттів дорожніх одягів автомобільних доріг до утворення колії : дис… канд. техн. наук. Х., 2016. 148 с.
265. Позняков М. К. Влияние свойств асфальтобетонных смесей на сопротивляемость колееобразованию // Строительные материалы. 2011. № 10 (682). С. 22-25.
266. Черных Д. С. Цветные полимербетоны на модифицированной каучуковым полиэтиленом нефтеполимерной смоле : автореф. дис… канд. техн. наук: спец. Ростов-на-Дону, 2013. 23. с.
267. Жданюк В. К., Костін Д. Ю., Воловик О. О. Колієстійкість щебенево-мастикових асфальтобетонів різних видів. *Проектування, будівництво і експлуатація нежорстких дорожніх одягів* : матеріали міжнародній науково-технічній конференції, яка присвячена 80-річчю ХНАДУ та дорожньо-будівельного факультету. Харків : ХНАДУ, 2010. С. 98-102.
268. Королев И. В., Золотарев В. А., Ступицев В. А. Асфальтобетонные покрытия. Донецк : Изд. Донбасс, 1970. 161 с.
269. Овчинников И. Г., Щербаков А. Г., Бочкарев А. В., Наумова Г. А. Прикладная механика дорожных одежд на мостовых сооружениях. Волгоград : ВолгГАСУ, 2006. 310 с.
270. Алиев А. М. Асфальтобетон в условиях жаркого климата. Баку :

Азербайджанское государственное издательство, 1980. 111 с.

271. Антіпов В. Н. Вплив річних коливань на деформаційні характеристики асфальтобетонних покриттів // Підвищення працездатності автомобільних доріг. 1975. Вип.13. С. 30-33.
272. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л. : Гидрометеоиздат, 1991.
273. Бабаев М. Г. Асфальтовые материалы в условиях жаркого климата. Л. : Стройиздат, 1984. 189 с.
274. Телтаев Б .Б., Каганович Е. В., Измайлова Т. Т. Учет климатических условий эксплуатации при выборе битума для асфальтобетонных смесей // Наука и техника в дорожной отрасли. 2008. № 2. С. 17-20.
275. Дорожные композитные материалы. Структура и механические свойства / под ред. Леоновича И. Н. Минск : Наука и техника, 1993. 245 с.
276. Горецький Л. І. Теорія і розрахунок цементобетонних покриттів на температурні дії. М. : Транспорт, 1965. 284 с.
277. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., 1964. 488 с.
278. Кирюхин Г. Н. Температурные режимы работы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2013. № 3. С. 309-328.
279. Ковалев Я. Н. Дорожно-климатическое районирование территории БССР для строительства асфальтобетонных покрытий // Применение местных материалов в дорожном строительстве БССР : сб. статей. М. : Транспорт, 1966. С. 64-71.
280. Ковальов Я. Н. Визначення літньої розрахункової температури дорожніх асфальтобетонних покриттів для різних кліматичних районів СРСР // Вісті Вузів. Серія «Будівництво і архітектура». 1967. № 11. С. 41-53.
281. Ладыгин Б. И. Основы прочности и долговечности дорожных бетонов. Минск, 1963. 127 с.
282. Ладыгин Б. И., Вдовиченко С. Л., Куприянчик А. А. Расчет перспективного срока службы асфальтобетона по трещиностойкости с учетом его старения // Автомобильный транспорт и дороги. Минск :

Высш. школа, 1975. Вып. 2. С. 217-221.

283. Справочное руководство гидрогеолога. 3-е изд., перераб. и доп. Т.1/ Под. ред. В. М. Максимова. Л. : Недра, 1979. 512 с.
284. Матлаков Н. В. Исследование температурного режима асфальтобетонных покрытий в условиях Западной Сибири // Труды Союздорнии. 1971. № 44. С. 18-29.
285. Мусаелян Э. А. Особенности работы асфальтобетонных покрытий на различных высотах горных дорог : дис.… канд. техн. наук. М., 1992. 223 с.
286. Немчинов М. В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобіля. М. : Транспорт, 1985. 231 с.
287. Р В.2.3-218-02071168-686:2007. Рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в мостових конструкціях з покриттям.
288. Ряпухін В. М., Батракова А. Г., Нечитайло Н. О. Розрахунки асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів з урахуванням термопластичних властивостей асфальтобетонів : монографія. Харків : ХНАДУ, 2012. 146 с.
289. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М. : Наука, 1975. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. 519 с.
290. Сиденко В. М., Батраков О. Т., Покутнев Ю. А. Дорожній одяг з парогідроізоляційними шарами. М. : Транспорт, 1984. 144 с.
291. Страгис В. И. Обоснование требований к сдвигоустойчивости асфальтобетона применительно к местным условиям Литовской ССР: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Каунас, 1974. 30 с.
292. Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Деркачов О. Б. Теплова діагностика (основи теорії та практики застосування) : монографія. К. : НТУ, 2012. 168 с.
293. Dunstan D. G. Temperature Variation and bituminous concrete sur facing in a site near // Road Research. 1967. Vol. 3 № 3.
294. Kallas B. F. Asphalt Temperatures Highway Research Board. 1966. № 150.

295. Kiryukhin G. N. Designing of asphalt pavements on the ultimately permissible irreversible deformation. *Proceedings of 24th International Baltic Road Conference*. Riga, 2000. P. 67-75.
296. RDO Asphalt 09 - Richtlinien Fuer Die Rechnerische Dimensionierung Des Oberbaus Von Verkehrsflaechen Mit Asphaltdeckschicht (Указания по расчету дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием) / FGSV. 2009. 498 p.
297. Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing / Asphalt Institute Superpave. 1997. Series No 1 (SP-1). 67 p.
298. Онищенко А. М. Математична модель температурного впливу на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів від дії коліс транспортних засобів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 94. С. 168-191.
299. Мішутін А. В. Аналіз факторів, що впливають на коліестійкість асфальтобетону // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 100. С. 130-148.
300. Батракова А. Г. Модели прогнозирования в системе мониторинга состояния дорожных одежд // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2013. Вип. 89. С. 115-125.
301. Батракова А. Г., Урдзик С. Н. Критерии оценки состояния дорожных одежд по результатам диагностики // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2015. Вип. 68. С. 92-98.
302. Батракова А. Г., Урдзик С. Н. Влияние положения нагрузки на напряженно- деформированное состояние конструкции дорожной одежды // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017. Вип. 6. С. 16-25.
303. Солодкий С. Й., Сідун Ю. В., Волліс О. Є. Вплив складу холодної литої асфальтобетонної суміші на її розпад та початок набору когезійної міцності // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014. Вип. № 53. С. 347-354.

304. Солодкий С. Й., Сідун Ю. В., Волліс О. Є. Вплив температурного режиму на процес твердіння литої емульсійно-мінеральної суміші // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 100. С. 85-90.
305. С. Й. Солодкий Інноваційні матеріали і технології для будівництва та ремонту дорожніх одягів автомобільних доріг: навчальний посібник. Нац. ун-т «Львів. політехніка». - Л.:Вид-во. політехніки, 2013. 137 с.
306. Альзаб А.Х., Солодкий С.Й. Особливості технології дорожнього асфальтобетону на основі природних бітумовмісних порід // Вісник Рівненського НУ водного господарства та природокористування «Ресурсоекономні матеріали, конструкції та споруди». 2010. - № 20. С. 3-10.
307. С.Й. Солодкий, А.Х Альзаб. Деформативні властивості дорожнього кіробетону // Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. 2010. № 664. С.228-231
308. Радовский В.С., Мурашина Н.В. Теоретические исследования условий приспособляемости грунта земляного полотна к повторным загрузкам // Тр. СоюздорНИИ. 1998. Вып.195. С.38-52.
309. Гамеляк І.П., Райковський В.Ф. Аналіз транспортно-експлуатаційних показників стану автомобільних доріг державного значення // Автомобільні дороги. Науково-виробничий журнал 2014. № 1 (237). С. 24-28.
310. СОУ 45.2–00018112–042:2009. Автомобільні дороги. Визначення транспортно-експлуатаційних показників дорожніх одягів. [Чинний від 2012-05-01] – К.: Укравтодор, 2009. – 35с.
311. Гамеляк І.П. Системна модель забезпечення надійності конструкцій дорожніх одягів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 100. С. 216-227.
312. Кіяшко І.В., Новаковський Д.М., Смолянюк Р.В. Оцінка поперечної рівності поверхні покриття автомобільних доріг // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 95. С. 75-86.

313. Онищенко А. М. Математична модель розрахунку колії в асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. Вип. 66. С. 177-183.
314. Золотарь И. А. Обеспечение надежности автомобильных дорог по прочности при их проектировании, строительстве и эксплуатации. С.П. : Военная академия тыла и транспорта, 1996. 84 с.
315. Дмитриченко М. Ф., Дмитрієв М. М., Гамеляк І. П., Якименко Я. М., Райковський В. Ф. Надійність конструкцій дорожнього одягу : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки «Буд-во». К. : НТУ, 2012. 216 с.
316. Павлюк Д.О., Лебедєв О.С., Кизима С.С., Булах Є.О., Глуховеря В.М. (НТУ), Іващенко А.П., Русин Р.М., Собачко С.М., Богданенко А. М. Кореляційні випробування засобів оцінки міцності дорожніх конструкцій // Автошляховик України. – 2008. – № 2. – С. 26–33.
317. Канарчук В.Є., Левковець П.Р., Левківський О.П. Морфологічний опис системної моделі забезпечення оптимальних властивостей автотранспортних засобів // Вісник ТАУ та Українського транспортного університету. К.: ТАУ, УТУ. 2001. №5. – С.22-25.
318. Коганзон М. С. Обоснование транспортно-эксплуатационных показателей дорожных одежд. *Пути повышения надежности автомобильных дорог* : Труды МАДИ. М., 1984. С. 82-84.
319. Коганзон М. С., Яковлев Ю. М. Качество и надежность дорожного строительства. М., 1981. 90 с.
320. Онищенко А. М. Теорія колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 96. С. 163-191.
321. Барвашов В. А. К расчету осадок грунтовых оснований, представленных различными моделями // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1977. № 4. С. 26-27.
322. Ильин С. В. Обеспечение сдвигоустойчивости асфальтобетонных

покрытий исходя из условия их эксплуатации : дис… канд. техн. наук. М., 2004. 185 с.

323. Лугов С. В. Основы положения методики расчета глубины колеи на дорожных одеждах с асфальтобетонным покрытием : дис… канд. техн. наук. М., 2004. 267 с.
324. М-218-03450778-256-2004. Методика випробування покриттів на стійкість проти колієутворення. К. : Укравтодор, 2004. 21 с.
325. Иноземцев А. А. Сопротивление упруго-вязких материалов. Л. : Стройиздат, 1977. 168 с.
326. Васильев А. П., Коган М. С., Яковлев Ю. М. Предложения по учету остаточных деформаций при расчете дорожных одежд нежесткого типа // Наука и техника в дорожной отрасли. 1997. № 1. С. 5-6.
327. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М. : Высшая школа, 1978. 417 с.
328. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М. : Стройиздат, 1971. 367 с.
329. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Тарлаковский Д. В. Теория упругости и пластичности. М. : Физматлит, 2002. 416 с.
330. Горячев М. Г. Обоснование Суммарного размера движения для расчета нежестких дорожных одежд с учетом процесса накопления остаточных деформаций : автореф. дис... канд. техн. наук. М. : МАДИ, 1999. 17 с.
331. Ермакович Д. В. Анализ вязкоупругой стадии деформирования слоев нежестких дорожных одежд на основе механических диаграмм. *Материалы Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по прочности дорожных одежд.* Харьков, 1968. С. 57-61.
332. Жустарева Е. В. Влияние плотности связного грунта в рабочем слое земляного полотна остаточные деформации нежестких дорожных одежд : автореф. дис... канд. техн. наук. М. : МАДИ, 2000. 20 с.
333. Казарновский В. Д., Смиронов В. М., Косарев Ю. И. Закономерности накопления остаточных деформаций в системе щебень-песок при

многократных нагрузках. *Совершенствование методов расчета и конструирования дорожных одежд* : сб. тр. СоюздорНИИ. М., 1986. С. 79-87.

334. Казарновский В. Д., Смиронов В. М. Условия накопления остаточных деформаций в песчаных грунтах оснований дорожных одежд. *Повышение долговечности дорожных конструкций* : сб. тр. СоюздорНИИ. М., 1986. С. 54-60.
335. Губач Л. С. Состояние и перспективы развития теории термовязкоупрухости асфальтобетона. *Повышение эффективности применения цементного и асфальтного бетона Сибири*. Омск, 1977. С. 16-35
336. Каныгина С. Ю. Прогнозирование остаточных деформаций дорожных одежд нежесткого типа на земляном полотне из глинистых грунтов : автореф. дис… канд. техн. наук. М. : МАДИ, 1999. 20 с.
337. Смирнов А. В. Прикладная механика дорожных и аэродромных конструкций. Омск : СибАДИ, 1993. 128 с.
338. Мурашина Н.В. Приспособляемость грунта к повторным нагрузкам и ее учет при проектировании и строительстве автомобильных дорог: дис... канд. техн. наук. К., 1991. 238 с
339. Богомолов В. А., Жданюк В. К., Богомолов С. В. Общее решение для четырехэлементных, линейных, вязкоупругих, 3 D моделей // Автомобильный транспорт, 2011. Вып. 29. С. 43-47.
340. Шестопалов А. А. Интенсификация процесса уплотнения асфальтобетонных смесей укаткой с вакуумированием : дис… докт. техн. наук. ЛПИ, 1988.
341. Онищенко А. Н. Методика определения колеестойкости асфальтобетонных покритий на бетонних и железобетонных основаних в лаборатории. *Новые дороги Росии*: сб. трудов Международной конференции. Саратов, 2011. С. 91-97.
342. Онищенко А. Н. Влияние различных факторов на интенсивность

образования остаточных деформаций виде колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов (часть 1) // Мир дорог. 2013. № 3. С. 2-4.

343. Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Методика визначення втрати міцності зчеплення гідроізоляційного матеріалу між асфальтобетоном і цементобетонною основою при зсуві після впливу водомороз них факторів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2013. № 50. С. 103-106.
344. Р В.2.3-218-21476215-795:2011. Рекомендації щодо підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття. К. : Укравтодор, 2011. 42 с.
345. Bartley F. G., Cornwell W. L. Aggregates for road pavements. Transit New Zealand Research Report. 1993. N17. 72 p.
346. Collings I. F., Cliffe P. F. Shakedown in frictinal materials under moving surface loads // International Journal for Numerical and Analytical Methods of Geomechanics. 1987. Vol. 11. No. 4. P. 28-37.
347. Crockford W. W., Bendana L. J., Yang W. S., Rhee S. K., Senadheera S. P. Modeling stress and strain states in pavements structures incorporating thick granular layers. Final report, The Transportation Institute, College station Texas. 1990. P. 57-71.
348. Sharp R. W. Shakedown-analyses and the design of pavement under moving surface load : PhD Thesis. University of Sydney. Australia. 1983.
349. Sharp R. W., Booker J. R. Shakedow of pavements under moving surface loads // Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1984. Vol. 110, N1, P. 1-14.
350. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация. М. : Высш. школа, 1976. 277 с.
351. Богуславский А. М., Ефремов Л. Г. Асфальтобетонные покрытия. М. : МАДИ, 19811. 145 с.
352. Лазарев В. В. Математическая модель процесса качения пневматического колеса по деформируемому грунту URL: http://science-bsea.narod.ru/2006/stroy_2006/lasarev.htm (дата звернення 19.03.2015).

353. Онищенко А. М. Оцінка надійності при прогнозуванні величини колії в асфальтобетонному покритті на транспортних спорудах // Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2015. Вип. 15, Частина 1 : Серія «Технічні науки». С. 119-128.
354. Р В.2.3–218–02070915–797:2011. Рекомендації з підвищення зсувостійкості асфальтобетонного покриття на бетонних та залізобетонних основах. К. : Укравтодор, 2012. 14 с.
355. ОДМ 218.2.004-2004. Методические рекомендации по применению асфальтобетонных покрытий на мостовых сооружениях автомобильных дорог. Москва : Росавтодор, 2010. 61 с.
356. ДБН В.2.3–22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.
357. ГБН В.2.3-218-003:2010. Споруди транспорту. Технологія улаштування гідроізоляції проїзної частини автодорожніх мостів і шляхопроводів із застосуванням полімерних матеріалів та водонепроникного бетону. К. : Укравтодор, 2010. 56 с.
358. Золотарев В. А. Дорожные асфальттобетоны. Избранные труды. Санкт-Петербург : Славутич, 2015. Т. 3. 184 с.
359. Костельов М. П., Перевалов В. П., Пахаренко Д. В. Практика борьбы с колейностью асфальтобетонных покрытий может быть успешной // Дорожная техника 2011. С. 54-70.
360. Матвиенко Ф. В., Канищев А. Н., Мелькумов В. Н., Волков В. В. Прогнозирование величины необратимой деформации дорожной конструкции от воздействия транспортного потока // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. № 3. С. 81-92.
361. Поздняков М. К., Быстров Н. В. Разработка метода оценки сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию. *Ассоциация исследователей асфальтобетона* : сб. докладов / Под редакцией Н. В. Быстрова, И. Б. Курденкова. М. : МАДИ, 2010. С. 91-99.

362. ДБН В.1.2-15:2009. Споруди транспорту. Навантаження та впливи. Мости та труби. К. : Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.

363. ДБН В.2.3–4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. Частина І. Будівництво. Частина ІІ. Проектуванняю К. : Мінрегіонбуд України, 2015. 91 с.

364. ДСТУ Б В.2.3-9-2003. Споруди транспорту. Пристрої дорожні напрямні. Загальні технічні умови. К. : Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2003. 61 с.

365. ДБН 360-92**. Зміна № 5. Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 64 с.

366. Шестериков В. И., Лушников Н. А., Поздняева Л. В., Штромберг А. А. Факторы моделирования. Исследования колееобразования на мостовых покрытиях и способы его устранения // Автомобильные дороги. 2011. № 12. С. 71-79.

367. Иванов Н. Н., Коганзон М. С., Коновалов С. В. Основы новой методики расчета жестких дорожных одежд с учетом повторяемости воздействия нагрузок. М. : Высшая школа, 1959. 61 с.

368. М 218-02071168-681:2011. Методика розрахунку асфальтобетонних шарів покриття на зсувостійкість. 2011. 50 с.

369. М 02071168-708:2012. Методика розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі з урахуванням термопластичних властивостей асфальтобетону. К. : Укравтодор, 2012. 90 с.

370. Онищенко А. М, Кузьмінець М. П., Редченко В. П., Тарнопольський Д. Й., Аксьонов С. Ю. Теоретичні та експериментальні дослідження Південного мостового переходу через р. Дніпро в м. Києві: монографія. К. : НТУ, 2014. 341 с.

371. ВБН В.2.3-218-008-97. Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів. К. : Укравтодор, 1997. 218 с.

372. Маркуц В. М. Транспортные потоки автомобильных дорог и городских улиц (практические приложения). Тюмень, 1988 – 2008.

373. Методические рекомендации по оценке сдвигоустойчивости асфальтобетона (Методичні рекомендації по оцінці зсувостійкості асфальтобетону) : № ИС – 42 р от 04.02.02. Москва : Росавтодор, 2002. 12 с.
374. Онищенко А. М. Методологія розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 97. С. 158-182.
375. СНиП 2.01.01-82 Строительная климатология и геофізика. М. : ЦИТМ Госстрой СССР, 1982. 136 с.
376. Батракова А. Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій : дис... докт. техн. наук. Х., 2014. 397 с.
377. Гамеляк І. П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу : дис... докт. техн. наук. К., 2005. 370 с.
378. МВ 218-02070915-647:2008. Методичні вказівки розрахунку дорожнього одягу різного типу на довговічність. К. : Укравтодор, 2008. 35 с.
379. М 02070915-750:2016. Методика проектування асфальтобетонного покриття залізобетонних автодорожніх мостів. К. : Укравтодор, 2016. 50 с.
380. СОУ 45.2-00018112-039:2008. Будівельні матеріали. Способи оцінки стійкості асфальтобетонних покриттів до утворення колії. Метод випробування. К. : Укравтодор, 2009. 12 с.
381. Gupta P. K., Walowit J. A. Contact stresses between an elastic cylinder and a layered solid // J. Lubrication Technology, Trans. ASME, Ser. F, 1974. 94. P. 251.
382. Gupta P. K., Walowit J. A., Finkin E. F. Stress distribution in plane strain layered elastic solids subjected to arbitary boundary loading // J. Lubrication Technology, Trans. ASME, Ser. F, 1973. 93. P. 457.
383. Barovich D., Kingsly S. C., Ku T. C. Stresses on a thin strip or slab with different elastic properties from that of the substrate // Internat. J. Engng. Sci.,

1964. 2. P. 253.

384. Gladwell G. M. L. Contacts problems in the classic theory of Elasticity. Alphen aan der Rijn: Sijthoff and Noordhoff, 1980.

385. McCormick J. A. A numerical solution for a generalized elliptical contact of layered elastic solids. MTI Report No.78 TR 52, Mech. Tech. Inc. Latham, New-York, 1978.

386. М 02070915-711:2012. Методика з розрахунку зміни жорсткості та міцності пакету асфальтобетонних шарів в залежності від стохастичної зміни температурного режиму повітря в річному циклі. К. : Укравтодор, 2012. 49 с.

387. Методические рекомендации по расчету температурных полей, напряжений о деформаций в цементобетонных покрытиях. М. : Союздорнии, 1976. 41 с.

388. Р В.2.3-218-02071168-686:2007. Рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в мостових конструкціях з покриттям. К. : Укравтодор, 2007. 26 с.

389. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М., 1964. 488 с.

390. Бесараб О. М. Підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів з врахуванням часу дії навантаження : дис... канд. техн. наук. К., 2003. 142 с.

391. Ладижинський І. С. Підвищення температурної тріщиностійкості асфальтобетонних шарів за рахунок використання синтетичних сіток : дис... канд. техн. наук. К., 2005. 109 с.

392. Іщенко О. М. Розробка методики розрахунку на температурну тріщиностійкість асфальтобетонного покриття штучних споруд автомобільних доріг : дис… канд. техн. наук. К., 2003. 136 с.

393. Батракова А. Г., Ряпухін В. М., Нечитайло Н. О. Розрахунки асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів з врахуванням термопластичних властивостей асфальтобетонів : монографія. Х. : ХНАДУ, 2012. 132 с.

394. Онищенко А. М. Підвищення довговічності асфальтобетонних шарів за рахунок використання полімерних латексів : дис... канд. техн. наук. К., 2008. 157 с.

395. Жуков О. О. Проектування асфальтобетонних шарів зносу для міських вулиць і доріг : дис... канд. техн. наук. К., 2011. 177 с.

396. Невінгловський В. Ф. Метод розрахунку залишкового ресурсу асфальтобетонного покриття на транспортних спорудах : дис... канд. техн. наук. К., 2015. 258 с.

397. Аксьонов С. Ю. Метод розрахунку довговічності асфальтобетонного покриття на металевих транспортних спорудах : дис... канд. техн. наук. К., 2016. 188 с.

398. Лапченко А. С. Реологічні властивості асфальтополімербетонів при динамічному деформуванні : автореф. дис... канд. техн. наук. Харків, 2010. 19 с.

399. Смолянець В. В. Удосконалення проектування асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу в умовах міст : дис... канд. техн. наук. К., 2005. 108 с.

400. Мозговий В. В. Шевчук О. О. Залежність термо-вязко-пружніх характеристик асфальтобетону від його складу // Вісник транспортної академії України та Українського транспортного університету. 1999. № 3.С. 45-51.

401. Телтаев Б. Б. Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов // Дорожна техника. 2010. С. 130-137.

402. Ферри Д. Вязко-упругие свойства полимеров. М. : Изд-во иностр. литер., 1963. 536 с.

403. Шепери Р. А. Вязкоупругое поведение композиционных материалов. *Механика композиционных материалов*. М. : Мир, 1978. С. 102-195.

404. Гохман Л. М. Регулирование процессов структурообразования и свойств дорожных битумов добавками дивинил-стирольных термоэластопластов : дис… канд. техн. наук. М., 1974. 224 с.

405. Москвитин В. В. Сопротивление вязкоупругих материалов. М. : Наука, 1972. 327 с.
406. Dobson G. R. The viskoelastic properties of asphaltic mixes / Inst. Petroll. (Techn.Pap.), 1976, N 4, 25 p.
407. Дорожко Є. В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі : дис... канд. техн. наук. Х., 2016. 280 с.
408. Страхова Н. Є., Голубєв В. О., Ковальов П. М., Тодорка В. В. Експлуатація і реконструкція мостів. К., 2002. 408 с.
409. Онищенко А. М. Проектування зернового складу асфальтобетону підвищеної колієстійкості з оптимізацією за показником розрахункового строку служби. International scientific and practical conference "World science". 2017. № 4(20), Vol.2. P. 32-35. ISSN 2413-1032. Видання входить до наукометричних баз даних: Index Copernicus, eLIBRARY.
410. Онищенко А. М. Методи оцінки колієстійкості асфальтобетону // Slovak international scientific journal : construction and architecture. Slovakia. 2016. № 2 (2). P. 16-26. ISSN 5782-5319.
411. Пічугін С. Ф., Махінько А. В. Деякі питання розрахунку надійності металоконструкцій // Металеві конструкції. 2006. 11, N3. С. 187-196.
412. Методика оцінки ефективності зчеплення гідроізоляційних матеріалів з асфальтобетонним покриттям на мостах / Мозговой В. В., Онищенко А.М., Жуков О. О., Лаптєва Н. С. та ін. // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 34. С. 67-73.
413. Онищенко А. М., Резник Ю. Л., Садовский О. А. “FLEXIGUM HP” Современная гидроизоляционная технология в дорожном и мостовом строительстве // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 34. С. 74-78.
414. Випробування конструкцій дорожнього одягу на кільцевому стенді – успіхи, проблеми, перспективи (частина 2) / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Прудкий О. В., Куцман О. М. та ін. // Автошляховик України. 2010.

№ 4. С. 24-31.

415. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С. Управління якістю по забезпеченню зсувостійкості та коліестійкості асфальтобетонного покриття на мостах // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2010. Вип. 38. С. 88-97.
416. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С., Невінгловський В. Ф. Експериментальна оцінка коліестійкості асфальтобетону за допомогою лабораторних установок // Автошляховик України. 2010. № 13. С. 93-100.
417. Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С., Гаркуша М. В. Методика забезпечення коліестійкості асфальтобетонного покриття на цементобетонній основі // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2011. Вип. 1(87). С. 17-25.
418. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Різніченко О. С., Невінгловський В. Ф. Підвищення коліестійкості асфальтобетонного покриття на мостах за рахунок конструктивних матеріалознавчих та технологічних заходів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2012. Вип. 45. С. 144-149.
419. Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю. Дослідження колійності асфальтобетонів різних типів та видів на бітумному в'яжучому «Полігум» // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. № 46. С. 272-278.
420. Мозговий В. В., Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю. Сучасні аспекти підвищення коліестійкості нежорсткого дорожнього одягу // Автошляховик України. 2012. № 5. С. 25-30.
421. Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Гаркуша М. В., Різніченко О. С. Заходи з підвищення коліє стійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з інтенсивним рухом великовантажних транспортний засобів // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. № 1. С. 58-65.
422. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Білан О. О.

Експериментальний аналіз впливу мікроволокон на підвищення тріщиностійкості та коліє стійкості асфальтобетонного покриття випробуваного на кільцевому стенді // Автомобільні дорого і дорожнє будівництво. 2013. Вип. 88. С. 89-100.

423. Онищенко А. М. Метод визначення функції зсувостійкості асфальтобетонного покриття на штучних спорудах // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту : Серія «Транспортні системи і технологія». К. : ДЕТУТ, 2013. Вип. 24. С. 52-59.
424. Онищенко А. Н. Выбор гранулометрического состава асфальтобетона повышенной колеестойкости экспериментальным методом для автодорожных мостов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014. № 56. С. 161-170.
425. Онищенко А. М. Експериментальний метод випробування інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону у вигляді колії // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту : Серія «Транспортні системи і технологія». К. : ДЕТУТ, 2014. Вип. 25. С. 56-62.
426. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Лапченко А. С. Методика розрахунку коліестійкості асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу з урахуванням укріплення основи // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 93. С. 67-78.
427. Онищенко А. М. Математична модель температурного впливу на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів від дії коліс транспортних засобів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2015. Вип. 94. С. 168-190.
428. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Різніченко О. С., Гаташ Я. С., Куртєв В. С. Аналіз результатів визначення функції релаксації асфальтобетонів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 95. С. 47-61.

429. Онищенко А. М. Аналіз результатів колійності в литому асфальтобетоні «гусасфальт» // Будівельні матеріали та вироби. 2010. № 1(91). С.72-74.
430. Mozgoviy V., Onishchenko A., Kyrienko O., Olhovyi B. Scientific bases of providing of road coverage wholeness on bridges // Zespolone konstrukcje mostowe. 2009. P. 423-436.
431. Мозговой В. В., Онищенко А. Н., Кищинский С. В. Пути обеспечения сдвигоустойчивости асфальтобетонного покрытия мостов и путепроводов // Ассоциация исследователей асфальтобетона. 2010. С. 129-143.
432. Mozgoviy V., Onishchenko A., Nevinglovsky V. Investigation of Modified with a Polumer Latex Butonal NS 104 the Bitumen Preparation Parameters Influence on the Paving Bitumen Properties // Former Soviet Union Area Workshop on Pavement Technologies. 2010. P. 1-9.
433. Онищенко А. Н. Колеестойкость асфальтобетонного покрытия на цементнобетонных основаних // Журнал современных строительных технологий «Красная линия». 2011. Вып. Дороги. № 52. С. 38-41.
434. Mozgoviy V., Onishchenko A., Kolesnik Y., Prudkyy A. Modification of asphalt concrete by polyamide fiber from post-consumer car tires. Kathmandu, Nepal Polychar. (20-24 March 2011). 2011. № 19. P. 208.
435. Мозговой В. В., Онищенко А. Н. Экспериментальная методика определения колеестойкости асфальтобетонных покрытий на мостах // Мир дорог. 2011. С. 57-59.
436. Онищенко А. Н. Влияние различных факторов на интенсивность образования остаточных деформаций виде колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов (часть 2) // Мир дорог. 2013. № 4. С. 28-29.
437. Onishchenko A., Kuzminets M., Aksenov S. Analysis of modified bitumen difference polymers // An international journal on operation of farm and agri-food industry machinery. Motor. Commission of motorization and energetic in agriculture. Lublin – Rzeszow, 2014. № 8. P. 101-106.
438. Мозговой В. В., Онищенко А. Н., Гаркуша Н. В., Белан О. О. Анализ

напряжено-деформированного состояния и устойчивости к колееобразованию асфальтобетонного покрытия, испытанного на кольцевом стенде // Мир дорог. 2016. С. 28-32.

439. Онищенко А. М., Аксьонов С. Ю., Раделицька Н. В. Дослідження впливу полімерних матеріалів на підвищення коліємтійкості асфальтобетону. *LXVIII Наук. конф. проф.-викл. складу, аспірантів, студ. та співр. відокремл. структ. підрозд. ун-ту*: тези доп. К. : НТУ, 2012. С.148.
440. Мозговой В. В., Онищенко А. Н., Гаркуша Н. В. Методы повышения устойчивости к колееобразованию асфальтобетонного покрытия. *Современные тенденции и направления строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог и искусственных сооружений :* матер. науч.-техн. конф. (Минск, 25-26.10.2012). Минск, 2012. С. 144-149.
441. Онищенко А.М. Аналіз експериментальних досліджень впливу різних факторів на інтенсивність утворення колії в асфальтобетонах різної гранулометрії. *Сучасні методи і технології, будівництва та експлуатації інженерних споруд на автомобільних дорогах :* мат. Між. наук.-техн. конф. (Київ, 04-05.04.2013). Київ, 2013.
442. Onishchenko A., Aksenov S., Garkusha M., Nevynhlovskyy V. Experimental metod of determination of rutting firmness of asphalt pavements on bridgers. *Transbaltica 2013* : The 8th International Conference. (Vilnius, May 9-10, 2013). Vilnius, Lithuania, 2013. P. 148-152.
443. Онищенко А. М. Проблема колієутворення на асфальтобетонному покритті штучних споруд автомобільних доріг та шляхи її вирішення. *LXIX Наук. конф. проф.-викл. складу, аспірантів, студ. та співр. відокремл. структ. підрозд. ун-ту* : тези доп. К. : НТУ, 2013. С.26.
444. Кононов В. Н. Деформации и разрушение однослойных асфальтобетонных покрытий // Тр. МАДИ. 1955. Вып. 16. С. 33-40.
445. ОДМ 218.2.021-2012. Методические рекомендации по дополнительным мерам по предотвращению колееобразования на стадии проектирования дорожных одежд. М. : Росавтодор, 2012. 101 с.

446. Кіяшко І. В. Обґрунтування критерію нормування поперечної рівності дорожнього покриття // Дороги і мости : зб. наук. праць. 2014. Вип. 14. С. 85-89.
447. Горячев М. Г. Обзор по проблеме колееобразования на автомобильных и городских дорогах / МАДИ. М., 2005. 25 с.
448. А Д 2.4-37641918-003:2015. Альбом типових конструкцій дорожнього одягу мостового полотна. К. : Укравтодор, 2015. 70 с.
449. ТУ У В.2.7-23.9-37566239-001:2012. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон литі «Гусасфальт». Технічні умови. К. : Укравтодор, 2012. 23 с.
450. СОУ 42.1–37641918–106:2013. Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні та асфальтобетон литі. Технічні умови. К. : Укравтодор, 2013. 14 с.
451. ДСТУ Б В.2.7–127:2015. Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови. К. : Мінбуд України, 2015. 28 с.
452. СОУ 45.2–00018112–057:2010. Будівельні матеріали. Асфальтобетонні суміші та асфальтобетон на основі модифікованих полімерами бітумів. К. : Укравтодор, 2010. 21 с.
453. СОУ 45.2–00018112–046:2009. Асфальтобетон дорожній. Методика оцінки зчеплення між асфальтобетонними шарами. К. : Укравтодор, 2011. 11 с.
454. Методика оцінки зчеплення між асфальтобетонними шарами при зсуві / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Жуков О. О., Невінгловський В.Ф. та ін. // Вісник ДНАБА. 2010. Вип. 2010-1(81). С. 53-60.
455. Свідоцтво серія № 41995 Науковий твір. Конструювання дорожнього одягу на мостах з асфальтобетонним покриттям підвищеної зсувостійкості / Онищенко А. М., Куцман О. М., Лаптєва Н. С., Невінгловський В. Ф., Різніченко О. С., Гаркуша М. В. Дата реєстрації 30.01.2012 р.

456. Патент України на корисну модель № 47625. Прилад для випробування зразків асфальтобетону НТУ-ЗЧ-1 / Мозговий В. В., Онищенко А.М., Козлов П. В., Резник Ю. Л., Куцман О.М. та ін. Дата реєстрації 10.02.2010 р.
457. Патент України на корисну модель № 106074. Пристрій для випробування зразків асфальтобетону НТУ-ЗЧ-2 / Онищенко А. М., Різніченко О. С. Дата реєстрації 11.04.2016 р.
458. Свідоцтво серія № 36218. Методика конструювання дорожнього одягу з покриттям підвищеної довговічності із щебенево-мастикового асфальтобетону / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Баран С. А., Куцман О. М., Лаптєва Н. С. Дата реєстрації 21.12.2010 р.
459. Свідоцтво серія № 62286. Практичні рекомендації по підвищенню довговічності асфальтобетонного покриття на транспортних спорудах / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Лаптєва Н. С. Дата реєстрації 28.10.2015 р.
460. Патент України на корисну модель № 40965. Прес для виготовлення і контролю зразків асфальтобетону / Онищенко А. М, Жуков О. О., Мозговий В. В., Радовський Б. С. Дата реєстрації 27.04.2009 р.
461. Патент України на корисну модель № 47603. Литий асфальтобетон / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.
462. Патент України на корисну модель № 47604. Асфальтобетонна суміш / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.
463. Патент України на корисну модель № 47605. Щебенево-мастикова асфальтобетонна суміш / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.
464. Патент України на корисну модель № 47616. В`яжуче «Полігум» / Мозговий В. В., Онищенко А. М., Козлов П. В., Резник Ю. Л. Дата реєстрації 10.02.2010 р.

465. Мозговий В.В., Онищенко А.М., Ольховий Б.Ю., Опрощенко І.О., Куцман О.М., Баран С.А., Різніченко О.С. Оцінка довговічності асфальтобетонного покриття шляхом випробування асфальтобетону на стійкість до накопичення залишкових деформацій // Вісник Національного транспортного університету. 2016. Вип. 34, С.283-293.

466. Патент України на корисну модель № 91289. Спосіб отримання стабілізуючої добавки для асфальтобетонної суміші / Онищенко А. М., Невінгловський В. Ф., Волинська І. М. Дата реєстрації 25.06.2014 р.

467. Онищенко А. М. Метод розрахунку міцності зчеплення асфальтобетонного покриття з проїзною частиною мосту при зсуві від дії екстреного гальмування транспортного засобу // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. С. 12-19.

468. Онищенко А. М. Досвід застосування полімерів в дорожньому будівництві // Управління проектами, системний аналіз і логістика. 2007. № 4. С. 146-153.

467. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А.М Удосконалення технології виготовлення полімер асфальтобетонних сумішей // Вісник НТУ. 2007. Вип. 26. С. 66-75.

468. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А. М. Теоретичні основи термо-реологічної поведінки полімерасфальтобетонів на основі латексів Butonal // Автошляховик України. 2007. № 6. С. 37-40.

469. Бесараб О. М., Смолянець В. В., Макарчев О. О., Онищенко А. М. Експериментальні дослідження термо-реологічної поведінки полімерасфальтобетонів на основі латексів Butonal // Автошляховик України. 2008. № 1. С. 36-39.

470. Мозговой В. В., Піскунов В. Г., Онищенко А. М, Прудкий О. В., Куцман О. М. Уточнена методика визначення модулів пружності дорожньо-будівельних матеріалів // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. 2009. Вип. 33. С. 137-142.

471. Страхова Н. Є., Голубєв В. О., Ковальов П. М., Тодіріка В. В.

Експлуатація і реконструкція мостів. К., 2002. 408 с.

472. Гурман В. Е. Теорія вероятности и математическая статистика. М. : Высшая школа. 1972. 368 с.
473. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятности. М. : Физматгиз, 1961. 524 с.
474. Аналіз дефектів асфальтобетонного покриття мостів, на автомобільних дорогах загального користування, отриманих з бази даних АЕСУМ. *Провести моніторинг, дослідити утворення тріщин і залишкових деформацій в асфальтобетонних покриттях мостів та розробити альбом типових конструкцій мостового полотна* : звіт про науково-дослідну роботу / Укравтодор. К., 2014. 224 с.
475. СОУ 45.2-00018112-062:2010. Конструкції дорожнього одягу автомобільних доріг. Методи випробування на кільцевому стенді. К. : Укравтодор, 2010. 41 с.
476. СОУ 42.1–37641918–100:2013. Будівельні матеріали. Бітуми дорожні модифіковані з використанням лабораторної лопатевої мішалки. Методи контролю процесу модифікації. К. : Укравтодор, 2013. 17 с.
477. ДСТУ Б В.2.7–135:2014. Будівельні матеріали. Бітуми дорожні, модифіковані полімерами. Технічні умови. К. : Мінрегіонбуд України, 2014. 23 с.
478. СОУ 42.1-37641918-092:2014. Суміші асфальтобетонні. Метод визначення мінімально допустимих температур ущільнення. К. : Укравтодор, 2014. 16 с.
479. СОУ 45.2-00018112-076:2012. Асфальтобетонні шари з армуючими прошарками. Метод визначення розрахункових характеристик. К. : Укравтодор, 2012. 25 с.
480. СОУ 42.1-37641918-099:2013. Розрахунковий опір розтягу при згині монолітних дорожньо-будівельних матеріалів. Метод визначення. К. : Укравтодор, 2013. 12 с.
481. СОУ 45.2–00018112–059:2010. Методи визначення розрахункових модулів пружності. К. : Укравтодор, 2011. 20 с.

482. СОУ 45.2–00018112–020:2007. Асфальтобетон дорожній. Метод випробування на стійкість до накопичення залишкових деформацій. К. : Укравтодор, 2008. 13 с.
483. ДСТУ Б В.2.7-319-2016. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Методи випробувань. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 71 с.
484. ГОСТ 10180–90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М. : Стадандартинформ, 2006. 30 с.
485. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие / Под ред. Р. А. Макарова. М. : Машиностроение, 1975. 288 с.
486. Кузьмінець М. П. Формування комплексу спеціальних землерийних машин для роботи в умовах діючих магістральних трубопроводів : дис... докт. техн. наук. К., 2013. 320 с.
487. EN 12697-22: 2003. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheeltrackingtest.
488. Кирюхин Г. Н. Методы проектирования и испытания асфальтобетона. Обзорная информация. 2005.
489. PN-EN 13108-20:2006. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania. Część 20: BadanieTypu.
490. PN-EN 13108-5:2006. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wymagania. Część 5: Mieszanka SMA.
491. Гоц А. Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей : учеб. пособие. Владимир : Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. 124 с.
492. Концепція реконструкції та модернізації кільцевого випробувального стенду / Укравтодор. К., 2015. 70 с.
493. Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Часть 2 Дорожные асфальтобетоны: учебник / В.А. Золотарев. – Харьков: ХНАДУ, 2016. – 204 с.
494. Барабащук В. И., Креденцер Б. П., Мирошниченко В. И. Планирование

эксперимента в технике. К. : Техника, 1984. 200 с.

495. Адлер Ю. П., Маркова Е. Б., Грановський Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука. 1976. 254 с.
496. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / пер. с нем. под ред. Лецкого Э.К. М. : Мир, 1977. 552 с.
497. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М. : Финансы и статистика, 1981. 263 с.
498. С. Й. Солодкий Математичне моделювання та оптимізація будівельних композитів навчальний посібник. Нац. ун-т «Львів. політехніка». - Л.:Вид-во. політехніки, 2006. 92 с.
499. ГБН В.2.3–218–547:2010. Влаштування асфальтобетонних шарів дорожнього одягу при низьких температурах. К. : Укравтодор, 2011. 22 с.
500. Р В.2.3–218–21476215–222:2011. Рекомендації щодо застосування асфальтобетонних сумішей, армованих мікроволокнами. К. : Укравтодор, 2011. 28 с.
501. Радовский Б. С. Сегрегация асфальтобетонных смесей и методи борьбы с ней в США // Дорожная техника. 2007.С. 26-40.
502. ДСТУ 4044–2001. Бітуми нафтові дорожні в’язкі. Технічні умови. К. : Держстандрт України, 2001. 15 с.
503. Р В.2.7–02071168–813:2013. Рекомендації щодо влаштування асфальтобетонного покриття на мостах з литої асфальтобетонної суміші. К. : Укравтодор, 2013. 16 с.
504. ДМД 02191.2.051-2012. Рекомендации по подбору состава асфальтобетонных смесей по асфальтовяжущему. Минск. : ГП «БелДОРНИИ» , 2012. 22 с.
505. Кравченко С. Е., Игошкин Д. Г. Особености применения модифицирующих добавок при проектировании состава асфальтобетона // Сборник статей и докладов ежегодной научной сессии Ассоциации иследователей асфальтобетона. М. : МАДИ, 2013. С. 150-160

506. Неволин Д. Г., Кошкаров В. Е., Кошкаров В. Е. Технология обеспечения автодорог на основе битумно-полимерных материалов : монографія. Екатеринбург : УрГУПС, 2015. 135 с.
507. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. К. : Мінрегіонбуд, 2010. 123 с.
508. СН 509-78. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. М. : Госстрой СССР, 1978. 65 с.
509. Рекомендации по оценке экономической эффективности компонентов асфальтобетонных смесей для устройства покрытий улиц населенных пунктах / Веренько В. А., Занкович В. В., Афанасннко А. А, Яцевич П. П., Федоров Л. А. 14 с.
510. Грушко И. М., Сиденко В. М. Основы научных исследований. М. : Транспорт, 1983. 221 с.
511. Шведков Е. Л. Элементарная математическая статистика в экспериментальных задачах материаловедения. К. : Наукова думка, 1975. 112 с.
512. СОУ 45.2–00018112–065:2013. Норми фінансових витрат на поточний дрібний ремонт та експлуатаційне утримання автомобільних доріг загального користування та мостів на них. К. : Укравтодор, 2011. 21 с.
513. Проектирование дорожных одежд / Иванов Н.Н., Защепин А.Н., Корсунский М.Б. и др. М. : Автотрансиздат, 1955. 250 с.
514. Сиденко В. М., Миховыч С. Г. Эксплуатация автомобильных дорог. М. : Транспорт, 1976. 228 с.
515. Онищенко А. М., Різніченко О. С., Куртєв В. С. Методика визначення міцності зчеплення між асфальтобетонним покриттям та залізобетонною основою мосту при зсуві // Вісник НТУ. 2016. № 34. С. 319-327.
516. Кулижников А. М., Кулижникова Т. С. Организация движения автотранспорта по дорогам с асфальтобетонным покрытием в период

летних высоких температур // Мир дорог. 2013. № 70. С. 20-23.

517. ТК 218-03449261-065:2005. Технологічна карта на влаштування тонкошарового покриття дорожнього одягу з литої емульсійно-мінеральної суміші типу Сларі-Сіл (Мультімак) при будівництві і ремонті автомобільних доріг машиною SCHAFER SMS 11000. К. : Укравтодор, 2005. 18 с.
518. Киселев В. Б., Макий Ю. Н. Исследование пологих оболочек на основе методов теории планирования эксперимента // Сопротивление материалов и теория сооружений. 1983. Вып. 42.
519. Федоров Б. В. Теория оптимального эксперимента. М. : Наука, 1971. 214 с.
520. Адлер Ю. П., Грановский Ю. Б. Методология и практика планирования эксперимента за десять лет // Заводск. лаб. 1977. N3 10. С. 53-59.
521. Р В.2.3–218–21476215–687:2007. Рекомендації з застосування ефективних матеріалів для герметизації тріщин і швів дорожнього покриття. К. : Укравтодор, 2007. 14 с.
522. Р А.2.1–218–05416892–675:2007. Рекомендації з обстеження конструкцій існуючих дорожніх одягів автомобільних доріг для обґрунтування проектних рішень. К. : Укравтодор, 2008. 28 с.