

**УДК 625.7/.8**

**Солодкий С.Й.** д-р техн. наук, **Смолянець В.В.** канд. техн. наук

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

**Аннотация.** В работе предложено оценивать предельного состояния асфальтобетонных слоев относительно трещиностойкости, на основании положений кинетической теории прочности твердых тел с учетом: времени действия нагрузки; дифференциации условий работы по характеру нагрузки; характера распределения колес транспортных средств по ширине полосы движения; наличия горизонтальных растягивающих напряжений на поверхности слоя; климатических, конструктивно-материаловедческо-технологических и транспортных факторов.

**Ключевые слова:** долговечность, асфальтобетонное покрытие, растягивающие напряжения, нагрузка, температура.

**УДК 625.7/.8**

**Солодкий С.Й.** д-р техн. наук **Смолянець В.В.** канд. техн. наук

## **ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ПОКРИТТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ**

**Анотація.** В роботі запропоновано оцінювати граничний стан асфальтобетонних шарів з позиції тріщиностійкості, на підставі положень кінетичної теорії міцності твердих тіл з урахуванням: часу дії навантаження; диференціації умов роботи за характером навантаження; характеру розподілу коліс транспортних засобів по ширині смуги руху; наявності горизонтальних розтягуючих напружень на поверхні шару; кліматичних, конструктивно-матеріалознавчих-технологічних і транспортних факторів.

**Ключові слова:** довговічність, асфальтобетонне покриття, розтягуючі напруження, навантаження, температура.

**UDC 625.7/.8**

**Solodkyi S.,** Dr. Tech. Sci., **Smolianets V.,** Cand. Eng. Sci. (Ph.D.)

## **INCREASE OF LONG-TERM CONDITIONS OF ASPHALT PAVEMENTS OF ROADS**

**Annotation.** The paper proposes to evaluate the limiting state of asphalt-concrete layers relative to crack resistance, on the basis of the positions of the kinetic theory of the strength of solids taking into account: the loading time; Differentiation of working conditions by the nature of the load; Character of wheel distribution of vehicles along the lane width; The presence of horizontal tensile stresses on the surface of the layer; Climatic, constructive-material-technological and transport factors.

**Key words:** durability, asphalt pavement, tensile stresses, load, temperature.

### **Введение**

На улицах и дорогах с твердым покрытием преобладают нежесткие дорожные одежды с асфальтобетонными слоями, которые нередко под действием транспортной нагрузки достаточно быстро разрушаются и требуют преждевременных ремонтов. Разрушения проявляются в разной степени, в зависимости от режима и характера нагрузки. Достаточно распространенными являются разрушения в виде трещин. За последнее десятилетие изучению трещиностойкости асфальтобетонных слоев при нагрузке было посвящено много научных трудов отечественных и зарубежных ученых. На основании проведенных исследований создан аналитическо-расчетный аппарат, позволяющий выполнять расчеты напряженно-деформированного состояния слоев дорожной одежды при оценке их трещиностойкости. Однако напряженно-деформированное и предельное состояния конструкции дорожной одежды, в значительной мере зависят от терморологических свойств материалов дорожной одежды и грунта земляного полотна, что не учитывается при расчетах дорожной одежды. Кроме того, выполненные исследования носят разрозненный характер, что на данный момент не позволяет на единой методологической основе разработать комплексный метод расчета асфальтобетонных слоев городских дорожных одежд на трещиностойкость с учетом одновременного действия таких факторов: время действия нагрузки изменяется от тысячных

долей секунды (участки магистралей с высокими расчетными скоростями) до нескольких часов и больше (стоянки, остановки) и существенно отличается по полосам движения, на подъемах, на перекрестках, на городских и внегородских дорогах; частота и последовательность нагрузок, разнообразное сочетание режимов нагрузки; учет фактических терморологических характеристик асфальтобетона; разный режим и характер нагрузки по длине и ширине автомобильной дороги; учет растягивающих напряжений, возникающих на поверхности асфальтобетонных слоев и др.

В статье рассматривается метод расчета асфальтобетонных слоев нежесткой дорожной одежды на трещиностойкость с учетом времени действия нагрузки от транспортных средств.

### **Основные теоретические положения**

Для оценки трещиностойкости асфальтобетонных слоев предложена классификация участков по длине улицы или дороги с характерными комбинациями времени действия нагрузки транспортных средств [1]. Определение напряжений в слоистом вязко-упругом полупространстве при движении транспортных средств является одним из основных факторов для оценки его трещиностойкости.

Одним из первых, кто полностью решил задачу определения тензора напряжений слоистого вязко-упругого полупространства, был проф. Б.С. Радовский [2]. Он рассмотрел задачу определения напряжений и перемещений в нежесткой дорожной одежде как в слоистом вязко-упругом безинерционном полупространстве с произвольным конечным числом изотропных и однородных слоев. В результате была получена зависимость для определения горизонтальных нормальных растягивающих напряжений  $i$ -го слоя многослойного вязко-упругого безинерционного полупространства [2].

Но использование данной зависимости для определения растягивающих нормальных напряжений является достаточно проблематичным ввиду громоздкости формулы, что практически исключает возможность широкого использования ее для инженерных расчетов. Поэтому было предложено использование квазиупругого метода аппроксимации при использовании точного решения для определения напряжений в упругом полупространстве. В квазиупругом методе вязко-упругое решение выходит из упругого решения заменой всех упругих характеристик материала соответствующими функциями релаксаций и функциями ползучести [2, 3]. Поэтому, в нашем случае, было

предложено использование точного решения теории упругости для многослойного полупространства, полученное проф. А.К. Приварниковым [4]. Используя данный метод, было исследовано напряженно-деформированное состояние многослойного полупространства, были найдены и аппроксимированные функции для определения горизонтальных нормальных растягивающих напряжений на подошве асфальтобетонного слоя [1]:

$$\sigma_{yn} = A(t, T) y^3 + B(t, T) y^2 + C(t, T) y + D(t, T), \quad (1)$$

и на поверхности асфальтобетонного слоя

$$\sigma_{yn} = A_1(t, T) y^3 + B_1(t, T) y^2 + C_1(t, T) y + D_1(t, T), \quad (2)$$

где  $A(t, T)$ ,  $B(t, T)$ ,  $C(t, T)$ ,  $D(t, T)$ ,  $A_1(t, T)$ ,  $B_1(t, T)$ ,  $C_1(t, T)$ ,  $D_1(t, T)$  – постоянные, зависящие от времени действия нагрузки и температуры.

При этом был уточнен подход к установлению реального времени действия нагрузки  $t_i^H$  от транспортных средств на асфальтобетонные и другие слои дорожной одежды (рис. 2) на расчетные характеристики слоев (модуль упругости ( $E_i$ ))

$$t_i^H = \frac{D_i(z)}{V}, \quad D_i(z) = f(E_i(t_i^H)), \quad (3)$$

где  $V$  – скорость движения расчетного транспортного средства.

Для оценки предельного состояния асфальтобетонных слоев относительно трещиностойкости, на основании положений кинетической теории прочности твердых тел, были обоснованы условия предельного состояния и функции долговечности [1- 6]. Характер эпюр горизонтальных нормальных напряжений на поверхности и подошве асфальтобетонного слоя при действии транспортной нагрузки наведена в работе [1]. Расчетная схема для определения времени действия нагрузки от транспортных средств на асфальтобетонные слои дорожной одежды наведена в работе [1]

$$M \leq k_{кл} \cdot k_{ст} \cdot C_{тр}, \quad (4)$$

где  $M$  – мера опасности растрескивания асфальтобетонного слоя;  $C_{тр}$  – предельное значение показателя трещиностойкости асфальтобетона

(устанавливается экспериментально);  $k_{кл}$ ,  $k_{см}$  – коэффициенты, отображающие соответственно влияние климатических факторов и старения на значение  $C_{тр}$  асфальтобетона.

Для определения меры опасности растрескивания асфальтобетонных слоев при разных режимах и времени действия нагрузки предложены зависимости [1]:

- при произвольном режиме изменения  $\sigma(t^n)$

$$M = \int_0^{t_p} \frac{dt}{10^{a_\sigma + \epsilon_\sigma \frac{1}{T'} + r_\sigma e^{\frac{\rho_\sigma}{T'}}} \cdot (A(t, T)y^3 + B(t, T)y^2 + C(t, T)y + D(t, T))^{-(A_\sigma + B_\sigma \frac{1}{T'} + C_\sigma e^{\frac{D_\sigma}{T'}})}, \quad (5)$$

где  $A_\sigma$ ,  $B_\sigma$ ,  $C_\sigma$ ,  $D_\sigma$ ,  $a_\sigma$ ,  $\epsilon_\sigma$ ,  $r_\sigma$ ,  $\rho_\sigma$  – постоянные, которые определяют по результатам испытаний на длительную прочность при разных температурах и нагрузках;

- при циклическом изменении  $\sigma(t^n)$

$$M = d_1 + d_2 + \dots + d_k, \quad (6)$$

где  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_k$  – поврежденность соответственно от первого, второго,  $k$ -го цикла приложенных нагрузок;

- при постоянной скорости роста нагрузки  $V_\sigma = const$

$$M = \int_0^{t_p} \frac{dt}{10^{a_\sigma + \epsilon_\sigma \frac{1}{T'} + r_\sigma e^{\frac{\rho_\sigma}{T'}}} \cdot (V_\sigma t)^{-(A_\sigma + B_\sigma \frac{1}{T'} + C_\sigma e^{\frac{D_\sigma}{T'}})}; \quad (7)$$

- при постоянной скорости роста деформации  $V_\epsilon = const$

$$M = \int_0^{t_p} \frac{10^{-\left(a_\sigma + \epsilon_\sigma \frac{1}{T'} + r_\sigma e^{\frac{\rho_\sigma}{T'}}\right)} dt}{\left( HV_\epsilon t + (B - H)V_\epsilon \int_0^t \left( 1 + \frac{te^{p(T-Q)}}{r} - \frac{\tau e^{p(T-Q)}}{r} \right)^{-m} d\tau \right)^{-(A_\sigma + B_\sigma \frac{1}{T'} + C_\sigma e^{\frac{D_\sigma}{T'}})}, \quad (8)$$

где  $m$ ,  $r$ ,  $H$ ,  $B$  – параметры функции релаксации, которые определяются экспериментально.

В работе [1] предложена классификация, которая разработана на условие предельного состояния относительно трещиностойкости при комбинируемой нагрузке

$$M_{i,\alpha} = \sum_{\alpha=1}^{\beta} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{n_j}{N_j^p} \leq k_{кл} \cdot k_{см} \cdot C_{мп}, \quad (9)$$

где  $M_{i,\alpha}$  – мера опасности растрескивания асфальтобетонного слоя, которая рассматривается при  $i$ -той комбинации  $\alpha$ -го периода года;  $n_j$  – количество приложений нагрузок с  $j$ -тым временем действия нагрузки;  $N_j^p$  – предельное значение количества приложений нагрузок для асфальтобетонного слоя при  $j$ -том времени действия нагрузки  $i$ -той комбинации;  $m_i$  – количество вариантов разного времени нагрузки в  $i$ -той комбинации.

При определении  $N_j^p$  для каждого из характерных участков [1] использовалась функция длительной прочности  $t_p^*(\sigma, T)$  в виде модифицированной степенной зависимости Бартенева Г.М. и условие предельного состояния в виде критерия Бейли, которые отображают термореологическое поведение асфальтобетона при его разрушении. Так, например, для участка ДЗ зависимость для определения  $N_p$  имеет вид

$$N^p = \left[ m_{\sigma} \cdot t_{\sigma}^H B_{\tau}(T)^{-1} \sigma(t_{\sigma}^H)^{e\tau(T)} + m_{\tau} \cdot t_{\tau}^H B_{\tau}(T)^{-1} \sigma(t_{\tau}^H)^{e\tau(T)} + \right. \\ \left. + m_{\tau} \cdot t_{\tau}^H B_{\tau}(T)^{-1} \sigma(t_{\tau}^H)^{e\tau(T)} + m_p \cdot t_p^H B_{\tau}(T)^{-1} \sigma(t_p^H)^{e\tau(T)} \right]^{-1}, \quad (10)$$

где –  $m_{\sigma}$ ,  $m_{\tau}$ ,  $m_{\tau}$ ,  $m_p$  соответственно (в случае расположения ДЗ в зоне светофора) доля транспортных средств с непрерывным движением, тормозящих, остановившихся и разгоняющихся.

### **Влияние факторов на трещиностойкость асфальтобетонных слоев городских дорожных одежд**

Влияние разных факторов оценивали посредством анализа напряженного и предельного состояний асфальтобетонных слоев на основе полученных аналитических зависимостей с использованием данных о термореологических характеристиках материалов.

При выполнении числового анализа учитывали разную термореологическую чувствительность (ТРЧ) дорожно-строительных материалов нежесткой дорожной одежды, то есть разную степень изменения модуля упругости при изменении времени действия нагрузки и температуры. В

работе [1] для этого предложено выделить четыре группы дорожно-строительных материалов по их ТРЧ (табл. 1).

**Таблица 1** – Группы дорожно-строительных материалов по термореологической чувствительности (ТРЧ)

Виды дорожно-строительных материалов по группам ТРЧ			
I (высокочувствительные)	II (чувствительные)	III (менее чувствительные)	IV (низкочувствительные)
Асфальтобетоны и дегтебетоны всех типов и видов, органо-минеральные смеси и др.	Глинистые и пылеватые грунты земляного полотна, щебень и гравий обработанный органическими вяжущими и др.	Щебень, гравий, песок необработанный или обработанный неорганическими вяжущими в количестве менее 5%, песчаные и супесчаные грунты земляного полотна и др.	Материалы обработанные неорганическим и вяжущими в количестве более 5%, тощий цементобетон и др.

Результаты определения напряженно-деформированного состояния и количества проездов расчетного автомобиля до разрушения для равнопрочных (по [7]) конструкций дорожных одежд приведены на рис. 1 – рис. 3 (конструкция дорожной одежды № 1 с основанием, содержащим материалы I и II групп ТРЧ, конструкция дорожной одежды № 2 с основанием, содержащим материалы III и IV групп ТРЧ).

Они свидетельствуют, что использование в основаниях менее реологично чувствительных цементосодержащих материалов значительно улучшает долговечность дорожной одежды.

Причем с увеличением толщины основания  $h_2$  в конструкциях дорожных одежд №1 и №2 увеличивается долговечность. В то же время, с увеличением длительности действия нагрузки, в первом случае (рис. 3, а) от 0,1 с до 100 с долговечность уменьшается более чем в 10 раз, а во втором случае (при применении в основании материалов III и IV групп ТРЧ, рис. 3, б) долговечность при времени действия нагрузки 1-10 с сначала падает в 3-6 раз по сравнению с 0,1 с, а затем наблюдается обратная картина: при 100 с это уменьшение составляет до 2 раз.

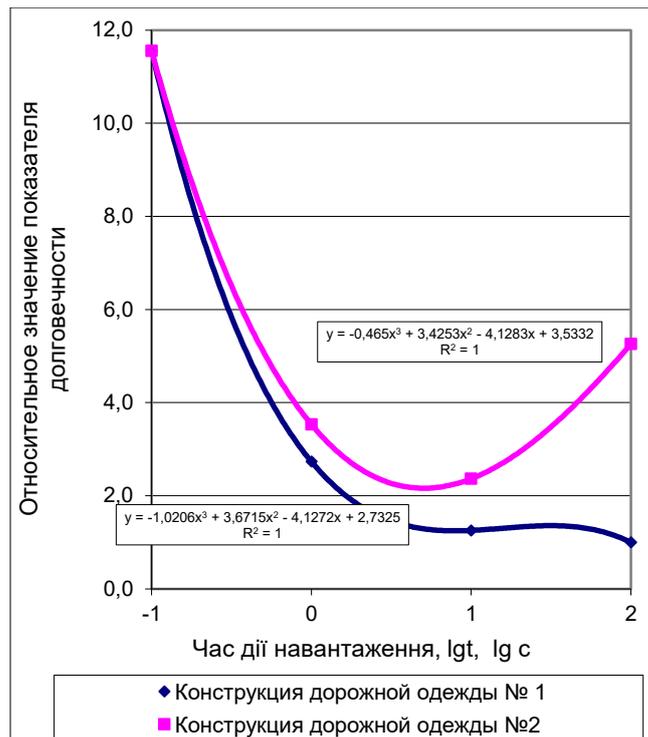
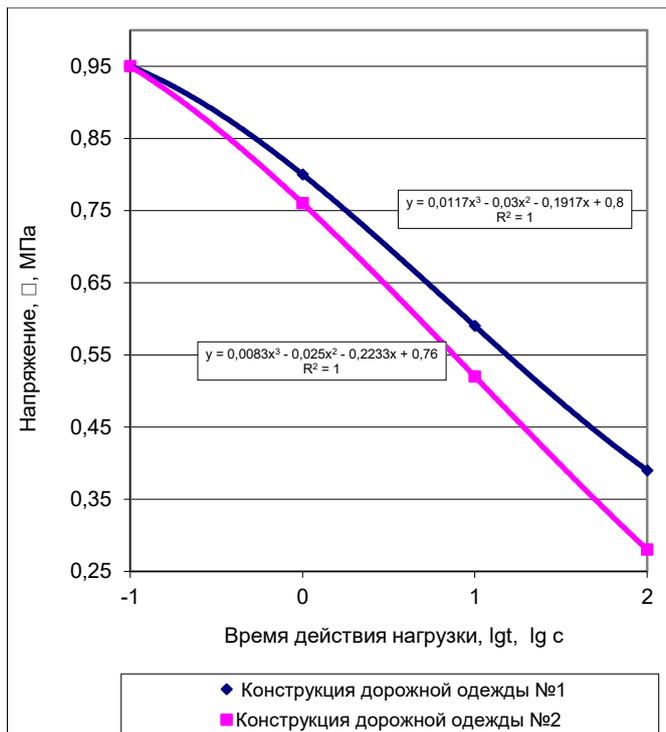
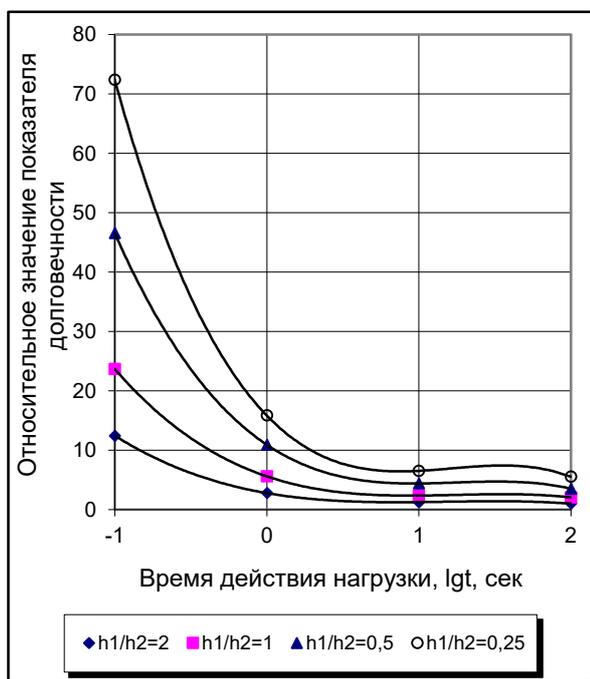


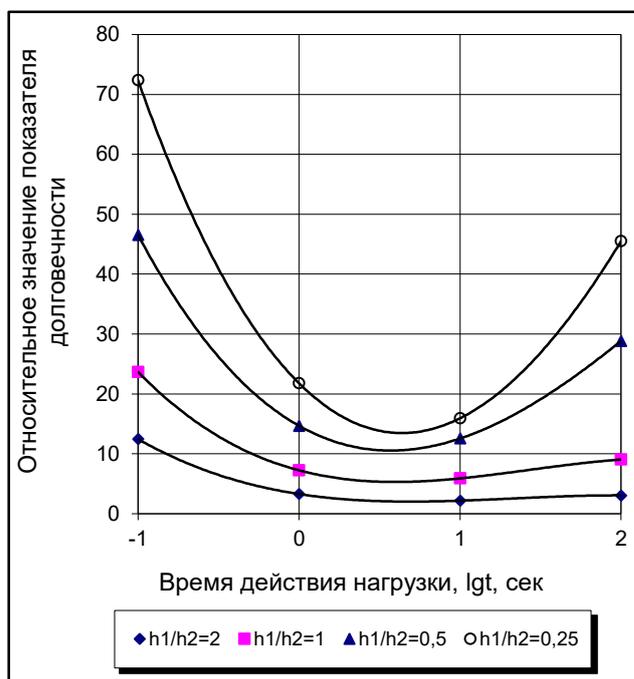
Рисунок 1 – Растягивающие напряжения в асфальтобетонных слоях

Рисунок 2 – Долговечность асфальтобетонных слоев

а)



б)



а – конструкция дорожной одежды № 1; б - конструкция дорожной одежды № 2

Рисунок 3 – Зависимость долговечности асфальтобетонных слоев в зависимости от соотношения толщин покрытия и основы

Детальное изучение влияния климатического и транспортного факторов на напряженное состояние асфальтобетонных слоев выяснило определенные особенности изменения горизонтальных нормальных растягивающих

напряжений, которые возникают на подошве  $\sigma_n$  и на поверхности  $\sigma_в$ . Для конструкции дорожной одежды № 1 отмечены следующие закономерности: с увеличением времени действия нагрузки при разных температурах наблюдается тенденция изменения  $\sigma_n$ ; наблюдается пропорциональное увеличение этих напряжений с увеличением интенсивности нагрузки  $p$ . Причем  $\sigma_n$  в большей мере зависит от  $p$  при малом времени действия нагрузки, чем при большом, также  $\sigma_n$  уменьшается при увеличении температуры. Например, при  $t_n=0,1с$   $\sigma_n(p=0,75)/\sigma_n(p=0,6)=1,3$ , а при  $t_n=100с$   $\sigma_n(p=0,75)/\sigma_n(p=0,6)=1,2$ . При  $T=20^{\circ}C$  эти показатели должны были отвечать значению 1,4; 1,05. Несколько иную закономерность изменения имеют  $\sigma_в$ . При температуре  $0^{\circ}C$  наблюдается уменьшение  $\sigma_в$  при изменении  $t_n$  от 0,1 до 10 с, а потом  $\sigma_в$  возрастает. При температуре  $+10^{\circ}C$  изменения  $\sigma_в$  характеризуются более явным минимумом при  $t_n=10$  с и тенденцией большего возрастания со следующим временем действия нагрузки. При температуре  $+20^{\circ}C$  наблюдается непрерывное возрастание  $\sigma_в$  с увеличением действия нагрузки от 0,1 до 100с. В зависимости от интенсивности нагрузки  $\sigma_в$  также увеличивается с его возрастанием и особенности этого изменения почти не зависят от времени действия нагрузки и температуры. То есть, действие транспортных большегрузных средств с увеличением времени действия нагрузки и температуры имеет большее влияние на поверхности, чем на подошве.

Для конструкций дорожной одежды № 2 прослеживаются другие закономерности изменения  $\sigma_n$ . При  $T=0^{\circ}C$   $\sigma_n$  также уменьшается при уменьшении времени действия нагрузки аналогично предыдущему анализу. Для  $T=+10^{\circ}C$  при времени действия нагрузки  $>10с$  горизонтальные растягивающие напряжения  $\sigma_n$  исчезают, а при  $T=+20^{\circ}C$  они вообще отсутствуют. По сравнению с конструкцией №1 конструкция № 2 более выигрышная относительно трещиностойкости асфальтобетонных слоев при действии  $\sigma_n$ . Изменение  $\sigma_в$  при разных температурах с увеличением времени действия нагрузки имеет постоянную тенденцию уменьшения растягивающих напряжений. Причем темпы изменения уменьшаются с увеличением температуры. Зависимость этих  $\sigma_в$  от  $p$  остается одинаковой при разной температуре и времени действия нагрузки в отличие от  $\sigma_n$ , для которых зависимость от  $p$  уменьшается с увеличением времени действия нагрузки и температуры.

Обращает также на себя внимание и то, что поверхностные растягивающие напряжения  $\sigma_в$  увеличивают свое влияние на возможность образования трещин

для рассмотренных вариантов конструкций с увеличением времени действия нагрузки и температуры.

Полученные результаты анализа влияния поверхностных растягивающих напряжений на трещиностойкость асфальтобетонных слоев объясняют причины возникновения трещин от усталости на некотором расстоянии от полосы наката, а особенно на перекрестках и остановках общественного транспорта.

### **Выводы**

1. В работе установлены аналитические зависимости для определения напряженного состояния асфальтобетонных слоев и оценки их предельного состояния по трещиностойкости с учетом: времени действия нагрузки; дифференциации условий работы по характеру нагрузки; характера распределения колес транспортных средств по ширине полосы движения; наличия горизонтальных растягивающих напряжений на поверхности слоя; климатических, конструктивно-материаловедческо-технологических и транспортных факторов.

2. Получены результаты числового анализа влияния транспортных, климатических и конструктивно-материаловедческо-технологических факторов. На основе предложенной классификации по термореологической чувствительности дорожно-строительные материалы разделены на группы: высокочувствительные, чувствительные, умеренночувствительные, низкочувствительные.

3. Показано, что использование в основаниях менее реологически чувствительных цементосодержащих материалов значительно улучшает долговечность дорожной одежды. Выявлены особенности изменения горизонтальных нормальных растягивающих напряжений, возникающих на подошве и на поверхности асфальтобетонных слоев для конструкции дорожной одежды с разной термореологической чувствительностью.

4. Асфальтобетонные покрытия дорожных одежд должны проектироваться с учётом расчётных характеристик асфальтобетона, полученных при длительности действия нагрузки более 0,1 с [8]. При конструировании дорожной одежды нижние слои покрытия или верхние слои основания желательно назначать из асфальтобетона (пористый, плотный или высокоплотный), имеющего повышенную прочность и устойчивость к многократным нагружениям. Для этих целей эффективно применение дисперсно-

армированного асфальтобетона. Нижние слои основания необходимо устраивать из материалов, обработанных неорганическим вяжущим.

### **Литература**

1. Бесараб О.М.. Підвищення тріщиностійкості асфальтобетонних шарів з врахуванням часу дії навантаження: Дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – К., 2003. – 252 с.

2. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: Дис. ... докт. техн. наук: 05.23.03. – К., 1982. – 552 с.

3. Мозговой В.В. Научные основы обеспечения температурной трещиностойкости асфальтобетонных покрытий: Дис. ... докт. техн. наук: 05.22.11 - К., 1996 – 406 с.

4. Приварников А.К., Радовский Б.С. Влияние вязко-упругих свойств и инерционных сил на поведение дорожной одежды под действием подвижной нагрузки.- Известия Вузов. Строительство и архитектура. 1980, №3, с.105-111.

5. Радовский Б.С., Руденский А.В. О связи между длительной и усталостной прочностью дорожно-строительных материалов. - В кн.: Автомобільні дороги і дорожні будівництво, Киев, 1975.

6. Радовский Б.С., Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд. Избранные труды. – Киев: ПолиграфКонсалтинг, 2003. - 260 с.

7. ВБН В.2.3-218-186-2004 Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу – К., Укравтодор, 2004. – 176 с.

8. ОДМ 218.2.065-2015 Методические рекомендации по увеличению межремонтных сроков службы нежестких дорожных одежд (Введены в действие с 27.01.2016 г.

#### **Рецензенти:**

Савенко В.Я., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Марчук О.В., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

#### **Reviewers:**

Savenko V, Ya., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Marchuk A. V., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **15.06.2017 р.**