

УДК 625. 7/.8

Сівко В.Й., д-р техн. наук

ВПЛИВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА НАКОПИЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМУ ПОКРИТТІ

Анотація. В статті наведено аналіз існуючих моделей накопичення залишкових деформацій в покритті автомобільних доріг від дії транспортних засобів при високих температурах. Обґрунтована модель для об'єктивного прогнозування колії в асфальтобетонному покритті.

Ключові слова: транспортний засіб, асфальтобетонне покриття, деформація, навантаження, температура.

Сивко В.Й., д-р техн. наук

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА НАКОПЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В АСФАЛЬТОБЕТОННОМ ПОКРЫТИИ

Аннотация. В статье приведен анализ существующих моделей накопления остаточных деформаций в покрытии автомобильных дорог от воздействия транспортных средств при высоких температурах. Обоснованная модель для объективного прогнозирования колеи в асфальтобетонном покрытии.

Ключевые слова: транспортное средство, асфальтобетонное покрытие, деформация, нагрузка, температура.

Sivko V.Y., Dr. Tech. Sci.

EFFECT OF VEHICLES THE ACCUMULATION OF RESIDUAL STRAIN IN ASPHALT PAVEMENT

Annotation. The article analyzes the existing models of accumulation of residual deformations in the coverage of motor roads from the impact of vehicles at high temperatures. A valid model for objective forecasting of track in asphalt concrete pavement.

Keywords: vehicle, asphalt-concrete coating, deformation, load, temperature.

Вступ

Рівність дорожніх покриттів обумовлює важливі споживчі властивості автомобільної дороги. З погіршенням рівності знижується середня швидкість руху транспортного засобу. У деформованих зонах покриття накопичується вода, яка призводить до зменшення коефіцієнта зчеплення пневматичного колеса з покриттям. Як відомо кількість транспортних засобів на автомобільних дорогах постійно зростає це призводить до появи на асфальтобетонному покритті з урахуванням високої температури до напливів, колій, зсувів [1-3]. Такі деформації в покритті найбільш часто виникають в місцях зафіксованих зупинок, біля світлофору та в зоні перехрестя де присутній підвищений рух транспортних засобів, а також повільний рух на автодорожніх мостах в крайніх правих полосах руху великовантажних транспортних засобів [3]. Нерівність призводить до виникнення динамічних навантажень у результаті, яких максимальне зусилля, що передається на від колесо на покриття в середньому зростає 1,3 рази [2]. При цьому мінімальне зусилля знижується до 0,7 – 0,8 від статичного навантаження. Така варіація величини навантаження призводить до різних переміщень (деформувань) поверхні покриття вздовж траєкторії руху транспортного засобу і являється причиною подальшого зниження повздовжньої рівності. Тому прогнозування рівності покриття є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Великий внесок з розв'язку проблем деформування середовища від дії транспортного засобу внесли такі вчені як: А.С. Александров, І.О. Барашков, І.М. Бартенєв, А.М. Богуславського, О.М. Бурмистрова, А.П. Васильєв, Л.Б. Гезенцвей, К. Джонсон, А.Ю. Ішлінській, М.М. Иванов Б.С. Радовський, П.А. Ребиндера, А.В. Руденська, І.А.Золотарь, В.О. Золотарьов, В.П. Матуа, І.Г. Овчиников, М.Я.Хархута, М. О. Цитович [1, 4-18] та інші дослідники. Аналіз цих робіт показав, що на даний час існуючі моделі з використанням реологічних основ механіки матеріалу дуже складні, пов'язані з його показниками, які визначаються експериментальним шляхом в лабораторних умовах, у цьому випадку [10] запропоновано модель деформування для оцінки колієутворення в матеріалі дорожнього одягу від дії жорсткого та пневматичного колеса. Тому актуальність роботи полягає в пошуку моделей деформування асфальтобетону для прогнозування рівності покриття.

Виклад основного матеріалу. Існуючі моделі деформацій асфальтобетонного покриття за своєю природою утворюються поступово за рахунок накопичення незворотних мікродеформацій. Дослідженнями залежності

розвитку деформації від певних напружень широко описані в роботах П.А. Ребиндера і його учнів [13, 16-18].

Так, узагальнюючи викладене авторами, Л.Б. Гезенцевей вказував, що при постійно діючому напруженні розвиток деформацій в часі в пружно-пластичних матеріалах залежить від величини напружень і пропонує розглядати два випадки: 1 - коли діючі напруження P досить малі і менше межі пружності або межі текучості, тобто $P < P_k$. В цьому випадку у деформованому тілі розвиваються тільки зворотні деформації, що поділяються на два типи а) пружна деформація ϵ_0 , що підкоряється закону Гука. Вона виникає після прикладення навантаження миттєво зі швидкістю поширення звуку в даному матеріалі і з такою ж швидкістю спадає після зняття навантаження, і б) деформація пружної післядії ϵ_e , вона повільно розвивається, після прикладення напружень і так само повільно спадає після зняття напружень. Цю деформацію іноді називають деформацією сповільненій пружності. Говорячи про пружню деформацію першого типу, після зняття напружень первісна геометрична форма повністю відновлюється, а крива, характерна для такого типу деформації показана на рисунку 1а. Другий випадок, коли діє напруження P перевищує межу текучості, але менше P_k , але менше граничного напруження P_m , що викликає руйнування матеріалу. В цьому випадку в основі, що деформується матеріал при досить тривалому часу (що перевищує час, протягом якого розвивається еластична деформація) розвивається ще один тип деформації, крім двох описаних раніше - деформація в'язкої і пластичної течії, що є незворотною $\epsilon_{ост}$. Другий випадок деформування відбувається як показано на рисунку 1б.

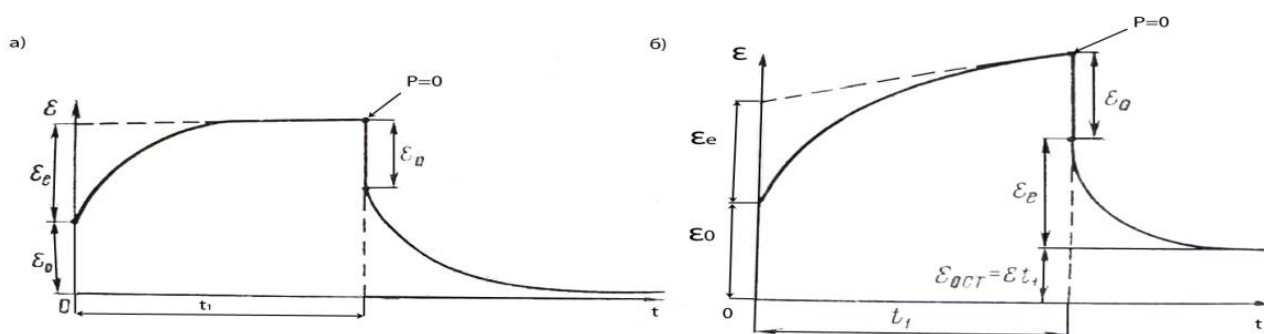


Рисунок 1 - Розвиток деформації при напруженнях: а) менше межі текучості; б) що перевищують межу текучості

Крім описаного вище Л.Б. Гезенцевем вказується на те, що структурно-механічні властивості можна найбільш повно охарактеризувати наступними, незалежними один від одного константами матеріалу. Модуль пружності

(умовно миттєвий або початковий модуль пружності, модуль еластичності, рівноважний модуль), в'язкість (найбільша гранична в'язкість, найменша в'язкість, ефективна в'язкість, пластична в'язкість і в'язкість пружної після дії), час релаксації напружень, межа плинності. Крім того, Л.Б. Гезенцевей відзначає важливу властивість залежності поведінки тіла від тривалості прикладання навантаження: «При дуже малому часі дії навантаження любе в'яже тіло може розглядатися як пружне і навпаки, любе пружно - в'язке тіло великому часі спостереження і постійній швидкості прикладання навантажень може розглядатися як в'язке ». З точки зору вивчення процесу утворення колії, цей вислів має велике значення, так як передбачає врахування часового фактора впливу навантаження.

Так в своїй роботі Л.А. Горелишев [19], говорить про необхідність врахування тимчасового фактору впливу навантаження при виборі частотних режимів випробування асфальтобетону на втому. Дані принципи закладені в рекомендаціях по проектуванню дорожніх одягів доріг різних категорій з заданими розрахунковими швидкостями руху США. Даний посібник [20] враховує той факт, що на дорогах вищої категорії швидкості вищі і тривалість навантаження відповідно нижче. І, навпаки, на місцевих дорогах розрахункова швидкість мала і частота навантаження набагато нижче.

У своїх роботах М.М. Іванов [14] показав, що умовою утворення незворотних деформацій є невідповідність міцності асфальтобетону наступній умові:

$$R_{расч} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot h \cdot \lambda}{D \cdot tg \cdot \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)}, \quad (1)$$

де σ – розрахункове напруження, що діє на покриття;

h – товщина асфальтобетону;

λ – коефіцієнт, який враховує спільну дію вертикальних і горизонтальних напружень;

D – діаметр відбитку колеса;

φ – кут внутрішнього тертя асфальтобетону.

Цей вираз (1) дозволяє судити про те, що чим більше товщина шару асфальтобетону, тим більшою зсувостійкість він повинен володіти. Однак, в своїх роботах L.W. Hewitt [21] довів, що збільшення опору асфальтобетону до

зсуву по даній залежності відбувається до досягнення товщини шару в 10-12 см, подальше збільшення шару не впливає на здатність шару асфальтобетону чинити опір зрушенню. Це ймовірно пов'язано з тим, що максимальні зсувні напруження утворюються на глибині шару асфальтобетону до 10 см, що підтверджується дослідженнями, проведеними А.П. Васільєвим, Ю.М. Яковлевим і А.В. Руденським, в яких визначається товщина зсувонебезпечної зони до 9-10 см і залежить від товщини асфальтобетону, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Товщина зсувонебезпечної зони

Загальна товщина асфальтобетонного шару, см.	6-10	11-15	16-20	21-25	Более 25
H, см.	5	6	7	8	9

Вивчаючи деформаційні характеристики асфальтобетону Л.Б. Гезенцевей запропонував схему деформації в пружно-в'язкому тілі при багаторазовому додатку навантажень, яка представлена на рисунку 2.

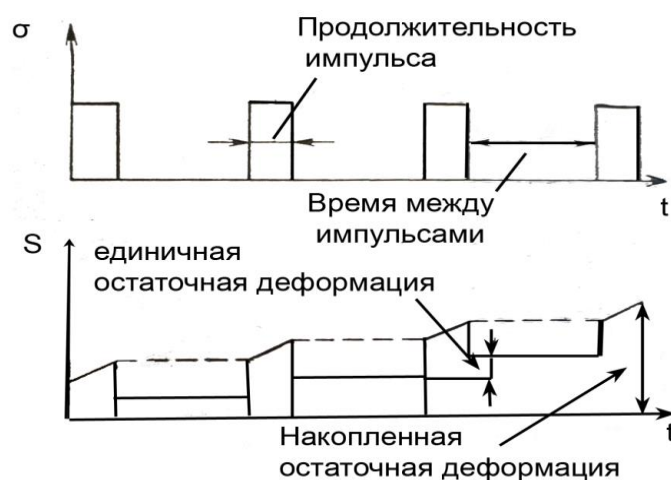


Рисунок 2 - Схема деформації в пружно-в'язкому тілі при багаторазових циклічних навантаження [18]

Дана схема (рис. 2) найбільш показово описує процес накопичення незворотних деформацій в асфальтобетоні і найбільш точно характеризує режим навантаження асфальтобетону в покритті. Важливість врахування втомних характеристик, а також здатність асфальтобетону сприймати повторювані навантаження обумовлена умовами роботи асфальтобетону в покритті. Вперше розробкою методів, що дозволяють оцінити поведінку асфальтобетону в умовах

багаторазового навантаження (умовах наближених до реальних умов роботи асфальтобетону). Розробкою такого методу вперше зайнялися на початку 70-х років вчені Франції [22]. Використання такого методу показало хорошу кореляцію з поведінкою асфальтобетону в покритті. Дані установки були сконструйовані таким чином, що при випробуванні на них, асфальтобетонні зразки піддаються повторюваному навантаженню, що імітує рух автомобільного колеса по покриттю [23]. Як правило, серед усього розмаїття подібних методів колесо, що імітує рух автомобільного колеса не має свого приводу, що виключає вплив на зразок дотичних напружень, пов'язаних з початком і закінченням руху, вплив на зразок здійснюється тільки за допомогою нормального навантаження. Дослідження асфальтобетону на приладі такого роду дозволяє визначити втомні характеристики асфальтобетону і за допомогою кореляції отриманих результатів з поведінкою матеріалу в покритті перейти до нормуванню таких показників. Ідея створення подібних приладів була підхоплена вченими інших країн і в даний час існує безліч методів як для визначення властивостей при циклічному навантаженні зразка, так і випробування. Які безпосередньо спрямовані на визначення стійкості конкретного асфальтобетону до утворення колії [23].

В даний час об'єднані норми країн ЄС на методи випробування містять безліч методів випробування циклічними навантаженнями [24-26]. Дані стандарти передбачають випробування різних зразків із застосуванням різної апаратури (циліндричних, консольних балочок постійного і змінного перерізу, балочок на двох опорах). Одночасно з розробкою таких методів проводилося і вдосконалення моделі, яка б описувала поведінку асфальтобетону при багаторазових навантаженнях. Як відомо асфальтобетон в напружено-деформаційному стані характеризується рядом складних властивостей: пружність, пластичність і повзучість. Протягом періоду навантаження мають місце численні процеси: релаксація напружень, зміна міцності від швидкості деформування, накопичення деформацій при багаторазовому навантаженні і багато інших. Таким чином, автори приходять до думки [27], що в залежності від прояву тих чи інших властивостей для їх описі слід застосовувати не тільки закони теорії пружності і пластичності, а й теорії повзучості, яка в свою чергу оперує додатковою незалежною перемінною - часом.

Так, авторами пропонувалося описувати працездатність реальних тіл з використанням теоретичних моделей, що складаються із з'єднання пружного в'язкого і пластичного елементів. Дослідження зарубіжних вчених, описані в

роботі [27], кажуть, що основними моделями для цих цілей є модель Максвелла та Кельвіна-Фойота. Подальші дослідження [28] показали, що існують більш відповідні моделі для опису цих процесів - модель Бюргерса, яка надалі була модифікована. Основний принцип моделі Бюргерса є те, що крива розвантаження є дзеркальне відображення кривої навантаження. Схема розвитку деформації відповідно до моделі Бюргерса представлена на рисунку 3 і виражається формулою:

$$\varepsilon_1(t) \text{ при } t \in (t_0, t_1),$$

$$\varepsilon_2(t) \text{ при } t \in (t_1, t_2),$$

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t \cdot E_2}{\eta_2}} \right). \quad (2)$$

$$\varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0 \cdot t_1}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} e^{-\frac{t_1 \cdot E_2}{\eta_2}} \cdot \left(e^{\frac{t_1 \cdot E_2}{\eta_2}} - 1 \right). \quad (3)$$

де $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$ - одинична деформація;

h – висота зразка;

Δh – зменшення зразка;

σ_0 – напруження;

E_1 – миттєвий модуль пружності;

E_2 – запізнюючий модуль пружності;

η_1 – коефіцієнт в'язкості повзучості;

η_2 – коефіцієнт в'язкості пружного запізнення;

t_0 – час з моменту прикладання навантаження;

t_1 – час з моменту зняття навантаження.

Однак результати деяких досліджень [27, 28] асфальтобетонів показали часткову невідповідність результатів випробування моделі, в результаті була запропонована модифікована модель Бюргерса з додатковим елементом.

Модифікована модель Бюргерса з додатковими елементами вважається найбільш успішною [27, 28] і точно описує поведінку асфальтобетону при багаторазових навантаженнях. Схематичне зображення моделі представлено на рисунку 4.

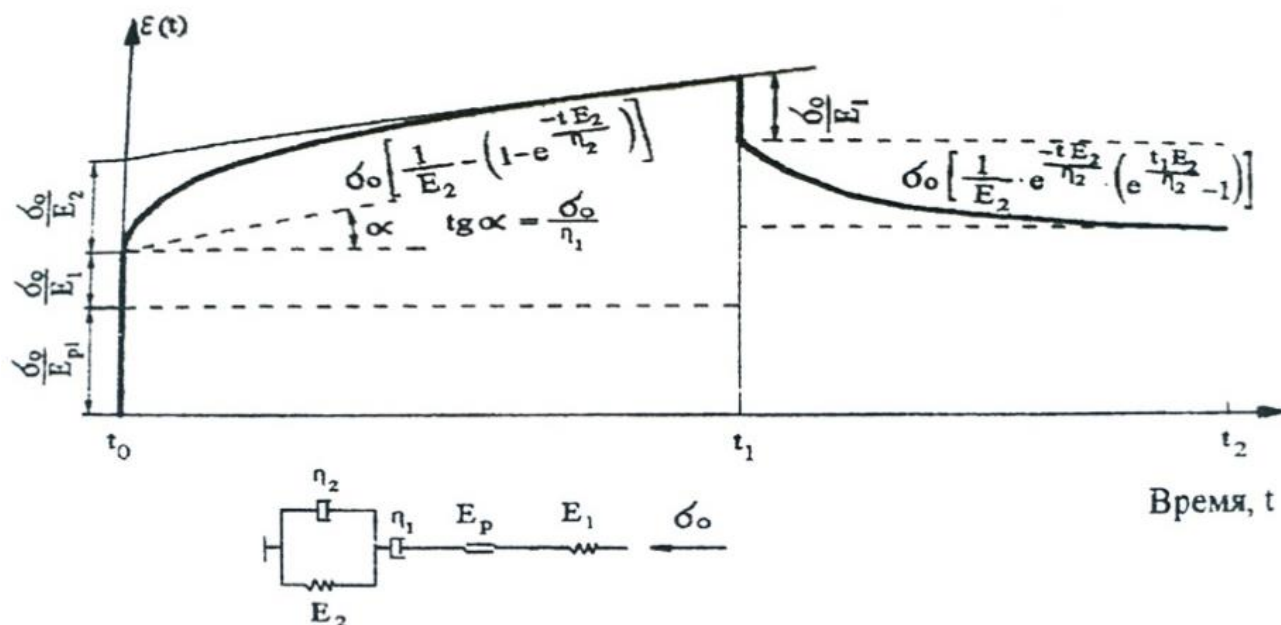


Рисунок 3 – Модель Бюргера

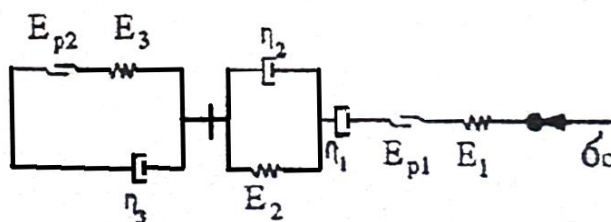


Рисунок 4 - Схема модифікованої моделі Бюргера з додатковим елементом

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_0}{E_{p1}} + \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t \cdot E_2}{\eta_2}} \right) \quad (4)$$

$$\varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0}{E_{p1}} + \frac{\sigma_0}{E_{p2}} + \frac{\sigma_0}{E_3} e^{-\frac{t \cdot E_3}{\eta_3}} \cdot \left(e^{\frac{t \cdot E_3}{\eta_3}} - 1 \right) \quad (5)$$

де η_3 – коефіцієнт в'язкості короткочасного в'язко - пружного запізнення;
 E_{p1} - миттєвий в'язко - пружний модуль;
 E_{p2} – запізнюючий в'язко - пружний модуль;

Графічна інтерпретація формул, що описують модифіковану модель Бюргера з додатковим елементів представлена на (рис. 5). Далі представлені самі формули, що описують поведінку асфальтобетону в момент прикладання та зняття навантаження.

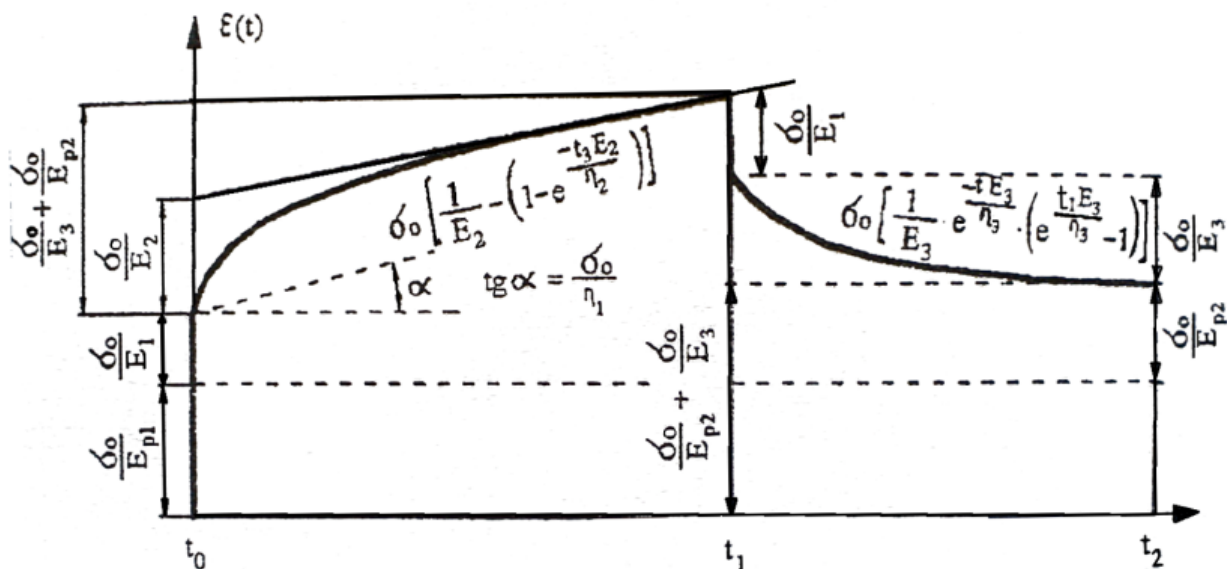


Рисунок 5 – Графічна інтерпретація формул, що описують кривою повзучості

Крім вищеописаної робіт [27, 28] визначили асимптоти для функцій, які в загальному вигляді були представлені так:

$$A(t) = K_t + b \quad (6)$$

$$\text{где } K_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon(t)}{t} \quad b = \lim_{t \rightarrow \infty} (\varepsilon(t) - K_t) \quad (7)$$

де $A(t)$ – значення яке визначається на осі координат.

Застосовуємо у рівняння (6) і (7) функції $\varepsilon_1(t)$ і $\varepsilon_2(t)$ отримуємо залежності:

$$A(t) = \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_{p1}} + \frac{\sigma_0}{E_1} \quad \text{для функції } \varepsilon_1(t) \quad (8)$$

$$\varepsilon_2(t) = \frac{\sigma_0}{E_{p1}} + \frac{\sigma_0}{E_{p2}} \quad \text{для функції } \varepsilon_2(t) \quad (9)$$

Достовірність отриманих залежностей авторами була підтверджена експериментально на асфальтобетонах різних складів і з різним вмістом в'язучого. В результаті проведених випробувань, авторами було введено поняття модуля жорсткості, який з'явився характеристикою, що визначає деформативність асфальтобетону в період дії довготривалого навантаження.

В роботі [10] запропоновано в'язко-пружньо-пластична модель колієутворення від дії навантаження пневматичного колеса транспортного

засобу в покритті дорожнього одягу. Для отримання формули для глибини колії, що утворилася після першого проходу колеса:

$$h = \frac{1}{2} (c \times \beta \times R)^{-\frac{1}{3}} \left[\left(\frac{3 \times P}{b} \sqrt{\frac{c + \beta}{c \times \beta} - 1} \right) \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (10)$$

де c - коефіцієнт пропорційності;

R – радіус колеса;

P - сила навантаження на колесо;

Дане рівняння (10) є справедливим для прогнозування залишкових деформацій в асфальтобетонному покритті на автомобільних дорогах та мостах. З метою наближеного моделювання накопичення залишкових деформацій в асфальтобетонному покритті може використовуватись наближений метод скінченних різниць [29]. Такий метод дозволяє замінити диференціальне рівняння системою алгебраїчних виразів.

Висновок

В даній статті проаналізовано існуючі моделі для прогнозування накопичення залишкових деформацій в покритті від дії транспортних засобів та високої температури.

Для більш точного та практичного застосування пропонується рівняння (10) А.Ю.Ішлінського [10], яке складається з в'язко пружньо – пластичної моделі і враховує дію пневматичного колеса транспортного засобу та розрахункові властивості досліджуваного середовища з метою прогнозування залишкових деформацій в покритті на автомобільних дорогах та мостах.

Література

1. Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / Золотарев В.А.. – Харьков: Вища школа, 1977. – 116 с.
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. Онищенко А. М. Проектування зернового складу асфальтобетону підвищеної колієстійкості з оптимізацією за показником розрахункового строку служби./ Онищенко А. М.// Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Methodology of Modern Research» : Международное периодическое научное издание. - 2017. - № 4(20), Vol.2. – Dubai, «WORLD SCIENCE», UAE. – P. 32-35. - ISSN 2413-1032. Видання входить до наукометричних баз даних: Index Copernicus, eLIBRARY, РІНЦ, RSCI, Scholar Google, ORCID.
4. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. – Алматы: «Білім», 2013. – 152 с.
5. Барвашов В.А. К расчету осадок грунтовых оснований, представленных различными моделями / В.А. Барвашов // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1977. - №4. - С.26-27.
6. Овчинников И.Г. Прикладная механика дорожных одежд на мостовых сооружениях / И.Г. Овчинников, А.Г. Щербаков, А.В. Бочкарев, Г.А. Наумова - М.: Монография Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. -310 с.
7. Цытович Н.А. Механика грунтов / Цытович Н.А. М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.
8. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия/ К. Джонсон: Пер. с англ. – М.: Монография : Мир, 1989. – 510 с.
9. 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.
10. Ишлинский А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю.Ишлинский , Д.Д. Ивлев - М.: Монография : ФИЗМАТЛИТ, 2001, 2003. - 704 с. - ISBN 5-9221-0141-2.
11. 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.
12. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М.Васильев. - М.: Транспорт, 1975. - 592 с.
13. Богуславский А.М. Основы реологии асфальтобетона / А.М.Богуславский, Л.А. Богуславский. - М. Высшая школа, 1972. - 200 с.
14. Иванов Н.Н. Основы новой методики расчета жестких дорожных одежд с учетом повторяемости воздействия нагрузок / Н.Н.Иванов, М.С.Коганзон, С.В.Коновалов. - М.: Высшая школа, 1959. - 61 с.
15. Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог / Бируля А.К. – М.: Автотрансиздат, 1956. – 340 с.
16. Ребиндер П.А. Образование и механические свойства дисперсных структур. Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева, 1963, №8, с.162.
17. Руденский А.В. Руденская И.М. Реологические свойства битумоминеральных

- материалов. М. Высшая школа, 1971. 130 с.
18. Л.Б. Гезенцевей Дорожный асфальтобетон М. «Транспорт», 1976. 336с.
 19. Л.А. Горельшева, А.А. Штромберг Усталость долговечности. Журнал «Автомобильные дороги». 2008, № 7, с 136-137.
 20. Guide for Mechanistic – Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures: final report. NCHRP, 2004.
 21. W.L. Hewitt, High. Res. Re, 1965, №104, с. 78-104.
 22. Brosseaud Y., Delorme J., Hiernaux R., Study of permanent deformations in asphalt in with the help of LCPC wheel tracking rutting tester: evaluatin and future prospects. TRB, 01/93 с. 175-182
 23. Онищенко А.М. Методи оцінки колієстійкості асфальтобетону. / Онищенко А.М.// Slovak international scientific journal «CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE»: Международное периодическое научное издание. – 2016/ - № 2 (2). Slovakia. P. 16-26. – ISSN 5782-5319.
 24. EN 12697-24:2004+A1:2007 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue
 25. EN 12697-25:2005 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test
 26. EN 12697-26:2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness
 27. М. Иваньски, Н.Б. Урьев Асфальтобетон как композиционный материал (с нанодисперсными и полимерными компонентами). М., Техполиграфцентр, 2007.-668с.
 28. Szczesna J., Zawadzki J. Zastosowanie zmodyfikowanego modelu Burgesa do okreslania cech geologicznych betonu asfaltowego. // Prace IBDiM, 1985, №4, с25-26.
 29. Напружено-деформований стан будівельних матеріалів в технологічних процесах виробництва: Підручник для студ. вищ. навч. закл. тех. спец. / Сівко В.Й., Поляченко В.А., Кузьмінець М.П., Сівко Є.В., Науменко Ю.В. – К. НТУ, 2010. – 352 с. – Бібліографія.: 342 – 347.

Рецензенти:

Павлюк Д.О., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Кіяшко І.В., канд. техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Reviewers:

Pavliuk D.O., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Kiiashko I.V., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Kharkiv National Automobile and Highway University.

Стаття надійшла до редакції: **30.03.2017 р.**