

УДК 625.7/.8

Онищенко А.М., канд. техн. наук.

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРАХУНКУ КОЛІЄУТВОРЕННЯ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ

Анотація. В статті наведено методологію розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. В даній роботі запропоновано три методи, а саме: прогнозування колії в покритті, прогнозування температурних полів в асфальтобетонному покритті з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів; визначення надійності асфальтобетонного покриття на основі теорії ймовірності.

Ключові слова: колієутворення, температура, асфальтобетонне покриття, автодорожній міст, теорії ймовірності.

Аннотация. В статье приведены методология расчета колеи в асфальтобетонном покрытии на автодорожных мостах. В данной работе предложено три метода, а именно: прогнозирование колеи в покрытии, прогнозирования температурных полей в асфальтобетонном покрытии с учетом интенсивности движения транспортных средств; определения надежности асфальтобетонного покрытия на основе теории вероятности.

Ключевые слова: колеи, температура, асфальтобетонное покрытие, автодорожный мост, теории вероятности.

Abstract. In the article the methodology for calculating rutting in asphalt pavement on road bridges. In this methodology proposed three methods, namely forecasting gauge in the coating, predicting temperature fields in asphalt pavement considering traffic vehicles; determine the reliability of asphalt pavement based on the theory of probability.

Keywords: rutting, temperature, asphalt pavement, road bridge, the theory of probability.

Вступ

На автодорожніх мостах України та багатьох зарубіжних країн світу в останні роки з'явилися проблеми суттєвого утворення колійності на асфальтобетонному покритті при підвищених аномальних температурах та більш інтенсивного навантаження від транспорту за рахунок: збільшення загальної маси транспортних засобів, збільшення тиску на асфальтобетонне покриття від пневматиків, збільшення кількості осей великовантажних транспортних засобів та збільшення інтенсивності їх руху і долі у транспортних потоках. Раніше вважалось, що утворення колії на проїзній частині характерна тільки для автомобільних доріг, а на мостах із-за жорсткої основи під покриттям такого явища не повинно бути. Але в останні роки із збільшенням інтенсивності і швидкості руху транспортних засобів на асфальтобетонному покритті автодорожніх мостів почала з'являтися інтенсивно колія, глибина якої може досягати 50 – 80 мм при загальній товщині покриття 70 – 110 мм. Результатом такої проблеми є те, що різко скорочується строк служби покриття, але і погіршуються показники безпеки руху. Таким чином, колієутворення в асфальтобетонному покритті є актуальною проблемою сьогоденної практики у дорожньому будівництві. Однак комплексну оцінку колійності при комбінованому застосуванні різних заходів, що регулюють склад асфальтобетону, технологію його виготовлення та влаштування, параметри асфальтобетонного покриття з жорсткою основою та характеру зчеплення між шарами в залежності, від параметрів транспортного та кліматичного факторів, вивчено недостатньо. Тому саме сьогодні потрібно розробити математичну модель та метод колієутворення в асфальтобетонному на мостах для прогнозування строку служби покриття за критеріями: за сумарною залишковою деформацією у вигляді колії накопиченої за розрахунковий строк служби покриття; за інтегральним показником стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону накопиченого за розрахунковий строк служби покриття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемою підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття займаються вчені: А.П. Васильєва, В.А. Веренько, М.Г. Горячева, В.К. Жданюк, В.О. Золотарьов, Б.С. Радовський, Б.Б. Телтаєв, В.К. Шумчик, М. К. Поздняков, Д.О. Павлюк, М.П.Костельов, Г.Н. Кирюхін, Ф.В. Матвиенко, З.А. Мевлідінов,

В.В. Мозговий, В.П. Матуа, , В.І. Шестеріков, М.І. Шейнцвіт, Ю.М. Яковлева та ін. [1-14]. Аналіз методів визначення колійності асфальтобетонного покриття автомобільної дороги [13] і мостів [14], показав про багатогранність існуючих підходів. В основі більшості з них лежить теорія міцності, що не в повній мірі відображає оцінку накопичення колієутворення, пов'язаного з пластичною деформацією, крім того в недостатній мірі враховані термореологічні характеристики матеріалів конструкції, час дії навантаження, величина навантаження, температура матеріалів, а також комплексного впливу різних заходів, направлених на підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття. Тому метою роботи є розробка методології розрахунку колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах.

Основна частина

Загальні положення. Ідеєю методології є оцінювання колійності асфальтобетонного покриття на стадії проектування та під час його експлуатації є врахування особливостей конструкції дорожнього одягу, що зумовлюють напружено-деформований стан покриття за рахунок взаємозв'язку покриття з жорсткою основою мосту і залежать від термореологічних властивостей асфальтобетону та параметрів впливу транспортного і кліматичного факторів. Запропонований метод ґрунтується на теоретичних основах колієутворення в асфальтобетонних покриттях на автодорожніх мостах, що враховує вищенаведені фактори Оцінювання колійності полягає у аналітичному прогнозуванні утворення колійності у часі на основі математичної моделі, параметри якої встановлюються експериментально та корегуються на основі вимірювання параметрів колійності у процесі експлуатації. В основі теорії колієутворення використовується функціональне ядро рівняння стану [15], 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'язкопружності 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'язкопружні 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, гнучкість аналітичного рішення процесу колієутворення в асфальтобетоні при коченні пневматика полягає в рахуванні змінної товщини асфальтобетонного покриття, можливість удосконалювати дослідницьку модель врахуванням явища мікропросковзування через параметр $F_p(\beta, De)$ [16], і особливостей асфальтобетонного покриття (зокрема в одно- чи двошаровому наближенні). Температурно – часові умови деформування асфальтобетонного покриття визначають кліматом регіону і характером інтенсивності руху транспортних засобів на автодорожніх мостах. 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. Для оцінки інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону в якості граничного стану запропоновано, що накоплена за розрахунковий строк служби залишкова деформація як суму площ максимальної глибина колії в покритті не повинна перевищувати гранично значення. Запропоновано теорію ймовірності при вивченні процесів колієутворення в асфальтобетонному покритті з метою встановлення граничних станів деградації покриття на мостах. Інтенсивність впливу транспортних засобів на асфальтобетонне покриття мостів характеризується приведеною інтенсивністю дії рухомого навантаження або сумарним розрахунковим числом приведенного розрахункового навантаження (автомобілів за добу), очікуємого на полосі накату, за строк служби покриття.

Метод прогнозування температурних полів в асфальтобетонному покритті з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів.

Температурне поле в асфальтобетонних покриттях формується під дією багатьох чинників: сонячної радіації, довгохвильового випромінювання атмосфери та самого покриття, конвекційної теплопередачі між покриттям та середовищем та ряду менш значущих. 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 багатошарової конструкції дорожнього одягу в реальних умовах несе всі ознаки нестационарності (або квазістационарності), яке відрізняється тим, що температура будь-якій її точки змінюється з часом. В диференціальному записі рівняння теплопровідності Фур'є-Кірхгофа у випадку нерухомого середовища і відсутності внутрішніх джерел тепла має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T, \quad (1)$$

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 нестационарного 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, котра 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. Температура поверхні при періодичній зміні, згідно закону розповсюдження тепла у твердому середовищі виражається гармонічною функцією часу t :

$$t = A_0 \sin(\omega \tau + \varphi), \quad (2)$$

де A_0 – амплітуда коливань температури;

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ - кутова частота коливань;

τ - час, для якого визначається температура;

φ - кінцева фаза коливань.

Якщо коефіцієнт температуропровідності по глибині залишається постійним, то амплітуда коливань температури на глибині Z буде дорівнювати:

$$A_z = A_0 e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{aT}}}, \quad (3)$$

де T – період коливання температури.

Запізнення коливань температури з глибиною, яке характеризується фазою φ_z буде визначатися співвідношенням:

$$\varphi_z = \frac{Z}{2} \sqrt{\frac{T}{\pi a}}. \quad (4)$$

Як видно, кількість і часто взаємопов'язаність теплових параметрів між собою, вносить певну громіздкість в розрахункову базу і зростання похибки методу. Відповідно, для спрощення оцінок варто застосовувати феноменологічні теплові моделі, в яких використовуються обмежена кількість характеристик з доброю параметризацією. З цих позицій прийнятним є використання двопараметричної квадратичної залежності [17] для визначення розрахункової температури асфальтобетонного покриття та визначення теплового потоку і пов'язаного з ним температурного поля від тертя шини в смузі накату, що ґрунтується на розв'язку [18, 19]. Це, на нашу думку, дасть змогу спрогнозувати температурне поле з прийнятною точністю, що в подальшому ляже в основу термовязкопружних розрахунків.

Визначення розрахункової температури покриття. Виходячи з положень адитивності теплових потоків [17] запропоновано наступне рівняння для визначення найвищої розрахункової температури асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах:

$$T^{\max} = 0,9545(T_{ПВ} - 0,00618\Theta_{Nlat}^2 + 0,2289\Theta_{Nlat} + 42,2) - 17,18, \quad (5)$$

де T^{\max} - максимальна температура покриття, °С;

$T_{ПВ}$ - семиденна середня максимальна температура повітря, °С;

Θ_{Nlat} - широта пункту вимірювання (ПВ широти).

Тепловий потік і температурне поле від тертя шини. Потік тепла, що формується при контакті шини з покриттям $q_p(t)$ виникає внаслідок проковзування протектора шини в області контакту. Температура згенерована за рахунок тертя шини T_m :

$$T_m = \frac{2q_p(t)}{\lambda} \sqrt{\frac{at}{\pi}}, \quad (6)$$

де a - коефіцієнт температуропровідності, м²/год;

λ - теплопровідність, кал/м²·год·град;

t - час дії.

Повний тепловий потік, який потрапляє від шини в покришці в межах зони контакту виражатиметься функцією $q_p(t)$ [18]:

$$q_p(t) = \frac{a\rho C_p \pi^2}{4H} S_\phi (T_n - T_u), \quad (7)$$

де ρ - густина покриття, кг/м³;

C_p – питома теплоємність, ккал/кг·град;

H - товщина покриття, м;

S_ϕ - площа фактичного контакту шини з покриттям, м²;

T_u – температура поверхні шини;

T_n – поверхні покриття.

Метод прогнозування колієутворення в асфальтобетонному покритті. Суть методу полягає у визначенні глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах від дії пневматичних коліс та температури з урахуванням тертя шини. При прогнозуванні глибини колії, враховується теорія кочення по асфальтобетонному покритті пневматичного колеса транспортного засобу, яке деформується в процесі руху, тому в методі розрахунку необхідно враховувати деформацію самого пневматика. Для розрахунку використовується пружна лінійна модель колієутворення, яка розподіляє тиск в області контакту (рис. 1) пневматика і має вираз [15], який після інтегрування і підстановки сумарної початкової деформація пневматика разом із глибиною осадки $h + y_0 = \frac{a^2}{2R}$ та інтегрування:

$$\frac{1}{b} P = \int_{a'}^0 p d\xi + \int_0^a p d\xi, \quad (8)$$

$$\frac{1}{b} P = \beta \frac{-a'^3}{3R} + \frac{c\beta}{c + \beta} \frac{a^3}{3R}, \quad (9)$$

де b - ширина колеса;

P – навантаження;

p – тиск;

ξ - біжуча координата по плямі контакту;

a - відстань від осьової частини контакту колеса до його найвіддаленішої точки попереду плями контакту;

a' - відстань від осьової частини контакту колеса до його найвіддаленішої точки позаду плями контакту;

β - постійна пневматика;

R - радіус колеса;

c - пластична стала.

Вираз для отримання відстані від освої частини контакту колеса до його найвіддаленішої точки попереду плями контакту a розраховується виходячи з виразу (ф. 3) з геометричних міркувань розподілу тиску при коченні пневматика (рис. 1)

$$a = 0.01 \sqrt{\frac{2Rp}{cy_0v}} \quad (10)$$

Перерахунок $a' = a \sqrt{\frac{c}{c+\beta}}$ приводить до:

$$\frac{1}{b} P = \beta \frac{a^3}{3R} + \frac{c\beta}{c+\beta} \left(1 + \sqrt{\frac{c\beta}{c+\beta}} \right). \quad (11)$$

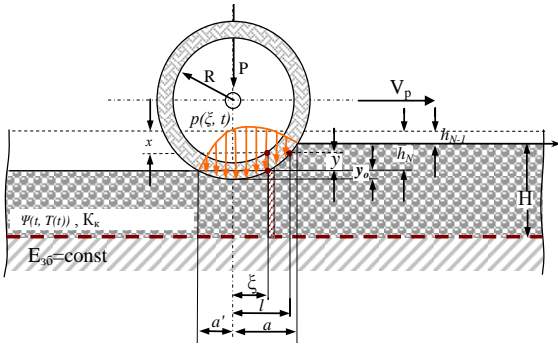


Рисунок 1 - Модель кочення пневматичного колеса по асфальтобетонному покритті, яке міцно зчеплене з проїзною основою автодорожнього мосту

v - швидкість кочення, H - товщина шару, y - пружний хід колеса по вертикалі, h_{N-1} - глибина колії, яка утворилась до наступного N -го проходу пневматичного колеса транспортного засобу; h_N - осадка при N -кратному коченні колеса; $\Psi(t, T(t))$ - функція релаксації асфальтобетону; $E_{зб}$ - модуль пружності залізобетонної плити мосту K_c - коефіцієнта колієстійкості; y_0 - деформація пневматика; h - товщина асфальтобетонного покриття.

Для отримання формули для глибини колії, що утворилась після першого проходу колеса [15]: використовуючи вираз (8) із заміною відповідного блоку у (11):

$$h = \frac{a^2}{2R} - \frac{a'^2}{2R} = \frac{c\beta}{c+\beta} \frac{a^3}{3R}. \quad (12)$$

$$h = \frac{1}{2} (c\beta R)^{-\frac{1}{3}} \left[\left(\frac{3P}{b} \sqrt{\frac{c+\beta}{c\beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (13)$$

Рух пневматичного колеса транспортного засобу по пружній поверхні покриття викликає у ньому деформацію, після проходження пневматичного колеса настає процес відновлення (зворотня повзучість) або так звана релаксація. Для в'язкопружних матеріалів, протягом часу вимірювання, набагато більшого, ніж час релаксації, колісне навантаження викликає

незворотні пластичні деформації. В'язкопружний матеріал має початковий динамічний відклик на навантаження з модулем $K(1+\beta)$. Але вже при статичних умовах - умовах релаксації - модуль тільки K , що діє протягом часу t . Тому справедливо для в'язкопружного матеріалу пружний модуль K замінити функцією релаксації Ψ . Рівняння стану напруження у в'язкопружному матеріалі у точці x дається рівністю:

$$p(x, t) = -\sigma = -\int_0^t \Psi(t-t') \frac{\partial \varepsilon(t')}{\partial t'} dt' \quad (14)$$

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

$$p(x) = -\frac{1}{R h} \int_{-x}^x x' \Psi(x-x') dx' \quad (15)$$

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

$$\Psi(t) = K \left(1 + \beta e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (16)$$

де $K(1+\beta)$ - початковий динамічний пружний відклик,
 τ - час дії навантаження.

Як відомо [1-14, 20] збільшення температурив в асфальтобетонному покритті негативним чином впливає на деформаційні властивостей, що призводить до збільшення часу релаксації, це призводить до перевищення середнього часу дії навантаження транспортного засобу. Збільшення на кожні 10 °С температури еквівалентно збільшенню транспортного потоку в 1,2 рази. Для опису пружнов'язкого характеру взаємодії колеса з врахуванням температури правомірною температурно-часовою аналогією, тому функція релаксації $\Psi(t)$ уточнюється зарахунок температурно-часової залежності $\Psi_T(t)$. Тому для визначення функції релаксації асфальтобетону для будь-якої температури $\Psi(t, T)$, достатньо знати функцію релаксації при заданій температурі $\Psi(t, T) = \Psi_T$ та коефіцієнт температурно-часового зміщення $a_T(T)$. Тоді можна записати:

$$\Psi(t, T) = \Psi_T(\mu, T_1), \quad (17)$$

де μ - приведений час;

Застосування принципу температурно-часової аналогії до функції релаксації полягає у проведенні температурного нормування модулів пружності

по всьому практично застосованому температурному діапазоні (від -10°C до 65°C). Загальний вид функції релаксації асфальтобетону, після відповідних перетворень [20] та доповнень коефіцієнтом матиме такий вигляд

$$\Psi_T(t, T) = E_{дг} + (E_{мт} - E_{дг}) \times K_{\Psi_T}^{\Psi_T}(II, T_p, III) \times \left[1 + \frac{\frac{e^{P_1(T_0+k_1t-T_s)}}{P_1 \cdot k_1} \cdot (e^{-P_1 k_1(t-\tau)})}{\eta}}{\eta} \right]^{-\lambda} \quad (18)$$

де $E_{дг}$ - модуль пружності довготривалий;

$E_{мт}$ - модуль пружності миттєвий;

τ - час релаксації;

p - температурне зміщення;

Q - температурна константа;

k_1 - швидкість зміни температури (охолодження нагрівня);

η - нижній кут нахилу релаксаційної кривої;

λ - верхній кут нахилу релаксаційної кривої;

$K_{\Psi_T}^{\Psi_T}(II, T_p, III)$ - уточнюючий коефіцієнт функції релаксації

асфальтобетону, який залежить від penetрації, температури розм'якшеності та індексу penetрації бітумного вязучого.

Визначення глибини колії, після одного проходу пневматичного колеса транспортного засобу по покриттю необхідно здійснити перехід виразу, що описує отримання глибини колії в відповідним перетворенням формули (13) в модель в'язкопружності, згідно принципу (17), необхідно виконати "монтажу" в у нього фіктивних сил навантаження і релаксації. Для цього використаємо залежність [16] та отримаємо на проміжному етапу вираз із використанням модуля пружності:

$$h = \frac{1}{2} (\beta c R)^{-\frac{1}{3}} \left[\frac{3Ka^3}{bRH} Fp \left(\sqrt{\frac{c+\beta}{c\beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (19)$$

де K - модуль пружності,

$Fp(\beta, De)$ - сила тертя, яка виникає при контакті тіл при коченні.

У рівнянні (19) вносимо заміну модуля пружності K і постійну c на функцію релаксації $\Psi_T(t, T)$ та модуль пластичності c , після чого вираз глибини колії матиме наступний вигляд:

$$h = \frac{1}{2}(\beta c R)^{-\frac{1}{3}} \left[\frac{3a^3}{bRH} \frac{1}{\Psi_T(t)} Fp \left(\sqrt{\frac{c + \beta}{c\beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (20)$$

Постійні c і β , як правило, встановлюються експериментальним шляхом. Для практичних розрахунків, величину c можливо апроксимувати:

$$c = \Psi_T^{новна}{}_{a\beta i}(t, T) - \Psi_T^{пруж}{}_{a\beta i}(t, T), \quad (21)$$

де $\Psi_T^{пруж}{}_{a\beta i}(t, T)$ - функція релаксації асфальтобетону асфальтобетону;

$\Psi_T^{нов}{}_{a\beta i}(t, T)$ - модуль деформації асфальтобетону, який залежить від часу дії навантаження і температури.

Отриманий вираз (20) є ядром для отримання залишкових деформацій (у вигляді колії) у покритті на основі терморелогічних властивостей асфальтобетону, навантаження та характеристик колеса.

Використовуючи рекурентні вирази для обчислення зростання глибини колії, при послідовних коченнях колеса відбувається зміна геометричної області плями контакту. Зокрема, точка на поверхні матеріалу покриття під пневматиком, де відбувається початок деформації все більше і більше наближається до вертикальної площини, прогресивно зменшуючи величину a , і відповідно і величини приросту глибини колії. Найпростішим підходом для обчислення цієї збіжності є залучення рекурентних функцій. Тоді відстеження зростання глибини колії в залежності від числа проходів колеса виконується послідовними ітераційними обчисленнями, в якій обчислення приросту глибини конкретного кочення буде залежати від величини попереднього. Аналіз розподілу навантаження в контексті його приросту глибини колії $\Delta h_N = h_N - h_{N-1}$ показує, що він апроксимується квадратичним рівнянням:

$$\frac{P}{b} = \mu_0 v (h_N - h_{N-1}) - \frac{1}{2} \mu v (h_N - h_{N-1})^2, \quad (22)$$

де μ_0 та μ - певні сталі.

Один із коренів квадратичного рівняння, що містить $\Delta h_N \in \delta_N$, інший корінь - u_N .

Зв'язані між собою змінні наступним чином:

$$\Delta h_N = \gamma u_N \quad (23)$$

$$h_{N-1} = \gamma \delta_{N-1} \quad (24)$$

$$\delta_N = \delta_{N-1} + u_N, \quad (25)$$

де $\gamma = \sqrt[3]{\frac{P^2}{2b^2c^2R}}$ (де c - стала інтегрування) [15].

Розв'язки для рівняння (25) можна представити у послідовності отримання величини δ_n із величини δ_{N-1} : $N=1$, $\delta_N=1,31$, $u_N=1,31$; $N=2$, $\delta_N=1,71$, $u_N=0,40$; $N=3$, $\delta_N=1,99$, $u_N=0,28$ і т.д.

Базуючись на вищенаведеному матеріалі пропонується методика розрахунку глибини колії та її прогнозування. Для розрахунку глибини колії та її прогнозування структурно складається з декількох блоків (рис. 1) і представлена наступними алгоритмами: розрахунку ефективної кількості проходів колеса; розрахунку глибини колії (або можливо скористатися розробленими автором альбом номограм колійності для асфальтобетонів); прогнозування глибини колійності в асфальтобетонні із заданною надійністю; критерії колієстійкості асфальтобетонного покриття; оцінки надійність процесу колієутворення; похибки визначення прогнозованої максимальної глибини колії.

Аналітичний вираз (19) певною мірою передає ідеалізовані умови кочення і не враховує багато реальних моментів, які мають вплив на процеси колієутворення. Насамперед, необхідно враховувати добову і річну мінливість навантаження, що прикладається на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів, вплив смуговості руху тощо. З цією метою використовуються спосіб введення в аналітичний вираз (20) ряд нормуючих поправок [21]. Інтенсивність руху приведене до розрахункового навантаження (автомобілів за добу) розраховуються за формулою порічно із врахуванням коефіцієнтів приведення (перший, другий, десятий, п'ятнадцятий роки) за формулою[21]:

$$\sum N_p = f_{смуг} \cdot \sum (N_{1m} \cdot K_c \cdot T_{знд} \cdot 0,7) \cdot S_{м-сум} \cdot K_n \cdot \tau, \quad (26)$$

де $\sum N_p$ - сумарна кількість прикладення навантажень,

$f_{смуг}$ - коефіцієнт за смуговість;

N_{1m} - середньодобова інтенсивність руху в обох напрямках автомобілів в заданий рік служби,

K_c - коефіцієнт суми;

$T_{знд}$ - кількість розрахункових днів за рік, що мають вплив на стан деформативності (колійності) конструкції [21],

$s_{\text{м сум}}$ - сумарний коефіцієнт приведення дії на дорожній одяг транспортного засобу до розрахункового навантаження;

k_n - коефіцієнт, що враховує ймовірність відхилення сумарного руху від середнього, що очікується;

m - кількість розрахункових років служби асфальтобетонного покриття.

τ - час дії навантаження

Для врахування сумарної кількості прикладення навантажень $\sum N_p$ враховують середньодобову інтенсивність руху в обох напрямках автомобілів в заданий рік служби N_{1m} та коефіцієнт $s_{\text{м сум}}$, що виконує приведення дії на асфальтобетонне покриття транспортного засобу різних типів автомобілів до розрахункового навантаження відповідно до [21]. Розрахунок кількості колієнебезпечних днів у році $T_{\text{знд}}$ здійснюється наближено за допомогою нормативного документу [21]. Наближене визначення кількості колієнебезпечних днів у році $T_{\text{знд}}^m$ для дорожньо-кліматичних регіонів України (індекс У) можливе за [21]. Точне визначення кількості колієнебезпечних днів у році $T_{\text{знд}}^\phi$ з врахуванням розподілу температур потребує встановлення середньорічної позитивної температури повітря даного регіону і наступного визначення показника $T_{\text{знд}}^\phi$.

Величина середньорічної позитивної температури повітря встановлюється з метою оцінювання колієнебезпечності для асфальтобетонного покриття і використовуються формули 27 [13]:

$$T_{\text{срч}}^+ = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} T_{\text{ср}i}}{n_m} \quad (27)$$

де n_m - кількість місяців у році зі стійкою позитивною температурою (використати табл. 5);

$T_{\text{ср}i}$ - середня температура i -го місяця (обирається за довідковими матеріалами), °С.

Для підрахунку зростання глибини колії при дії кочення коченні пневматичного колеса транспортного засобу, використовується рівняння з використанням коренів δ_n та u_n (25) як функції від кількості циклів навантажень.

$$h_{N+1} = \frac{1}{2}(\beta c R)^{-\frac{1}{3}} \left[\frac{3a^3}{bRH} \frac{1}{\Psi_T(t)} Fp \left(\sqrt{\frac{c+\beta}{c\beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \left(h_1 \delta_{N+1} - \frac{h_1}{\delta_{N+1}} \right). \quad (28)$$

Якщо розглядається одношарова модель асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту, то рівняння зростання глибини колії має вигляд:

$$h_{N+1}^{nu} = \frac{1}{2}(\beta c R)^{-\frac{1}{3}} \left[\frac{3a^3}{bRH} \frac{1}{\Psi_T(t)} Fp \left(\sqrt{\frac{c+\beta}{c\beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \left(h_1 \delta_{N+1} - \frac{h_1}{\delta_{N+1}} \right) \cdot K_k, \quad (29)$$

Для виконання обчислення приросту глибини колії від першого проходу пневматичного колеса транспортного засобу в асфальтобетонному покритті необхідно використати рівняння (19). В якості вихідних величин задаються наступні параметри: β - постійна пневматика, Па/м; b - ширина пневматика, м; c - пластична постійна, Па/м, R - радіус колеса, м, H - товщину покриття, м. При наявності даних щодо коефіцієнту тертя Fp між шиною і поверхнею асфальтобетонного покриття та коефіцієнту колієстійкості K_k вводяться ці параметри. У разі відсутності даних Fp та K_k для розрахунку приймають значення, яке рівне одиниці. Функція релаксації асфальобетону визначається за формулою (18) величина функції релаксації вимірюється в Па, а час дії навантаження в сек., температура в °С. У разі використання автоматизованого модулю обчислення глибини колії, в якості вихідних додається ряд характеристик пневматичного колеса, тип асфальтобетону, вид в'язучого, параметри функції релаксації. Ці вхідні дані використовувалися для побудови альбому номограм, приклад наведено на (рис.2). Для узгодження розмірності механічних і функціональних параметрів в автоматизований модуль по замовчуванню внесені емпірично встановлені коефіцієнти приведення: коефіцієнт приведення K_{np} (як функція від виду в'язучого і типу асфальтобетону), поправка за початкове значення величини колії δ_0 , коефіцієнт для обчислення приросту осадки δ_n , постійна інтегрування c_1 .

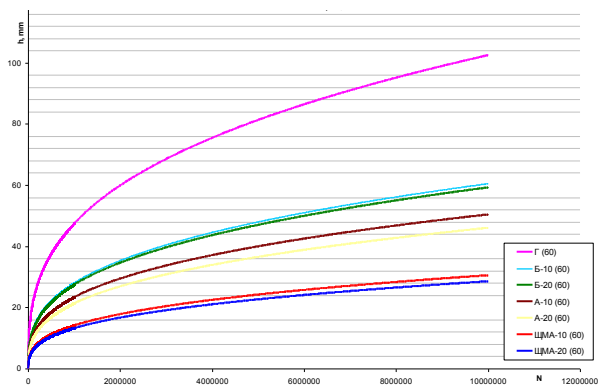


Рисунок 2 – Номограма прогнозування глибини колії в асфальтобетонному покритті із заданими параметрами кочення: бітум модифікований полімером БМП 40/60-56, тиск 0,5 МПа, температура покриття 60 °С, товщина покриття 7 см, інтенсивність руху пневматичного колеса транспортного засобу - 60 км/год.

Прогнозування максимальної глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах з урахуванням різного строку експлуатації покриття.

Пропонується розраховувати максимальну глибину колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах, яка утворюється від дії пневматичних коліс транспортних засобів при заданому строку служби покриття:

$$h^{\max}(\sum N_p) = h_p(\sum N_p) + h_\tau(N) + h_\Delta \quad (30)$$

де $h_p(\sum N_p)$ - розрахункова глибина колії в асфальтобетонного покриття є функцією від інтенсивності (N_p), яка визначається за теорією (29);

$h_\tau(N)$ - знос покриття залежить від інтенсивності руху транспортних засобів на смугу та строку служби за залежністю (31), мм;

h_Δ - глибина колії внаслідок доущільнення асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах приймається для розрахунків 2 мм.

Знос покриття можливий розрахунок за виразом:

$$h_\tau(N) = (A \times N_p + B) \cdot T_p \quad (31)$$

де A, B - параметри зносу асфальтобетонного покриття від дії шипованих пневматичних коліс транспортних засобів, параметри приймаються [13]:
 $A = 0,00009$; $B = 0,143$, мм;

T_p - строк служби покриття, роки.

Критерії колієстійкості асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах. Розрахунок колієстійкості асфальтобетонного покриття виконується за двома критеріями:

1 – за сумарною залишковою деформацією у вигляді колії накопиченої за розрахунковий строк служби покриття;

2 – за інтегральним показником стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетону накопиченого за розрахунковий строк служби покриття. (Даний критерій приймається для оцінки інтегрального показника накоплених залишкових деформацій в асфальтобетоні з метою визначення сумарної площі, яка утворилась від різних режимів роботи, інтенсивності руху транспортних засобів при відповідному навантаженні та температури).

В якості критерію стійкості до накопичення залишкових деформацій приймається гіпотеза, яка ґрунтується на допущенні про сумарну глибину колії, яка складається з розрахункової глибини колії, (абразійного) зносу та внаслідок доущільнення асфальтобетонного покриття, від дії транспортних засобів та температури. Критерій передбачає, що утворена за розрахунковий строк служби максимальна глибина колії в асфальтобетонному покритті не повинна перевищувати граничного допустимого значення:

$$h^{\max}(\sum N_p) \leq h_{г.д.} \quad (32)$$

де $h^{\max}(\sum N_p)$ - максимальна глибина колії в асфальтобетонному покритті визначається за залежністю (30);

$\sum N_p$ - розрахункова сумарна кількість прикладання розрахункового навантаження приймається за залежністю (26), один./д;

$h_{г.д.}$ – гранично допустима глибина колії, мм (табл.1).

Таблиця 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
	1	2	3	4
A-1; A-2	15	20	27	30
A-3; A-4	15	20	27	30
A-5; A-6	18	25	30	35
A-7	18	25	30	35

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.

Критерій інтегрального показника стійкості до колієутворення. Відповідно до теорії ймовірності при вивченні процесів колієутворення в асфальтобетонному покритті існує можливість встановлення граничних станів деградації системи покриття на мостах. Для ідентифікації граничних станів і умов переходу із стану в стан пропонується застосовувати інтегральний показник залишкової деформації при відповідному технічному стані. Використання інтегрального показника стійкості до накопичення залишкових

деформацій асфальтобетону в якості критерію передбачає, що накоплена за розрахунковий строк служби залишкова деформація як сума площ під графічними залежностями розрахункової максимальної глибина колії $h_{кр}^{max} = f(\sum N_p)$ в покритті не повинна перевищувати гранично допустимого значення:

$$S_W = \sum_k^{i=1} \sum_n^{j=1} \int_0^{N_p} h^{max} (\sum N_p) dN \leq S_{Г.Д} \quad (33)$$

де S_W - інтегральний показник стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах;

$S_{Г.Д}$ - гранично допустиме значення інтегрального показник стійкості до накопичення залишкових деформацій асфальтобетонного покриття визначається за залежністю (34).

$$S_{Г.Д} = h_{Г.Д} \times N_p \quad (34)$$

Прогнозування максимальної глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах в залежності від інтенсивності транспортних засобів, температури, різного тиску та товщини покриття за розрахунковою моделлю (рис.1). Використання аналітичних розрахунків закладених у метод дозволяє встановити максимальну 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, матеріалознавчі, 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. 3-10). Останній підхід передбачає, що дослідник вибирає із альбому необхідну номограму із заданими параметрами асфальтобетонного покриття на автодорожньому мосту, який експлуатується в конкретних дорожньо-кліматичній зоні, а потім шляхом лінійної інтерполяції відшуковує питому величину колії. Для випадку температури поверхні 60 °С, марки в'язучої використаної компоненти в асфальтобетонного покриття - БМП 40/60-56 на номограмі (рис. 3-10) винесені максимальні величини колії (в ізолініях від 4 мм до 20 мм) для окремих типів асфальтобетону: Г, Б-10, Б-20, А-10, А-20, ЩМА-10, ЩМА-20, з максимальною крупністю зерен щебеню 10, 20 мм, а у випадку

використання асфальтобетону з крупністю зерен 15 мм необхідно прийняти середнє значення глибини колії між максимальною крупністю зерна 10 мм та 20 мм даних типів асфальтобетону. Глибину колії для асфальтобетону типу В приймають 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 .

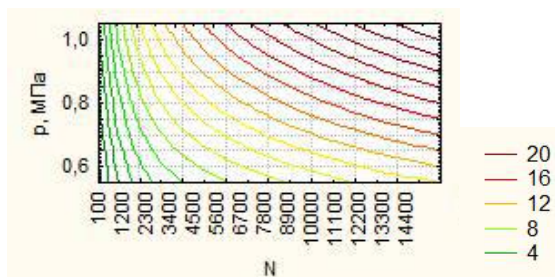


Рисунок 3 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу Г при температурі покриття 60°C, в'язучого - БМП40/60-56

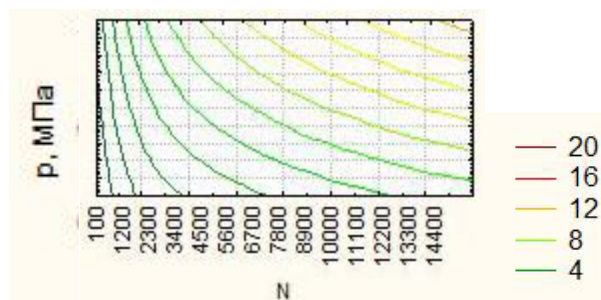


Рисунок 4 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу Б-10 при температурі покриття 60°C, в'язучого - БМП 40/60-56

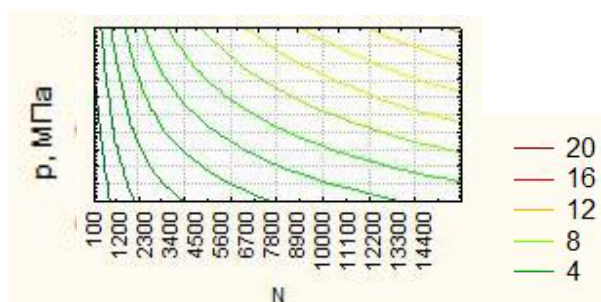


Рисунок 5 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу Б-20 при температурі покриття 60°C, в'язучого - БМП 40/60-56

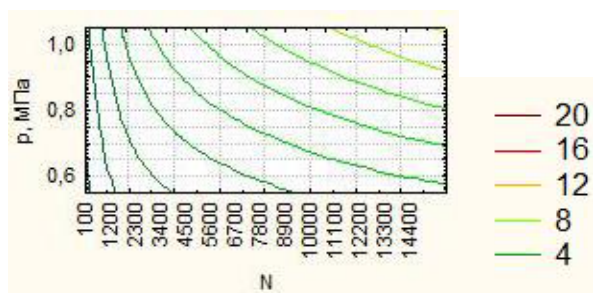


Рисунок 6 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу А-10 при температурі покриття 60°C, в'язучого - БМП 40/60-56

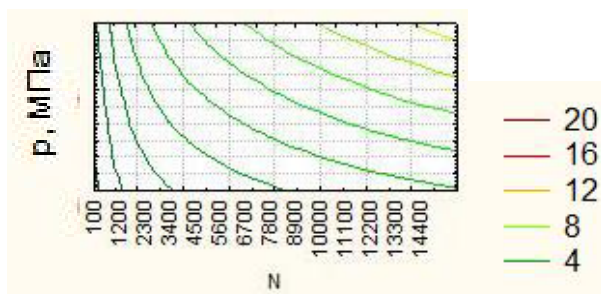


Рисунок 7 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу А-20 при температурі покриття 60°C, в'язучого - БНД 40/60-56

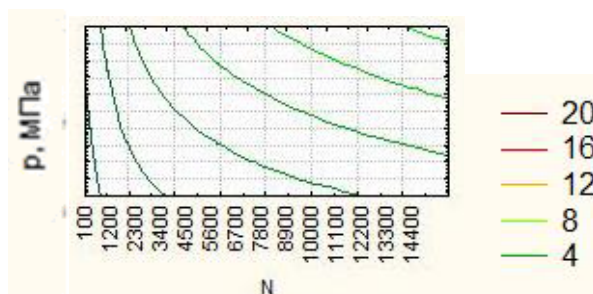


Рисунок 8 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу ЩМА-10 при температурі покриття 60°C, в'язучого - БНД 40/60-56

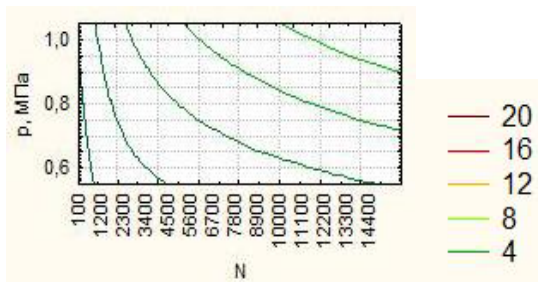


Рисунок 9 - Прогноз колії (в мм - показані кольорові ізолінії) для асфальтобетону типу ЩМА -20 при температурі покриття 60°C, в'язучого - БМП 40/60-56

Метод визначення надійності при прогнозуванні колії в асфальтобетонному покритті на автдорожніх мостах на основі теорії ймовірності. Для математичного визначення надійності системи асфальтобетонного покриття, яке перебуває під дією процесів колієутворення можна скористатися функцією надійності $P(t)$ та функцією відмов $p(t)$. Функція відмов, що описує відношення кількості відмов за одиницю часу до числа початкової кількості досліджуваних елементів [22-25]. Математична частота відмов виражається як похідна від функції надійності зі зворотним знаком:

$$p(t) = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (35)$$

Функція $\lambda(t)$ інтенсивності відмов, або оскільки мова йде про функцію часу, часова оцінка перевищення граничного стану. Ця функція описує кількість відмов за одиницю часу віднесена до середнього числа елементів, що нормально функціонують. Інакше кажучи - ймовірність того, що граничний стан не буде перевищений протягом достатньо малого часу спостережень.

Між частотою та інтенсивністю відмов існує зв'язок:

$$\lambda(t) = \frac{p(t)}{P(t)}. \quad (36)$$

Для опису потоку відмов використано детерміністський і стохастичний підхід на основі моделювання випадковими марковськими процесами. Випадковий процес називається марковським, якщо для будь-якого моменту часу ймовірнісні характеристики процесу залежать тільки від його стану і не залежать від того, коли система перейшла в цей стан [22-25]. Потік подій у марковському процесі, послідовність однорідних подій, які відбуваються у випадкові моменти часу один за одним. Згідно (35), потік відмов характеризується інтенсивністю λ - частотою появи подій або середнім числом подій. Для нашого випадку потік відмов – деградації асфальтобетонного покриття на автдорожніх мостах у процесі експлуатації, які можуть бути описані функцією набуття системою дискретних рангованих станів [22-25]. В

теорії ймовірностей відносно пуассонівського потоку є доказ [26, 27], що ймовірність потрапляння події k на відрізок часу $t_0 + t$ визначається формулою:

$$P_k = \frac{a^k e^{-a}}{k!}, \quad (37)$$

де a – середня кількість подій, що потрапляє на проміжок часу t ; k – кількість подій

Величина a дорівнює інтенсивності потоку, помноженого на довжину інтервалу:

$$a = \lambda t \quad (38)$$

Ймовірнісний процес, що відбувається у системі, являється як послідовність подій відмов елементів системи: $S_1^{(k)}, S_2^{(k)}, S_3^{(k)}$. Ймовірність здійснення кроку k при якому система перейде із стану S_i до S_{i+1} характеризується щільністю ймовірності переходу, яка позначається $\lambda_{i,i+1}$. Ймовірність потрапляння неперервної двовірної випадкової величини в область D дорівнює:

$$P(X, Y) = \iint_D \varphi(x, y) dx dy. \quad (39)$$

Щільність ймовірності двовірної випадкової величини - друга змішана похідна від функції розподілу двовірної випадкової величини:

$$\varphi(x, y) = \frac{d^2 F(x, y)}{dx dy} = F''(x, y). \quad (40)$$

Для чисельного розрахунку щільність двовірної випадкової функції здійснюється шляхом обрахунку за формулою:

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sqrt{1-r^2}} \left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2} \right]\right), \quad (41)$$

де r - коефіцієнт кореляції випадкових величин X і Y ;

σ_x - середньоквадратичне відхилення випадкової величини X ;

σ_y - середньоквадратичне відхилення випадкової величини Y ;

m_x - математичне сподівання випадкової величини X ;

m_y - математичне сподівання випадкової величини Y .

В диференціальній формі ймовірність того, що елемент системи у момент часу $t+\Delta t$ перебуватиме у стані S_1 і т.д. описуватиметься диференційним рівнянням:

$$\begin{aligned}\frac{dp_1(t)}{dt} &= -\lambda_{12}p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= -\lambda_{23}p_2(t) + \lambda_{12}p_1(t) . \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= -\lambda_{23}p_2(t)\end{aligned}\quad (42)$$

Ця система носить назву рівняння Колмогорова-Чепмена, і описує ймовірності перебування системи у певний момент часу в обраному стані. Для всього масиву станів набуде вигляду.

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = -\lambda_{i,i+1}p_i(t) + \lambda_{i-1,i}p_{i-1}(t), \quad i = 1, 2, \dots, n . \quad (43)$$

Рішення рівнянь дає змогу записати матрицю ймовірностей переходів, яка характеризує випадковий марковський ланцюг відмов. Граф станів марковського ланцюгу у процесі коліє утворення з винесеними ймовірностями переходу. Із ймовірностей переходів системи із одного стану складається матриця переходів системи:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1-p_1(t) & p_1(t) & 0 \\ 0 & 1-p_2(t) & p_2(t) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Відповідно до матриці (44) перехідних ймовірностей, знаючи початковий стан системи, можна знайти ймовірності стану $p_1(k)$, $p_2(k)$, $p_3(k)$ після будь-якого кроку за допомогою наступних співвідношень:

$$p_i(k) = \sum_{j=1}^n p_j(k-1)P_{ij} \quad (i = 1, \dots, n) . \quad (45)$$

Марковський ланцюг описується за допомогою ймовірностей станів:

$$p_i(k) = P(S_i^{(k)}), \quad (46)$$

де k - номер кроку марковського ланцюга, $k = 1, 2, \dots, n-1$;

n - номер стану, $n = 1, 2$.

В розгорнутому вигляді ймовірності цих подій для кроку k :

$$\begin{aligned}p_1(k) &= p(S_1^{(k)}) \\ p_2(k) &= p(S_2^{(k)}) \\ p_3(k) &= p(S_3^{(k)})\end{aligned}\quad (47)$$

Зрозуміло, що сума ймовірностей подій в системі становитиме: $p_1(k) + p_2(k) + p_3(k) = 1$.

Надійність елемента визначається, як ймовірність того, що у момент часу t елемент вийде із стану S_l , тобто спричиниться відмова $l+1$ [22-25]:

$$P_i(t) = \sum_{k=l-1}^n p_k P_k(t), \quad (48)$$

де l – номер поточного стану;

n – кількість дискретних станів протягом життєвого циклу елемента;

p_k - надійність елемента, що надана йому у k -тому дискретному стані;

$p_k(t)$ - перехідна ймовірність k -тому дискретному стані.

Надійність системи вираховується за звичайними формулами теореми про множення ймовірностей [22-25]:

при паралельному з'єднанні елементів

$$P = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i(t)). \quad (49)$$

У виразах щільності відмов λ як функції часу надійність системи набуває вигляду [22-25]:

$$P(t) = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (50)$$

де m – кількість елементів у системі.

Для тристанової системи деградації асфальтобетонного покриття на мостах [23-25] вираз (41) записується як:

$$P_t = 1 - 0,125(\lambda t)^3 e^{-\lambda t}. \quad (51)$$

Оцінка надійності асфальтобетонного покриття щодо процесу колієутворення. Функцією надійності описується процес колієутворення, як частина загального процесу деградації асфальтобетонного покриття, протягом т.з. життєвого циклу покриття та терміну його експлуатації до досягнення стану "непрацездатності". Кількість експлуатаційних станів асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах з огляду на [25] обирається рівною 3, а щільність потоку відмов λ (темп деградації асфальтобетонного покриття)

можливе відтворене показником $\lambda = \frac{h_{\Sigma}^i}{N_{ef} \times h_{\Sigma}^{\max}} (10^3)$ - накопиченою глибиною колією

h_{Σ}^i віднесено на ефективну кількість проходок N_{ef} (теж саме, що і функція (51)) і максимальне значення h_{Σ}^{\max} , що включатиме в собі параметри інтенсивності руху і навантаження. Для отримання кількісної міри надійності системи для випадку трьох експлуатаційних станів асфальтобетонного покриття використано рівняння (51) або графічна залежність (рис. 10), яка при заданій інтенсивності відмов λ встановлюється зв'язок між величиною надійності P_t на заданий рік експлуатації асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах.

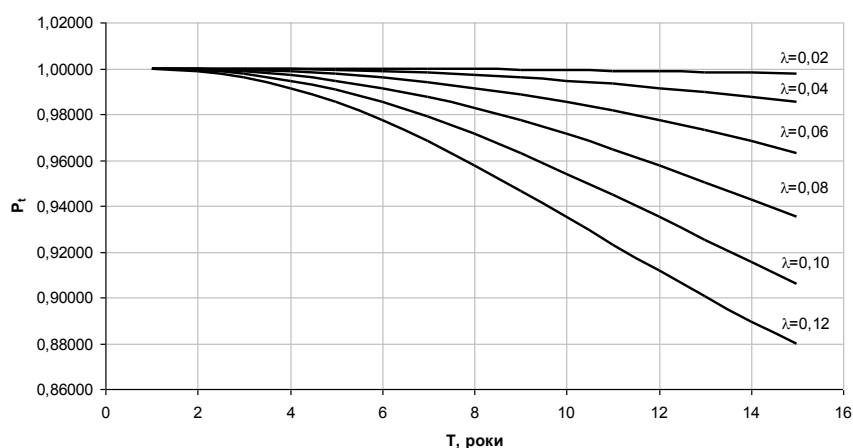


Рисунок 10 - Криві деградації елементів системи колієутворення асфальтобетонного покриття

Похибки визначення прогнозованої максимальної глибини колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Відомими підходами математичної статистики перевіряється закон розподілу шуканих величин (за допомогою гістограм або критеріїв Колмогорова-Смірнова, Шапіро-Уїлкса тощо). У разі нормального розподілу, залежність для отримання шуканої величини і довірчого інтервалу:

$$X_{cp.ген} = X_{cp.виб} \pm t \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (52)$$

де $X_{cp.ген}$ - середнє генеральної вибірки;

$X_{cp.виб}$ - середнє вибірки;

t - критерій Студента;

σ - середнє квадратичне відхилення;

n - обсяг вибірки.

Зв'язок t -критерію зі значенням ймовірності P за яким встановлюється довірчий інтервал впливає з табл. 2.

Таблиця 2 - Значення ймовірності P

P	0,683	0,850	0,900	0,950	0,954	0,990	0,997
t	1,00	1,04	1,50	1,96	2,00	2,58	3,00

Наприклад, максимальну глибину колії з 90%- забезпеченістю розраховують за формулою:

$$h_{85\%}^{\max} = h^{\max} (1 + tC_v), \quad (53)$$

де t - коефіцієнт довірчої ймовірності при 90% забезпеченості, рівний 1,5;

c_v - коефіцієнт варіації глибини колії (табл. 3).

Таблиця 3

Значення коефіцієнта c_v для різних категорій доріг				
I	II	III	IV	V
0,250	0,260	0,290	0,300	0,330

Висновок

Запропоновано використання методу з розрахунку і прогнозування колієутворення в асфальтобетонному покритті, який пристосований до автодорожніх мостів із залізобетонною основою. Даний метод базується на теорії колієутворення та термо-в'язко-пластичності асфальтобетонну, який враховує термореологічні його властивості. Метод включає підходи з прогнозування температурних полів в асфальтобетонному покритті з урахуванням інтенсивності руху транспортних засобів, а також визначення надійності при прогнозуванні колії в асфальтобетонному покритті на автдорожніх мостах на основі теорії ймовірності.

Література

1. Золотарев В.А. Дорожные асфальтобетоны. Избранные труды. Том 3 // Санкт-Петербург: Славутич, 2015. – 184 с.
2. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. – Алматы: «Білім», 2013. – 152 с.
3. 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.
4. Костельов М.П. Практика борьбы с колеиностью асфальтобетонных покрытий может быть успешной / Костельов М.П., Перевалов В.П., Пахаренко Д.В. // «Дорожная техника 2011» — Санкт-Петербург: Изд. ООО «Славутич».— С. 54-70.
5. Прогнозирование величины необратимой деформации дорожной конструкции от воздействия транспортного потока / Ф.В. Матвиенко, А.Н. Канищев, В.Н. Мелькумов, В.В. Волков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. № 3. С. 81-92.
6. Поздняков М. К. Разработка метода оценки сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию /М. К. Поздняков, Н. В. Быстров // Ассоциация исследователей асфальтобетона : Сборник докладов / Под редакцией Н. В. Быстрова, И. Б. Курденкова. – М. : МАДИ, 2010. – С. 91–99.
7. Матуа В.П. Прогнозирование и учет накопления остаточных деформаций в дорожных конструкциях / В.П. Матуа, Л.Н. Панасюк. – Ростов – на - Дону: РГСУ, 2001. – 327 с
8. EN 12697-22 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Wheel tracking.
9. Validation of Asphalt binder and mixture tests that measure rutting susceptibility, Kevin D. Stuart, Walaa S. Mogawer, and Pedro Romero, FHWA-RD-99-204, 2000.
10. Мозговой В.В. Экспериментальная оценка устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колеиности / Мозговой В.В., Онищенко А.М., Прудкий А.В., и др./ В кн.: Дорожная техника. – 2010 – С. 114 – 128.

11. Кирюхин Г.Н. Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей / Кирюхин Г.Н., Смирнов Е.А. – М.: Информавтодор, 2003. – 96 с.
12. Головка С.К. Сучасний підхід до дослідження колієутворення в асфальтобетонних покриттях / Головка С.К., Бабінець А.Д., Фощ І.В. // Дороги і мости. – 2004. – вип. 2. – С. 34-47.
13. ОДМ Рекомендации по выявлению и устранению колея на нежестких дорожных покрытиях. /Минтранс РФ, «Росавтодор», 2002
14. ОДМ 218.2.004-2010 Методические рекомендации по применению асфальтобетонных покрытий на мостовых сооружениях автомобильных дорог. /Минтранс РФ, «Росавтодор» 2010
15. Ишлинский А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю.Ишлинский , Д.Д. Ивлев - М.: Монографія : ФИЗМАТЛИТ, 2001, 2003. - 704 с. - ISBN 5-9221-0141-2.
16. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия/ К. Джонсон: Пер. с англ. – М.: Монографія : Мир, 1989. – 510 с.
17. Рекомендації з розрахунку температурних полів і напружень в асфальтобетонних покриттях конструкції нежорстких дорожніх одягів : Р В. 2.3 – 21476215-803:2012/ Укравтодор. – Офіц. вид. – К.: Укравтодор, 2012. – 15 с. – (Нормативний документ Укравтодору).
18. Немчинов М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобиля / Немчинов М.В. – М.: Транспорт, 1985. – 231 с.
19. Онищенко А.М. Математична модель температурного впливу на асфальтобетонне покриття автодорожніх мостів від дії коліс транспортних засобів // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, Вип. 94. - К.: НТУ, 2015. - С. 168-191.
20. Онищенко А.М. Теоретичні та практичні дослідження ресурсу асфальтобетонного покриття на залізобетонних транспортних спорудах: монографія/ А.М. Онищенко, М.П. Кузьмінець, В.Ф. невінгловський, М.В. Гаркуша. – К.: НТУ, 2015. – 324 с.
21. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. дорожній одяг нежорсткого типу. Відомчі будівельні норми України. Київ. Укравтодор. – 153 с.
22. Лучко Й.Й. Мости: конструкції та надійність /Й.Й. Лучко, П.М. Коваль, М.М. Корнієв, А.І. Лантух-Лященко, М.Р. Хархаліс /за ред. В.В. Панасюка і Й.Й. Лучка. – Львів: Каменяр, 2005. - /Нац. академія наук України. Фіз.мех. ін.-т ім. Г.В. карпенка. Довідник/. 989 с.
23. Експлуатація і реконструкція мостів / Страхова Н.Є., Голубев В.О., Ковальов П.М., Тодіріка В.В. – 2-е вид., випр./за редакцією А.І. Лантуха-Лященко / – К., 2002. – 408 с.
24. Янчук Л.Л. Прогнозування технічного стану залізобетонних елементів транспортних споруд на автомобільних дорогах. Дис. кан. техн. наук.: 05.22.11 - К 2016.-166 с.
25. Онищенко А. М. Оцінка надійності при прогнозуванні величини колії в асфальтобетонному покритті на транспортних спорудах / А. М. Онищенко, // Управління проектами, системний аналіз і логістика – К.:НТУ – 2015. – Вип. 15. – С. 119-128.
26. Гурман В.Е. Теорія вероятности и математическая статистика. – М.: Высшая школа. – 1972. – 368 с.
27. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятности. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.

Рецензенти:

Жданюк В.К., д-р техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.
Золотарьов В.О., д-р техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Reviewers:

Zhdaniuk V.K., Dr. Tech. Sci., Kharkiv National Automobile and Highway University.
Zolotarev V.O., Dr. Tech. Sci., Kharkiv National Automobile and Highway University.

Стаття надійшла до редакції: **22.08.2016 р.**