

УДК 625.7/.8

Онищенко А.М., канд. техн. наук.

ТЕОРІЯ КОЛІЄУТВОРЕННЯ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ НА АВТОДОРОЖНІХ МОСТАХ

Анотація. В статті наведено результати розрахунку математичної моделі та отримано рівняння з прогнозування колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах з урахуванням різної інтенсивності транспортних засобів та дії високої температури.

Ключові слова: колієутворення, асфальтобетонне покриття, автодорожній міст, модель.

Аннотация. В статье приведены результаты расчета математической модели и получено уравнение по прогнозированию колеи в асфальтобетонном покрытии на автодорожных мостах с учетом различной интенсивности транспортных средств и воздействия высокой температуры.

Ключевые слова: колееобразование, асфальтобетонное покрытие, автодорожный мост, модель.

Abstract. The article presents the results of the calculation of the mathematical model and an equation of the forecasting track in asphalt pavement on road bridges considering different intensities vehicles and high temperatures.

Keywords: rutting, asphalt pavement, road bridge, model.

Постановка проблеми. Автодорожні мости є невід'ємною складовою мережі автомобільних доріг транспортної інфраструктури України. Транспортно-експлуатаційний стан переважно більшості, автодорожніх мостів не відповідає сучасним вимогам і потребує поліпшення з урахуванням соціально-економічних потреб держави відповідно до розпорядження КМУ [1].

Останнім часом все частіше постає нагальна проблема у запобіганні виникнення колії в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах. Ця проблема полягає в тому, що автодорожні мости перебувають у такому транспортно-експлуатаційному стані, за якого не можуть бути повною мірою

забезпечені швидке, комфортне, економічне та безпечне перевезення пасажирів і вантажів, розвиток транзитних перевезень, подальший соціально-економічний розвиток держави та її інтеграція до європейської спільноти.

Існуючі теоретичні підходи щодо вирішення методів запобігання колії в асфальтобетонному покритті на мостах не в повній мірі враховується вплив різної інтенсивності руху великовагових транспортних засобів та високої температури. Тому постала проблема в розробці теорії колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах.

Наукова проблема полягає у створенні теоретичних основ розрахунку асфальтобетонного покриття автодорожніх мостів з максимальною колієстійкістю, за рахунок вирішення протиріч між зростаючими значеннями навантажень та інтенсивності дії пневматичних коліс великовагових транспортних засобів при спільній дії високої температури покриття та величини формування колії для підвищення довговічності покриття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Великий вклад з розв'язку проблем деформування та колієутворення в ґрунтах дорожніх одягів від дії коліс транспорту та режимів їх роботи внесли такі вчені як: А.С. Александров, Г.М. Анісімов, І.О. Барашков, І.М. Бартенєв, О.М. Бурмистрова, А.Ю. К. Джонсон, Ішлінський, Д.Д. Івлєв, І.Р. Шегельман, Б.С. Радовський, І.А.Золотарь, А.І. Нікіфорова, В.П. Матуа, В.М. Меньшиков, М.М. Овчиников, М.Я.Хархута, В.Б. Фадєєв, М. О. Цитович [2-11] та інші дослідники. Аналіз цих робіт показав, що на даний час математичні моделі з використанням реологічних основ механіки ґрунтів дуже складні, зв'язані з його показниками, які визначаються в лабораторних умовах, в такому випадку авторами в своїх роботах [3-5, 8] запропоновано спрощені математичні моделі колієутворення в ґрунті дорожнього одягу від дії жорсткого та пневматичного колеса. В даних моделях одночасно не враховується різний час дії навантаження та температура. З урахуванням даних зауважень таку модель колієутворення можна застосувати для асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах з відповідним удосконаленням.

Як відомо сукупність експериментальних і теоретичних досліджень, щодо пружно-пластичного деформування матеріалів в умовах прикладення повторних навантажень показує, що не існує універсальної теорії оцінки

деформаційної стійкості матеріалів. Різні підходи, які використовуються для вирішення цієї задачі свідчать лише про відсутність єдиного розуміння щодо прогнозування поведінки в реономних матеріалах і середовищах. Тому розробка відповідних методологічних принципів і математико-теоретичних розробок є наразі актуальною задачею.

Зрозуміло, що розробка методу прогнозування пружно-пластичного деформування покриттів дорожнього одягу в умовах прикладення повторних навантажень не виконується з "чистого листа", а використовує те найкраще, що існує донині. Зокрема в даному дослідженні, знайшла своє місце теорія пристосованості [13-17], яка описує реологічну поведінку пружно-пластичних деформацій в умовах напружено-деформованого стану, що мають циклічну природу. Розробки, яких впливають з цієї теорії можна з успіхом використати для оцінки пружнов'язкої деформації зсуву, для розрахунку головних осьових деформацій. Зокрема, рівноважну пластичну деформацію можливо представити складовими із миттєвої пластичної деформації і деформації пластичної післядії [17]:

$$\gamma_t = \gamma_{\text{ПР}} + \gamma_{\text{ПВ}} + \gamma_{\text{ВП}}, \quad (1)$$

де γ_t - індекси деформації: t - повна, $\gamma_{\text{ПР}}$ - пружна, $\gamma_{\text{ПВ}}$ - пружнов'язка, $\gamma_{\text{ВП}}$ - в'язкопластична.

Вибір функції релаксації для отримання $\gamma_{\text{ПВ}}$ лімітується властивостями матеріалу в якій перебуває дослідницька модель. Функціонально модель в'язкопружності описується положеннями добре відомої у фізиці і механіці теорії термопружності. Відмінність моделі в'язкопружності від теорії термопружності полягає в додаванні фіктивних сил навантаженні і релаксації до відповідних існуючих зовнішніх сил навантаження і релаксації.

Зазвичай при розгляді в'язко-пружності середовища розглядають дві прості моделі [19, 20]: - модель запізнення; - модель сталої повзучості.

Власне для врахування пластичної компоненти загальної деформації (1) необхідно функцію релаксації доповнювати пластичним модулем c , який описував би пластичну поведінку деформації. Оскільки його величина постійна для конкретного матеріалу, то внесення множника c врахує гістерезисний хід деформаційної релаксації при сталих температурних умовах. Тому, умовно вважаємо, що перехід від моделі в'язкопружності до в'язкопружно-пластичності

при чисельних розрахунках здійснюватиметься з врахуванням комплексної функції релаксації і згаданого модуля пластичності.

Але, багато задач пов'язаних із вивченням пластично-деформованих тіл не мають аналітичного рішення в замкнутій формі. Тому для їх вирішення набули поширення чисельні методи (послідовні наближення, рекурентні обчислення). Всі вони спрямовані на відшукування розподілу нормальних і дотичних напружень (деформацій), які задовольняють заданим граничним умовам на поверхні розділу, всередині і поза області контакту, для випадку плоскої деформації і для осесиметричної задач, коли форма області контакту відома.

Як правило, шукане рівняння представлене розподілом функції у вигляді нескінченного ряду функції з відомими коефіцієнтами. Потім ряд функцій скорочується для наближеної відповідності граничних умов. Власне і тому задача і носить назву послідовних наближень. Вже згадувані фіктивні сили навантаженні і функція релаксації розраховується до попереднього циклу обчислень, і тому по відомому вирішенню відповідної задачі пружності можлива побудова рішення в'язкопружної задачі у рекурентному вигляді.

Традиційно розрахунок деформаційних осадок виконується заміною моделі лінійно-деформованого тіла на білінійну залежність пружно-пластичної деформації від головних компонент напружень, або інтегральним алгоритмам для розрахунку прогинів як наслідок вертикальних деформацій - моделі, що використовують різні нелінійні залежності пластичної деформації від головних напружень. Отримання окремих компонент модуля деформації можливе за моделлю Хархути Н.Я. [11, 21], в якій відносна незворотна деформація визначається шляхом підсумовування двох складових. Перша компонента є незворотною деформацією, яка розвивається з великою швидкістю, а інша - незворотна деформація відбувається повільніше. Незворотну деформацію знаходять як суму умовно-миттєвої і в'язкопластичної деформацій [21]. Можливі і інші підходи, в яких використовується емпіричні закономірності. Натомість А.М.Богуславським, Л.А.Богуславською [21, 22] розроблено узагальнену модель асфальтобетону, в якій загальна деформація визначається формулою:

$$\varepsilon_{zd} = \varepsilon_{zn} + \varepsilon_{zs} = \frac{\sigma_z}{\eta_{\alpha}} t + \frac{\sigma_z}{E_0} \frac{(1 + P_1 T_p) P_2}{P_1 - P_2} \exp[-t P_1] + \frac{\sigma_z}{E_0} \frac{(1 + P_2 T_p) P_2}{P_1 - P_2} \exp[-t P_2], \quad (2)$$

де індекси n та v позначають відповідну пластичну і в'язку компоненту загальної δ деформації, c - до властивості зруйнованої структури.

Для умов ущільнення ґрунтів з пружно-в'язкою реологією отримано асимптотичне значення глибини колії у вигляді квадратичного рівняння [4, 5, 6, 8]:

$$p - cx - c_x x^2 = 0, \quad (3)$$

де P - тиск на ґрунт;

c, c_x, μ - параметри, які описують утворення колії в пружно-в'язких ґрунтах;

x - глибина осадки.

Інтегрування рівняння приводить до виразу [4, 5, 8], який справедливий, при певних вихідних умовах, і для реономних матеріалів типу асфальтобетон:

$$p = cx + \mu c \frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

де c – постійна Герстнера;

μ - коефіцієнт в'язкості.

Теоретичне рішення задачі пластичного деформування дискретного матеріалу при впливі повторних навантажень показало що, в умовах зміцнення матеріалу, відбувається зменшення від релаксованої частини напружень, а відповідно, затухання (зменшення) в'язко-пластичної деформації при кожному наступному впливі. Всі ці положення відповідають умовам теорії успадкованої повзучості. Її формалізація, зазвичай здійснюється через показник функціоналу. Для ґрунту, зокрема, використовується розповсюджена степенева залежність Вінклара-Герстнера-Бернштейна:

$$q = ch^\mu, \quad (5)$$

де c і μ - параметри ґрунту;

розмірність q кгм/см², що відповідає питомій вазі ґрунту.

Приріст глибини обраховується:

$$h = 0,001 \left(\frac{q}{c} \right)^{\frac{1}{\mu}} \quad (6)$$

Якщо дещо ускладнити задачу і ввести умови для пружно-в'язко-пластичної деформації в лінійній моделі, то:

$$\sigma + \tau \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \sigma_T + E\varepsilon + \tau \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (7)$$

де σ - напруження;

E - модуль пружності;

μ - в'язкість, час релаксації $\tau \frac{\partial \sigma}{\partial t}$;

σ_T - граничне напруження починаючи з якого починаються пружно-в'язкі деформації;

ε - деформації;

t – час.

Використовуючи явища залежності коефіцієнту в'язкості від осадки, то нелінійне рівняння [3-5, 8] модифікується у наступний вигляд:

$$p = p_T + c \cdot x + (\mu_0 + \mu x) \frac{dx}{dt}, \quad (8)$$

Власне на рішенні цього рівняння досліджуються в'язкопружні матеріали [3]. Отримується узагальнена осадка x' , і узагальненого часу t' :

$$t' = c^2 \frac{t}{\mu p}, \quad (9)$$

$$x' = c \frac{x}{p}. \quad (10)$$

Рівняння в'язкої деформації:

$$p = \mu_0 \frac{dx}{dt}, \quad (11)$$

звідки параметр

$$c = \frac{p}{x_{\infty}}. \quad (12)$$

Як ми бачимо, функціональне ядро залежностей залишається однорідним як при розгляді ґрунту, так і інших реономних матеріалів, що дозволяє переносити розроблені теоретичні залежності із ґрунтових середовищ на в'язко-пружні тіла типу асфальтобетон. З позицій реологічної теорії ґрунтів в загальному випадку можна розглядати як пружно-в'язко-пластичне

середовище, в якій не лінійність обумовлена зміною інтенсивності зростання деформації із збільшенням напружень, пружність проявляється в наявності відновлювальних деформацій, в'язкість характеризує розвиток деформацій у часі, а пластичність визначає розвиток незворотних деформацій.

Рівняння дискретного характеру (при n-кратному проході) утворення осадки колії для в'язко-пружних ґрунтів. Рівняння утворення колії при кочення колеса з жорстким ободом матиме дещо простіший вигляд, оскільки у функціональному ядрі відсутня частина, що відповідає за деформацію самого колеса [3-5].

$$p = c \left(h_N - \frac{\xi^2}{2R} \right) + \mu \left(h_N - \frac{\xi^2}{2R} \right) \frac{\xi v}{R}, \quad (13)$$

де h_N - глибина колії після N проходів колеса;

ξ - відстань від якої-небудь точки поверхні дотику колеса з поверхнею до вертикальної площини через вісь колеса;

R – радіус колеса;

v - швидкість кочення.

Рівняння колієутворення для пружних ґрунтів теж значно простіше, оскільки немає потреби враховувати в'язкість ґрунту.

$$\frac{P}{b} = c \left(2R \Delta h_N \left(h_N + \frac{2}{3} \Delta h_N \right) \right), \quad (14)$$

де $\Delta h_N = h_N - h_{N-1}$, P – навантаження.

Рівняння колієутворення при лінійній в'язко-пружній реологічній моделі ґрунту, набуває вигляд:

$$B = c h_N a_n - c \frac{a_N^3}{6R} + \frac{1}{2} \mu_0 a_N^3 \frac{v}{R}, \quad (15)$$

де $B = P \left[b(2R)^{1/2} \right]^{-1}$, а – довжина проекції на горизонтальну площину плями дотику колеса з поверхнею.

Рівняння колієутворення у в'язко-пластичних ґрунтах [3]:

$$\frac{P}{b} = p [2R(h_N - h_{N-1})]^{1/2} + \mu_0 v (h_N - h_{N-1}) + \frac{1}{2} \mu v (h_N - h_{N-1})^2; \quad (2.16)$$

теж саме рівняння в умовах великих швидкостей кочення :

$$\frac{P}{b} = \mu_0 v (h_N - h_{N-1}) - \frac{1}{2} \mu v (h_N - h_{N-1})^2. \quad (2.17)$$

Наведені рівняння формування колії в середовищах із відмінною реологією, типом колеса і умовах кочення показують збіжний характер

формування колії. За схожим принципом працює методика Лазарєва В.В. [23]. Вона дозволяє для визначення параметрів кочення пневматика використовувати будь-яку відому залежність між навантаженням і нормальною осадкою в покритті. Вивід рівняння рівноваги вертикальних сил, які діють на колесо при його коченні містить чотири невідомих параметри (один з яких глибина колії). Рішення рівнянь виконується методом ітерацій задаючи крок зміни глибини доволі малим. Критерій припинення обчислень вибирається з огляду досягнення рівності до величини нормального навантаження на плоску зону контакту колеса з покриттям.

Критичний аналіз існуючих моделей врахування повторюваності навантажень при розрахунку пластичних деформацій показав спільну рису всіх досліджених процесів. Якщо на матеріал спочатку впливати невеликими напруженнями, викликаючи ущільнення, а потім прикласти більш високі напруження, то ефект від високого рівня напруженого стану буде не такий, яким би він був би у випадку прикладення високих напружень [2]. При дії навантаження, залишкові напруження формуються дуже швидко і усталений стан досягається за 4 або 5 циклів. Із зменшенням часу впливу навантаження вплив в'язко-пластичної деформації зменшується, а вплив миттєвої пластичної деформації, навпаки, збільшується. При рівності часу взаємодії тривалого навантаження і сумарної тривалості циклічних навантажень пластична деформація, яка накопичується під час багатократного впливу, більша ніж деформація повзучості.

Повний тензор деформацій. Тензорний опис процесів термов'язкопружної в умовах зв'язку напруження і деформацій і граничних умов і відношення Коші:

$$\begin{aligned}
 s_{ij} &= 2G(T) \left(\varphi_1(\varepsilon_u, T) \varepsilon_{ij} - \int_0^t R(t-\tau, T) f(\varepsilon_u, T) \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau \right) \\
 \sigma &= 3K(T)(\varepsilon - \alpha T) \\
 \sigma_{ij,i} + \rho F_i &= 0 \\
 2\varepsilon_{ij} &= u_{i,j} + u_{j,i} \\
 \sigma_{ij} l_j &= R_i \text{ на } S_\sigma \\
 u_i &= u_{0i}(x_i) \text{ на } S_u
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Після підстановки перетворень матимемо:

$$\begin{aligned}
 s_{ij} &= 2G(T) \left((1 - \omega(\varepsilon_u, T)) \varepsilon_{ij} - \int_0^t R(t-\tau, T) (1 - \omega_1(\varepsilon_u, T)) \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau \right) \\
 \sigma &= 3K(T)(\varepsilon - \alpha T)
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

У разі коли $\omega = \omega_1 = 0$ рівняння (19) є основними, в якому описуються лінійні термов'язкопружні властивості матеріалів.

Коли навантаження перевищує межу пристосування, варто очікувати ортогонального пластичного зсуву в при поверхневих елементах покриття. При циклічному коченні пластичні деформації накопичуються таким чином, що поверхневі шари зсуваються "наперед", тобто в напрямку течії, відносно більш глибоко розташованих шарів. При цьому компоненти напружень в елементі на деякій глибині можуть бути пораховані, так як напруження переходять через деформовану область.

При такому підході умови сумісності деформацій і співвідношення між напруженнями і деформаціями виконуються точно, але рівняння рівноваги задовольняються наближено. Просторово, уявляється, що пластична зона перебуває під поверхнею і повністю оточена пружним матеріалом.

Повний числовий аналіз дозволяє відслідковувати зміни всіх компонент напружень в кожній точці під поверхнею. Але суттєві компоненти напружень і деформацій - τ_{zx} і γ_{zx} . Після циклу навантаження і розвантаження елемент тіла має приріст від'ємних залишкових деформацій (γ_{zx})г. Переміщення поверхні за один цикл навантаження отримується інтегруванням (γ_{zx})г по глибині пластично деформованого шару. При першому циклі пластична зона розповсюджується на глибину, де пружні напруження, які могли б реалізовуватися, перевищували межу пластичності. При усталеному режимі неперервні пластичні деформації обмежені більш вузьким шаром [6].

Таким чином, аналіз тензору напружень, що складається із компонентів стиску і зсуву, показує, що головними є його зсувні компоненти τ_{zx} та γ_{zx} і тому механізм накопичення пластичних деформацій може бути виявлений із більш простої моделі, яка розглядає тільки ці компоненти. Власне тому, проведення розрахунку в'язко-пружної деформації здійснюється по головним осям [20], що дозволяє значно спростити розрахунки і відмовитися від складного розв'язку повного тензору напружень.

Теорія ймовірності в колієутворенні. У процесі експлуатації асфальтобетонних покриттів відбувається поступове зниження їх міцносних властивостей, що зокрема проявляється в накопиченні незворотних деформацій, формування колії під дією навантажень і погодно-кліматичних факторів.

Важливим елементом наукових основ матеріалознавства і технології будівництва і надійної експлуатації дорожніх покриттів є прогнозування втомлюваності асфальтобетону з врахуванням процесів їх деградації. Зокрема, це повністю стосується утворенню колій в асфальтобетонних покриттях на автодорожніх мостах. Для раціонального прогнозування цих процесів повинно враховуватися неоднорідність, фізична нелінійність багатьох властивостей асфальтобетону. Водночас прогнозування колій повинно ґрунтуватися на аналізі експериментальних даних і спеціально розроблених теоретичних положень [3, 8, 24, 25].

Основна частина

Для розрахунку колієстійкості асфальтобетонного покриття на мостах необхідно отримати розрахункову модель та теоретичне рішення, яке дозволить прогнозувати колієутворення в покритті при дії навантаження автотранспортних засобів та температури. Крім того, модель колієстійкості повинна базуватись на моделі граничного стану, що прогнозує утворення колії в покритті від дії навантаження і температури.

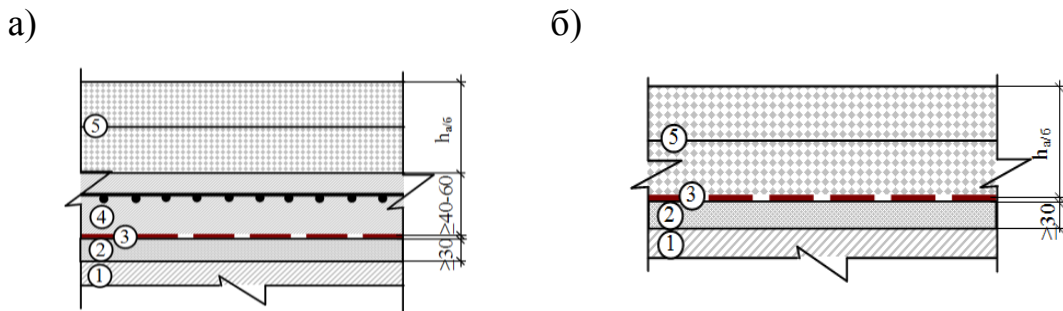
З метою вирішення цих задач в даному розділі розглядаються основні розрахункові схеми роботи асфальтобетонного покриття на автодорожніх мостах від дії транспорту та температури, які дозволять розробити математичні моделі для розрахунку колієутворення та теоретичне рішення для оцінки колієстійкості покриття на мостах. При цьому в детермінованій постановці використовується феноменологічний підхід, а асфальтобетон розглядається як квазіоднорідний ізотропний матеріал.

При виборі розрахункової схеми роботи асфальтобетонного покриття на мостах з точки зору його колієстійкості виходили з найбільш несприятливих для нього умов появи колійності при підвищенні температури. Приймали до уваги дані багатьох дослідників, та власних досліджень [26], про причини виникнення колійності в асфальтобетонному покритті на мостах.

Для розрахунку асфальтобетонного покриття на мостах приймається два типи конструкцій їздового полотна, які широко застосовуються [27-29], а саме:

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

II - Покриття, влаштовується по залізобетонній плиті проїзної частини і не маюча захисного шару, яка складається з трьох конструктивних шарів (рис. 1 б)).



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

Рисунок 1 – Конструкції покриття на автодорожніх мостах

В той же час одним із найбільш поширених питань на практиці є таке, коли асфальтобетонне покриття працює сумісно із залізобетонною прогоною 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 колійності та зсувів на поверхні асфальтобетону.

У випадку роботи асфальтобетонного покриття на залізобетонній прогоновій будові за розрахункову схему доцільно прийняти двошарову плиту (рис. 1), верхній шар якої (асфальтобетонне покриття) має функцію релаксації, яка залежить від часу дії навантаження, температури і виду асфальтобетону $\Psi(t, T(t))$ та в'язкості бітумного в'язучого, а нижній (залізобетонна прогонова будова) має модуль пружності не змінний. 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 зв'язку між асфальтобетонним покриттям і основою із залізобетону, розглядаються найбільш вірогідні варіанти такої роботи з урахуванням різних умов експлуатації покриття на мостах.

Варіант 1: асфальтобетонне покриття за рахунок надійної колієстійкості (адгезії), яке міцно зчеплене з основою із залізобетонною прогоною будовою (рис. 2) при підвищенні температури.

Варіант 2: асфальтобетонне покриття при повній адгезії зв'язане з другим шаром асфальтобетону, яке міцно зчеплене з другим шаром, а другий шар

асфальтобетону міцно зчеплений з основою із залізобетону при підвищені температури(рис. 2).

В якості моделі для розрахунку колійності в асфальтобетонному покритті на мостах приймаємо за основу вищенаведені розрахункові схеми (рис. 1 а, б). У відповідності запропонованої гіпотези розглядається питання про накопичення залишкових деформацій вигляді колії при русі по асфальтобетонному покритті, що влаштоване на проїзній частині мосту пневматичного колеса при різному часі дії навантаженні і високої температури. При побудові теорії кочення по асфальтобетонному покриттю колеса з пневматичною шиною необхідно враховувати деформацію самого пневматика, як запропоновано в роботах [6, 8]. Ця задача є достатньо складною навіть після введення спрощуючих припущень. В якості моделі кочення пневматичного колеса по в'язко–пружно-пластичному асфальтобетонному покритті, що влаштоване на мосту, враховуючи співвідношення розмірів конструкції, приймаємо модель пластини в якості асфальтобетонного покриття, яке зчеплене з залізобетонною основою відповідно до моделей, що наведені на рис. 2 та рис. 3.

В даній розрахунковій моделі (рис. 2) міцність зчеплення забезпечується умовою коефіцієнта колієстійкості $K_k > 1$.

Прийняті припущення зводяться до наступного: 1 – закон деформування асфальтобетону, що нижче описаний; 2 – деформація пневматика в кожній точці рахується пропорційною тиску пневматика на асфальтобетонне покриття; 3 – поверхня пневматика приймається циліндричною; 4 –пропонуються застосувати коефіцієнт колієстійкості K_k , який дозволяє враховувати умову міцності зчеплення асфальтоного покриття з основою мосту і встановлюється експериментально

З урахуванням вищенаведених припущень закони деформування ґрунту [8], може бути використані для створення прогностичної моделі колієутворення для асфальтобетону.

Питання про колієутворення тісно пов'язане з механічними властивостями асфальтобетону, що знаходить підтвердження в багатьох роботах [2, 24, 26, 30-34].

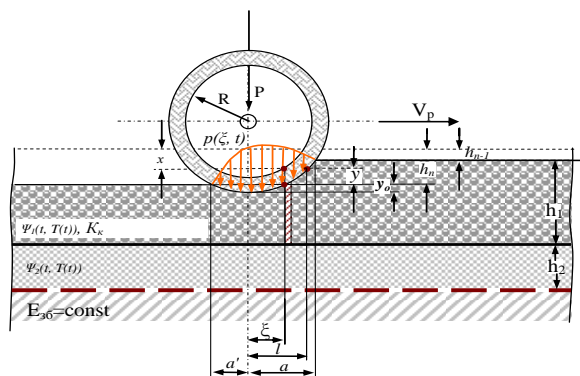
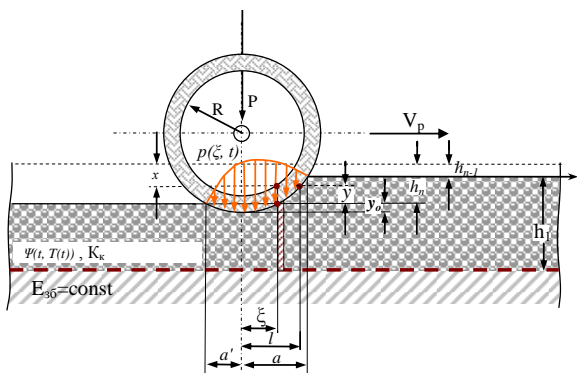


Рисунок 2 – Модель кочення пневматичного колеса по асфальтобетонному покритті, яке міцно зчеплене з основою із залізобетону мосту при підвищені температури

Рисунок 3 – Модель кочення пневматичного колеса по асфальтобетонному покритті, яке міцно зчеплене з другим шаром, а другий шар асфальтобетону міцно зчеплений з основою із залізобетону при підвищені температури

Не дивлячись на те, що в механіці ґрунтів та асфальтобетонів присвячено велика кількість досліджень, ми не маємо до теперішнього часу достатньо простих і задовільних законів, які описують деформацію асфальтобетону при дії навантаження. Так наприклад, закон Герстнера (20) і закон Прандля (21), хоча і являються доволі простими, але не описують деформації асфальтобетону в часі і від температури:

$$p = cx, \quad (20)$$

$$p = k = const, \quad (21)$$

де p – питомий тиск на асфальтобетонне покриття;

x – переміщення асфальтобетону;

c – коефіцієнт пропорційності;

k – пластична постійна.

Як відомо, якщо штамп давить з деякою силою на асфальтобетон, то деформація асфальтобетону змінюється на протязі часу. При цьому вдавлювання штаму в асфальтобетонне покриття відбувається більш інтенсивно, ніж більший тиск на асфальтобетон. Якщо тиск постійний і не дуже

великий, то переміщення асфальтобетону під штампом на протязі часу прагне як зазвичай до деякої границі. Приймається в подальшому, що граничні значення переміщення пропорційні відповідній силі тиску, тобто, що 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 (4) [8]. 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 (4) замінюється умовою постійного переміщення:

$$x = x_1 \quad (p < cx, x < \delta), \quad (22)$$

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 (4) з початковою залежністю $x = x_1$.

Якщо $x > \delta$, то при достатньо великих деформаціях асфальтобетону, залежність (4) замінюється наступними виразом:

$$p = k + v \frac{dx}{dt}, \quad k = c\delta, \quad v = \mu\delta. \quad (23)$$

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

$$x = const \quad \text{при} \quad p < k, \quad x > \delta. \quad (24)$$

Пропонується наглядна механічна модель [8], деформування якої слідує вказаним вище закономірностям. На рис. 4 наведено розподілення областей значень p і x , відповідаючи закономірностям (22 – 24).

Розглянемо в якості прикладу деформацію асфальтобетону під дією постійного навантаження $p = p_0$.

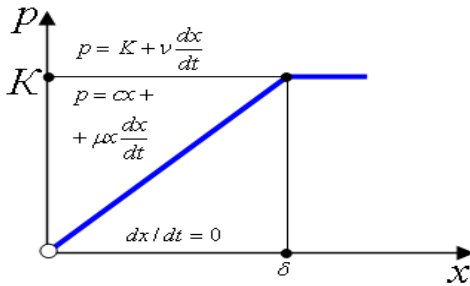


Рисунок 4 – Модель розподілення областей значень p і x , відповідаючи закономірностям (22 - 31)

Якщо $p_0 < \kappa$, то звертаючись до диференційного співвідношення (4), що наведено в [8] отримаємо

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p_0 - cx}{\mu x}, \quad (25)$$

Звідки після розділення перемінних і інтегрування маємо:

$$\frac{ct}{\mu} = \frac{p_0}{c} \ln \frac{p_0}{p_0 - cx} - x. \quad (26)$$

Постійна інтегрування визначена із умови $x=0$ при $t=0$. При $t \rightarrow \infty$ не складно отримати з співвідношення (26) вираз (20).

Таким чином, для граничних навантажень виявляється справедливим закон Герстнера. При дуже малих значеннях t , а відповідно і малих x , тобто на початку процесу, маємо:

$$\frac{ct}{\mu} = -\frac{p_0}{c} \ln\left(1 - \frac{cx}{p_0}\right) - x \approx -\frac{p_0}{c} \cdot \left(-\frac{cx}{p_0} + \frac{c^2 \cdot x^2}{p_0^2}\right) - x = \frac{cx^2}{2p_0}, \quad (27)$$

$$x \approx \sqrt{2p_0 \cdot t / \mu}. \quad (28)$$

Характерно, що вираз для переміщення асфальтобетону x не залежить в цьому випадку від коефіцієнта c . Це явище можна пояснити, якщо безпосередньо звернутись до виразу (4) очевидно, що при малих x повинна бути велика швидкість зміни переміщення dx/dt (25) і відповідно, другий член співвідношення (4) повинен бути більше першого.

Таким чином, при малих x :

$$p \approx \mu \cdot x \frac{dx}{dt}, \quad (29)$$

що і дає після відповідних інтегрувань [8] формула (28).

Якщо ввести безрозмірні перемінні з (9) і (10) то співвідношення (26) прийме вид:

$$t' = -\ln(1 - x') - x'. \quad (30)$$

Графік залежності x' від t' наведений на рис. 5 а. При $t \rightarrow \infty$ $x \rightarrow p_0/c$.

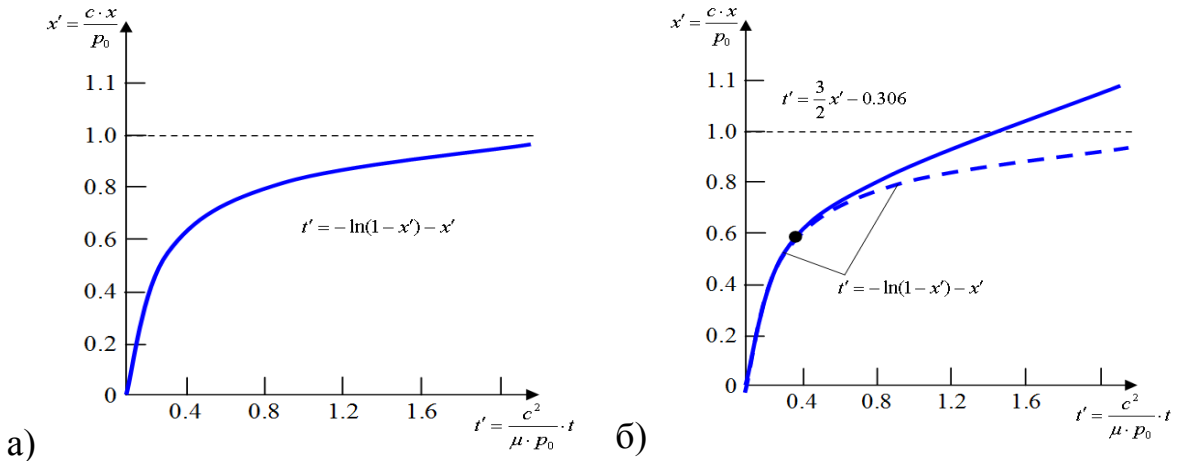


Рисунок 5 – Залежність безрозмірних параметрів x' від t'

Якщо виявиться, що $p_0/c > \delta$, то вираз отриманий раніше, буде справедливий тільки для мити t' , при якому переміщення x досягне значення δ тому маємо:

$$t' = \frac{\mu \cdot p_0}{c^2} \ln \frac{p_0}{p_0 - c \cdot \delta} - \frac{\mu}{c} \delta \quad (2.31)$$

При $x > \delta$ диференційне співвідношення (4) повинне бути замінене співвідношенням (23), із якого при $p = p_0 = const$ маємо, що

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p_0 - \kappa}{v} = const \quad (32)$$

Тобто, після досягнення переміщення x характерно значення δ подальше занурення штампу буде відбуватись рівномірно. Таким чином, при $x \leq \delta$ і відповідно $x' \leq c\delta/p_0$ можемо користуватись для визначення закону зміни осадки в часі графічним зображенням (рис. 2.16. а), а в подальшому замінити його прямою, з'єднуютья з графіком в точці абсцисою. На рис. 5. б. представлена подібна крива для випадку, коли рівняння згаданої прямої має вид $t' = 3x'/2 - 0.306$.

Пружна лінійна модель колієутворення для врахування пружної компоненти деформації, проявленої у вигляді осадки покриття, спочатку використаємо найпростіший випадок - лінійну залежність між цими параметрами. Геометричне співвідношення, що пов'язує осадку x якої-небудь точки покриття на відстані ξ від вертикальної площини, що проходить через вісь колеса має вигляд (20) та:

$$p = \beta y, \quad (33)$$

де y - деформація пневматика.

Застосовна тут диференціальна форма закону Герстнера [3, 8], в якій допускається пропорційність між граничними значеннями осадки і сили тиску (4).

У першому наближенні можна говорити про два динамічно-реологічні стани процесу кочення пневматика. Перший, умовно можна назвати "доущільнення" в якому справедливий вираз (4) для умови $c \rightarrow \delta$ і $\frac{dx}{dt} > 0$. У цьому стані процес осадки прогресивно триває, доки x не зрівняється із δ - деякою граничною величиною осадки асфальтобетонного покриття.

Власне отримання величини c можливе із розгляду деформаційної моделі під дією постійного навантаження $p=p_0$.

У цьому випадку швидкість осадки описується:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p_0 - cx}{\mu x}. \quad (34)$$

Після інтегрування по часу і розділення змінних:

$$\frac{ct}{\mu} = \frac{p_0}{c} \ln \frac{p_0}{p_0 - cx} - x. \quad (35)$$

Якщо покласти $x=0$ і $t=0$, то маємо вираз близький до (ф. 2.4):

$$p_0 = cx. \quad (36)$$

Якщо покласти $x \rightarrow 0$ і $t \rightarrow 0$:

$$\frac{ct}{\mu} = \frac{p_0}{c} \ln \left(1 - \frac{cx}{p_0} \right) - x \approx -\frac{p_0}{c} \left(-\frac{cx}{p_0} + \frac{c^2 x^2}{p_0^2} \right) - x = \frac{cx^2}{2p_0}. \quad (37)$$

Таким чином з (ф. 2.98):

$$x \approx \sqrt{\frac{2p_0 t}{\mu}}. \quad (38)$$

Як наслідок формули (38), при $x \rightarrow 0$ повинна бути велика швидкість зміни осадки $\frac{dx}{dt}$ і тоді вираз тиску набуває вигляду:

$$p \approx \mu x \frac{dx}{dt}. \quad (39)$$

Порівняння формули (4) і (39) вказує на те, що при умові $x \rightarrow 0$ 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 [8].

Деформація покриття почнеться відразу же з моменту контакту його з колесом, тобто у точці де $\xi=a$ і закінчиться при $\xi=0$ (рис. 6).

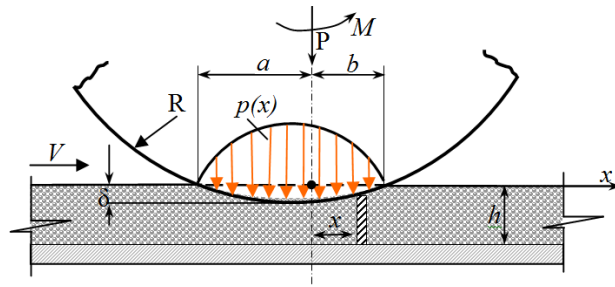


Рисунок 6 - Кочення жорсткого циліндру по в'язкопружній основі [6]

Співвідношення між геометричним місцем точок області контакту пневматика з механічними характеристиками і тиском [3-6, 8]:

$$y + x = \frac{a^2}{2R} - \frac{\xi^2}{2R}. \quad (40)$$

Вираз (40) в термінах тиску:

$$\left(\frac{1}{c} + \frac{1}{\beta}\right)p = \frac{a^2}{2R} - \frac{\xi^2}{2R}. \quad (41)$$

Початкова деформація пневматика в точці проєкції осі на поверхню ($\xi=0$):

$$y_0 = \frac{1}{\beta} p_0 = \frac{c}{c + \beta} \frac{a^2}{2R}. \quad (42)$$

Сумарна початкова деформація пневматика разом із глибиною осадки таким чином становитиме:

$$h + y_0 = \frac{a^2}{2R}. \quad (43)$$

Після перетворення величина питомого параметру встановлюється:

$$h = \frac{a^2}{2R} - \frac{a'^2}{2R}. \quad (44)$$

де a' - у задній частині області контакту.

Як ми бачимо для пошуку глибини осадки (провідного параметру, що формує колю) 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' .

Для конвертація рівняння і отримання доступних параметричних показників необхідно тиск колеса визначається через серію послідовних перетворень із використанням інтегрування окремо по частинам області контакту [3-6, 8]:

$$\frac{1}{b}P = \int_{-a'}^0 pd\xi + \int_0^a pd\xi. \quad (45)$$

Після підстановки (43) і інтегрування:

$$\frac{1}{b}P = \beta \frac{-a'^3}{3R} + \frac{c\beta}{c+\beta} \frac{a^3}{3R}. \quad (46)$$

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

$$\frac{1}{b}P = \beta \frac{a^3}{3R} + \frac{c\beta}{c+\beta} \left(1 + \sqrt{\frac{c\beta}{c+\beta}}\right). \quad (47)$$

Вже в виразі (47) 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 [8]: використовуємо вираз (45) із заміною відповідного блоку у (47):

$$h = \frac{a^2}{2R} - \frac{a'^2}{2R} = \frac{c\beta}{c+\beta} \frac{a^3}{3R}. \quad (48)$$

$$h = \frac{1}{2}(c\beta R)^{-\frac{1}{3}} \left[\left(\frac{3P}{b} \sqrt{\frac{c+\beta}{c\beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (49)$$

Граничні умови, при наступних проходах пневматика початок деформації поверхні буде все більше і більше наближатися до вертикальної площини і тому справедливі наступні вирази [8].

При врахуванні величини тиску на поверхню покриття, який здатен до пружно-пластичної деформації:

$$p_0 = \beta y_0 = \sqrt[3]{\frac{9\beta P^2}{32b^2R}} = ch_{\max}, \quad (50)$$

звідки можна перейти до граничної глибини колії h_{\max} :

$$h_{\max} = \frac{1}{c} \sqrt[3]{\frac{9\beta P^2}{32b^2R}}, \quad (51)$$

де h_{\max} - максимальний прогин від пружно-пластичної компоненти тиску,

p_0 - мінімальний тиск, який здатен формувати максимальну осадку поверхні,

y_0 - мінімальна деформація пневматика.

Кочення колеса по пружній поверхні викликає її деформацію, після проходження колеса настає відновлення матеріалу або релаксація [35, 36].

Для в'язкопружних матеріалів, протягом часу вимірювання, набагато більшого, ніж час релаксації, колісне навантаження (в еквіваленті) викликає незворотні пластичні деформації. Або кажуть, що такі матеріали володіють реономними властивостями. 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 [2-6, 8, 19, 35-37].

В'язкопружний матеріал має початковий динамічний відклик на навантаження з модулем $K(1+\beta)$, але вже при статичних 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 елементі у точці x дається рівністю:

$$p(x,t) = -\sigma = -\int_0^t \Psi(t-t') \frac{\partial \varepsilon(t')}{\partial t'} dt'. \quad (52)$$

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

$$p(x) = -\frac{1}{Rh} \int_{-x}^x x' \Psi(x-x') dx'. \quad (53)$$

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:

$$\Psi(t) = K \left(1 + \beta e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (54)$$

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 в динамічній фазі взаємодії і дозволяє відійти від величин навантажень використовувати значення тиску, що приводить до простішого аналітичного вирішення. Рівняння цієї моделі ґрунтується на заміні часу x і наступним інтегруванням (55).

$$p(x) = \frac{ca^2}{RH} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\xi^2}{a^2} \right) - \beta De \left(1 + \frac{\xi}{a} \right) + \beta De (1 + De) \left(1 - \exp \left(- \frac{1 + \frac{\xi}{a}}{De} \right) \right) \right], \quad (55)$$

де De - число Дебори.

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 ($\zeta_0 \ll 1$). 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 в такому випадку перебуває в значенні ($\zeta_0 \sim 1$), коли час проходження пневматиком області контакту рівне часу релаксації асфальтобетону. І як граничний випадок, при дуже високих значеннях швидкості кочення ($\zeta_0 \gg 1$), розподіл тиску і навантаження знову наближаються до випадку пружності, але вже з динамічним модулем пружної основи $K(1+\beta)$ [3, 8].

Введення у модель числа Дебори De , дозволяє її спростити шляхом скорочення обчислювальних параметрів.

Температурно залежна функція релаксації, давно відома залежність релаксаційних ефектів від температури. Збільшення температури негативним чином спричиняється на деформаційні властивості дорожнього покриття, що приводить до збільшення часу релаксації, що перевищує середній час впливу транспортного засобу. Збільшення на кожні 10 °C температури еквівалентно збільшенню транспортного потоку в 1,2 рази. Основним компонентом, що визначає температурну чутливість є органічне в'язуче.

При вивченні напружено - деформаційних характеристик пружнов'язко-пластичної моделі колієутворення, варто використовувати температурно-залежні релаксаційні функції із різними ядрами вирішення [2, 19, 35, 36, 38]. Використовуючи функцію релаксації для асфальтобетону у вигляді модифікованого степеневого закону, який дає достатньо точні результати обчислень [35, 36, 38, 39] :

$$\Psi(t) = E_{дг} + (E_{мт} - E_{дг}) \cdot \left(1 + \frac{t}{\eta}\right)^{-\lambda}, \quad (56)$$

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

$E_{мт}$ - модуль пружності миттєвий;

τ - час релаксації;

p - температурне зміщення;

Q - температурна константа;

η - нижній кут нахилу релаксаційної кривої;

λ - верхній кут нахилу релаксаційної кривої.

Це дозволить адекватно описувати розподіл напружень в тілі асфальтобетонного покриття, а отже дозволяє будувати коректні розрахункові схеми, для опису пружнов'язкого характеру взаємодії колеса з врахуванням температури правомірна температуро-часова аналогія, в якій релаксаційній функції $\Psi(t)$ ставиться у відповідність температуро-залежна релаксаційна функція $\Psi_T(t)$.

Для визначення функції релаксації матеріалу 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:

$$\Psi(t, T) = \Psi_T(\mu, T_1), \quad (57)$$

де μ - приведений час;

$$\mu = \int_0^t \frac{dt}{a_T(T)}, \quad (58)$$

де $a_T(T)$ - коефіцієнт температурно-часового зміщення, який залежить від температури (має з розмірністю $[1/^\circ\text{C}]$);

T_1 – поточна температура.

Залежність $a_T(T)$ від температури T встановлюється експериментально для кожного конкретного матеріалу. За своєю суттю коефіцієнт $a_T(T)$ являє собою зсув за шкалою $\lg t$ функції релаксації, якщо $\lg a_T = 0$, то властивості матеріалу не залежать від температури. Тобто, чим більше значення $\lg a_T$, тим сильніше змінюються властивості матеріалу зі зміною його температури.

Температурно-часовий зсув a_T в загальному випадку для асфальтобетону є нелінійною функцією від температури, що отримано з результатів експериментальних досліджень. [19, 35, 36, 38, 39].

Функцію температурно-часової аналогії описується виразом:

$$a_T(T, Q) = e^{-P_1(T-Q)}. \quad (59)$$

або перетворюючи

$$a_T(T) = \frac{1}{e^{P_1[T(t)-T_s]}}, \quad (60)$$

де P_1 – деякий експериментальний параметр з розмірністю $[1/^\circ\text{C}]$;

$T(t)$ – поточна температура;

Q, T_s – приведена температура.

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

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). З урахуванням рівняння (56) та роботи [39], після відповідних інтегрувань остаточно отримано функцію релаксації у такому вигляді:

$$\Psi_T(\mu - \mu') = E_{дг} + (E_{мт} - E_{дг}) \times \left[1 + \frac{e^{P_1(T_0+k_1 t - T_s)} \cdot (e^{-P_1 k_1 (t-t_1)})}{P_1 k_1 \eta} \right]^{-\lambda}, \quad (61)$$

де k_1 – швидкість зміни температури (охолодження нагрівня);

У вираз (61) пропонується ввести коефіцієнт $K_{\Psi_T}^{(II, T_p, III)}$, який дозволить уточнити функції релаксації асфальтобетону за рахунок penetрації (II), температури розм'якшення (T_p) та індексу penetрації (III) бітумного в'язучого за залежністю:

$$\Psi_T(t, T) = E_{дг} + (E_{мт} - E_{дг}) \times K_{\Psi_T}^{(II, T_p, III)} \times \left[1 + \frac{e^{P_1(T_0+k_1 t - T_s)} \cdot (e^{-P_1 k_1 (t-t_1)})}{P_1 k_1 \eta} \right]^{-\lambda} \quad (62)$$

де $K_{VT}^{\Psi_T}(P, T_p, III)$ - уточнюючий коефіцієнт функції релаксації асфальтобетону, який залежить від penetрації, температури розм'якшеності та індексу penetрації бітумного вяжучого і визначається за залежністю:

$$K_{VT}^{\Psi_T}(P, T_p, III) = \left(-\mathcal{G} \times \gamma \times e^{-d \times \Pi(T_p, III)} \times (g \times \Pi(T_p, III) - f) \right), \quad (63)$$

де $\mathcal{G}, \gamma, d, g, f$ - експериментальні параметри, які залежать від виду в'язучого і приймаються такі значення $\mathcal{G} = 9$, $\gamma = 560$, $d = 0,03488$, $g = 0,0000136$, $f = 0,0028807$;

$\Pi(T_p, III)$ - функція penetрації бітумного в'язучого визначається за залежністю.

$$\Pi(T_p, III) = 10 \frac{\Pi \times (T_p + 120) - 20 \times T_p + 1952}{500 + 50 \times III} \quad \text{або} \quad \Pi(T_p, III) = 10 \frac{(III - 20) \cdot (T_p - 25)}{50 \cdot (III + 10)} + 2,9031. \quad (63)$$

Для здійснення переходу виразу, що описує отримання глибини колії, що утворилася після першого проходу колеса переходу формули (48) в модель вязкопружності, згідно принципу (1), необхідно виконати відповідні перетворення у нього фіктивних сил навантаження і релаксації. Для цього використаємо залежність [6]:

$$P = \int_{-a}^b p(x) dx = \frac{Ka^3}{RH} Fp(\beta, De), \quad (64)$$

де K - пружний модуль, H - товщина покриття, $Fp(\beta, De)$ - сила тертя, яка виникає при контакті тіл при коченні.

Отримаємо на проміжному етапі вираз із пружним модулем:

$$h = \frac{1}{2} \times (\beta \times c \times R)^{\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \times K \times a^3}{b \times R \times H} \times Fp \times \left(\sqrt{\frac{c + \beta}{c \times \beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (65)$$

а після підстановки функції релаксації у формулу її наступний вигляд:

$$h = \frac{1}{2} \times (\beta \times c \times R)^{\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \times \Psi_T(t, T) \times a^3}{b \times R \times H} \times Fp \times \left(\sqrt{\frac{c + \beta}{c \times \beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (66)$$

Постійні c і β , як правило, встановлюються експериментальним шляхом.

Отриманий вираз (66) є ядром для отримання первинної вертикальної осадки покриття на основі термореологічних параметрів асфальобетонного покриття, навантаження та характеристик колеса.

Обчислення зростання глибини колії, при послідовних проходженнях колеса відбувається зміна геометричних величин області контакту. Зокрема, початок деформації матеріалу покриття під пневматиком все більше і більше наближається до вертикальної площини, прогресивно зменшуючи величину a . Відстеження зростання глибини колії в залежності від числа проходів колеса виконується послідовними ітераційними обчисленнями.

Виконувати громіздкі розрахунки зі змінними геометричними характеристиками області контакту для кожного окремого проходження пневматика недоцільно. Тому задля певного спрощення вводять безрозмірні параметри, в яких включають показники часу і відстані (29-31). Необхідно використовувати величину δ_N як нормовану функцію від кількості проходок [8]. За допомогою δ_N обчислюється крок приросту глибини колійності в залежності від кількості проходів:

$$\delta = \sqrt[3]{3(N + c_1)}, \quad (67)$$

де N - кількість проходів; c_1 - постійна, яку отримують емпіричним шляхом; в аналітичному вираженні c_1 становить собою постійну інтегрування рівняння (12):

$$\sqrt{u_N} \left(\delta_{N-1} + \frac{2}{3} u_N \right) = 1. \quad (68)$$

Отримання величини δ_N має на увазі вирішення рівняння зв'язку тиску і приросту глибини колії:

$$\frac{1}{b} P = c_1 \sqrt{2R\Delta h_N} \left(h_{N-1} + \frac{2}{3} \Delta h_N \right). \quad (69)$$

Як ми бачимо, прирості глибини колії $\Delta h_N = h_N - h_{N-1}$, в контексті розподілу навантаження займає місце в квадратичному рівнянні (17), де одним із коренів квадратичного рівняння, що містить $\Delta h_N \in \delta_N$. Другий корінь - u_n вони зв'язані між собою наступним чином:

$$\Delta h_N = \gamma \cdot u_N \quad (70)$$

$$h_{N-1} = \gamma \cdot \delta_{N-1} \quad (71)$$

$$\delta_N = \delta_{N-1} + u_N, \quad (72)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt[3]{\frac{P^2}{2 \cdot b^2 \cdot c^2 \cdot R}} \quad [8].$$

Рекурентні розв'язки для рівняння (72) можна представити у послідовності отримання величини δ_N із величини δ_{N-1} : $N=1$, $\delta_N=1,31, u_N=1,31$; $N=2$, $u_N=0,40$; $N=3$, $\delta_N=1,99, u_N=0,28$ і т.д.

Стосовно залежності $\delta_N = \delta_{N-1} + u_N$, то його перепис у формі кінцевих різниць має вигляд:

$$\frac{\Delta \delta_N}{\Delta N} = \frac{1}{\delta_{N-1}^2}, \quad (73)$$

продиференціювавши отримуємо:

$$\frac{d\delta_N}{dN} = \frac{1}{\delta_N^2}, \quad (74)$$

а після інтегрування питомий вираз прийме вигляд (67).

Висновок

Зведене рівняння колієутворення в асфальтобетонному покритті на автодорожніх мостах від дії пневматичних коліс транспортних засобів. Підсумовуючи теоретичний розгляд процесу колієутворення у пружно-в'язко-пластичних середовищах наголосимо на основних моментах:

1) як основа теорії колієутворення використовується функціональне ядро рівняння стану колієутворення (48). Теоретичний аналіз розвитку процесів тіл пластичного деформування з в'язкою реологією (зокрема ґрунтів), показав свою корисність для розробки відповідної теорії для асфальтобетону (3, 12);

2) перехід від моделі пружності до моделі в'язко-пружності здійснюється через встановлення відповідної функції релаксації (54); незворотні деформації враховуються при заміщенні модулів пружності показниками, які описують пластичну реакцію середовища (зокрема с);

3) для врахування температурного впливу на в'язкопружні характеристики асфальтобетону виконується адаптація функції релаксації так звана температуро-залежною функцією релаксації на принципах температуро-часової аналогії (56-61). Уточнено функції релаксації асфальтобетону коефіцієнтом (62), який залежить від властивостей бітумного в'язучого, а саме: пенетрації, температури розм'якшення та індексу пенетрації .

4) гнучкість аналітичного рішення процесу колієутворення в асфальтобетонному при дії пневматичних коліс транспортних засобів полягає в

рахуванні змінної товщини покриття, можливість удосконалювати дослідницьку модель врахуванням явища мікропросковзування через параметр $Fp(\beta, De)$, і особливостей проектування покриття на автодорожніх мостах (зокрема в одно- чи двошаровому наближенні).

5) для прогресуючого зростання глибини колії використовується відповідні рекурентні рівняння з використанням коренів δ_N та u_N (67–78) як функції від кількості циклів навантажень:

$$h_{N+1}^m = \frac{1}{2} \times (\beta \times c \times R)^{-\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \times \Psi_T(t, T) \times a^3}{b \times R \times H} \times Fp \times \left(\sqrt{\frac{c + \beta}{c \times \beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \times \left(h_1 \times \delta_{N+1} - \frac{h_1}{\delta_{N+1}} \right); \quad (75)$$

6) рівняння зростання глибини колії в одношаровій моделі (рис. 2):

$$h_{N+1}^m = \frac{1}{2} \times (\beta \times c \times R)^{-\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \times \Psi_T(t, T) \times a^3}{b \times R \times H} \times Fp \times \left(\sqrt{\frac{c + \beta}{c \times \beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \times \left(h_1 \times \delta_{N+1} - \frac{h_1}{\delta_{N+1}} \right) \times K_k; \quad (76)$$

7) рівняння зростання глибини колії в двошаровій моделі (рис. 3):

$$h_{N+1}^m = \frac{1}{2} \times (\beta \times c \times R)^{-\frac{1}{3}} \times \left[\frac{3 \times \bar{\Psi}_T(t, T) \times a^3}{b \times R \times H} \times Fp \times \left(\sqrt{\frac{c + \beta}{c \times \beta}} - 1 \right) \right]^{\frac{2}{3}} \times \left(h_1 \times \delta_{N+1} - \frac{h_1}{\delta_{N+1}} \right) \times K_k; \quad (77)$$

$\bar{\Psi}_T(t)$ – середньо-інтегральне значення функції релаксації, яке визначається за залежністю:

$$\bar{\Psi}_T(t, T) = \left(\sum_{i=1}^n \Psi_{T_{a\delta i}}(t, T) \times H_{a\delta i} \right) \div \sum_{i=1}^n H_{a\delta i}, \quad (78)$$

де $\Psi_{T_{a\delta i}}(t, T)$ – функція релаксації i -го шару асфальтобетонного покриття; n – кількість шарів асфальтобетонного покриття ($n=2$); $H_{a\delta i}$ – товщина i -го шару асфальтобетонного покриття ($i=2$).

8) рівняння зростання глибини колії для тришаровій моделі прирівнюється до двошаровій моделі (рис. 3).

Література

1. <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/719-2012-%D1%80>.
2. Александров А.С. Применение теории наследственной ползучести к расчету деформаций при воздействии повторных нагрузок: монография / А.С. Александров – Омск: СибАДИ, 2014. – 152 с.
3. Барашков И.А. Повышение эффективности эксплуатации колесных лесозаготовительных машин на переувлажненных почвогрунтах: автореф. дис. канд. техн. наук / И.А. Барашков. Изд-во Санкт – Петербург. – 2012. – С. 20.
4. Базаров С.М. Математическая модель колеобразование в почвогрунтах под воздействием лесных машин / С.М. Базаров, И.А. Барашков, А.И. Никифорова, А.М. Хахина // Известия: СПьГЛТА, 2011. № 197. – С. 54 – 65.

5. Базаров С.М. Теория колееобразование в почвогрунтах под воздействием гусеничных лесных машин / С.М. Базаров, И.А. Барашиков, А.И. Никофорова, А.М. Хахина // Известия: СПЬГЛТА, 2012. № 198. – С. 59 – 70.
6. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия/ К. Джонсон: Пер. с англ. – М.: Монография : Мир, 1989. – 510 с.
7. Золотарь И.А. К определению остаточных деформаций в дорожных конструкциях при многократных динамических воздействиях на них подвижных транспортных средств / И.А.Золотарь. - Санкт-Петербург: Изд-во "ВАТТ", 1999. - 31 с.
8. Ишлинский А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю.Ишлинский , Д.Д. Ивлев - М.: Монография : ФИЗМАТЛИТ, 2001, 2003. - 704 с. - ISBN 5-9221-0141-2.
9. 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.
10. Фадеев В.Б. Влияние остаточных деформаций грунта земляного полотна на колееобразование на проезжей части дорог с нежесткими дорожными одеждами: автореф... канд. техн. наук/ В.Б. Фадеев. – М.: Изд-во МАДИ. - 1999. – 21 с.
11. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я.Хархута, Ю.М.Васильев. - М.: Транспорт, 1975. - 592 с.
12. Цытович Н.А. Механика грунтов / Цытович Н.А. М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
13. Bartley F.G., Cornwell W.L. Aggregates for road pavements. Transit New Zealand Research Report. 1993, N17. - 72 p.
14. Collings I.F., Cliffe P.F. Shakedown in frictional materials under moving surface loads // International Journal for Numerical and Analytical Methods of Geomechanics. 1987. Vol. 11, No. 4, P. 28-37.
15. 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.
16. Sharp R.W. Shakedown-analyses and the design of pavement under moving surface load // PhD Thesis, University of Sydney, Australia, 1983.
17. Sharp R.W., Booker J.R. Shakedown of pavements under moving surface loads // Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1984. Vol. 110, N1, p. 1-14.
18. Репников Л.Н. Расчет балок на упругом основании, объединяющем деформативные свойства основания Винклера и линейно-деформируемой среды / Л.И.Репников // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1967. - №6. - С. 15-28
19. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. - М.: Высш. школа, 1976. - 277 с.
20. Барвашов В.А. Трехпараметрическая модель грунтового оснвания и свайного поля, учитывающая необратимые стурктурыне деформации грунта / В.А. Барвашов, В.Г.Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1978. - №4. - С.17-19.
21. Богуславский А.М. Основы реологии асфальтобетона / А.М.Богуславский, Л.А. Богуславский. - М. Высшая школа, 1972. - 200 с.
22. Богуславский А.М. Асфальтобетонные покрытия / А.М.Богуславский, Л.Г. Ефремов. - М.: МАДИ, 1981. - 145 с.
23. Лазарев В.В. Математическая модель процесса качения пневматического колеса по деформируемому грунту./ http://science-bsea.narod.ru/2006/stroy_2006/lasarev.htm
24. 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.
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. Науковий журнал. Випуск 15, 2015, Частина 1: Серія «Технічні науки». С. 119-128.
26. Онищенко А.Н. Причины образования колеи на асфальтобетонном покрытии автодорожных мостов и способы повышения колееустойкости // Дорожна техника. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 134-144.
27. ОДМ 218.2.004-2004 Методические рекомендации по применению асфальтобетонных покрытий на мостовых сооружениях автомобильных дорог. Москва. Росавтодор, 2010. – 61 с

28. ДБН В.2.3-22:2009 Споруди транспорту. Мости та труби основні вимоги проектування. Київ. Мінрегіонбуд України, 2009 – 73 с.
29. 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.
30. Золотарев В.А. Проблема зсувостійкості асфальтобетонів потребує поглиблених консолідованих досліджень // Автошляховик України. -2008. -№ 5. –С.26-28.
31. 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.
32. Кириухин Г.Н. Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей / Кириухин Г.Н., Смирнов Е.А. – М.: Информавтодор, 2003. – 96с
33. 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.
34. Воловик А.А. Колееустойчивость мелкозернистого асфальтобетона на битумах разных марок / Воловик А.А., Костин Д.Ю., Чугуенко С.А., Жданюк В.К. // Международная научно-практическая конференция молодых ученых: «Эффективные материалы, технологии, машины и оборудование для строительства и эксплуатации современных транспортных сооружений». – 2009. – С. 92-97.
35. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок. – Дис. ... докт. техн. наук. – 05.25.11 / Радовский Б.С. – Киев, 1983. – 552 с.
36. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис. докт. техн. наук: 05.22.11 - К., 1996 – 406 с.
37. Иноземцев А.А. Сопротивление упруго-вязких материалов. Из-во литературы по строительству. Л., 1966.
38. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / Золотарев В.А.. – Харьков: Вища школа, 1977. – 116 с.
39. 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.

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: **01.07.2016 р.**