

*Батракова А. Г., канд. техн. наук, доц.,**Урзлик С. Н., аспирант**Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН И ТОЛЩИНЫ СЛОЕВ ПОКРЫТИЯ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ

agbatr@mail.ru

Приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния дорожной одежды с подповерхностными трещинами в покрытии. Предложены направления практического применения результатов георадарной диагностики дорожных одежд в части определения суммарной толщины слоев покрытия, обеспечивающей снижение растягивающих напряжений при наличии подповерхностных трещин.

Ключевые слова: *дорожная одежда, напряженно-деформированное состояние, подповерхностные трещины.*

Введение. При диагностике дорожной одежды на этапе эксплуатации приоритетным показателем, характеризующим ее состояние, является прочность конструкции, оцениваемая по величине упругого прогиба. Вместе с тем, отказ дорожной одежды может наступать как вследствие снижения деформационных, так и прочностных показателей, а именно: накопления подповерхностных дефектов в монолитных слоях покрытия и укрепленных слоях основания, развития усталостных повреждений в монолитных слоях покрытия. На основании методов инструментальной оценки, применяемых в настоящее время при диагностике дорожных одежд, оценка по критерию сопротивления монолитных слоев покрытия растяжению при изгибе представляется затруднительной. Тогда как весьма актуальной является задача определения не только интегральных характеристик конструкции, но и вклада каждого слоя конструкции в итоговый результат, а также выяснение причин (или комплекса причин), вызвавших отклонения в характеристиках.

Наиболее распространенным методом получения информации о разрушениях и деформациях покрытия является метод визуальной оценки, осуществляемый с помощью видеосъемки [1]. При этом показатель дефектности покрытия принимается как один из основных параметров при назначении ремонтных мероприятий. Однако, как отмечают авторы работы [2], при расчете дефектности не учитывается характер трещин, ширина раскрытия, тогда как степень снижения прочности и срок службы дорожной одежды с различным характером трещин различны и требуют проведения различных ремонтных мероприятий. Вместе с тем, определение основных причин возникновения дефектов и реализация мероприятий, направленных на устранение этих причин, позволят максимально эффективно использовать материальные ресурсы.

Толщина конструктивных слоев дорожных одежд оказывает существенное влияние на несущую способность и надежность дорожных одежд [3]. Традиционно при диагностике автомобильных дорог толщина конструктивных слоев определяется по результатам отбора кернов из конструкции. Как и большинство методов точечной оценки характеристик слоев конструкции дорожной одежды, данный метод не позволяет судить об изменении толщины конструктивных слоев на протяженном участке дороги. Эффективным потенциалом для решения данной задачи обладают методы и средства подповерхностного зондирования, позволяющие осуществлять количественную оценку «скрытых» параметров, таких, например, как толщина конструктивных слоев и наличие подповерхностных дефектов – трещин, зон разуплотнения [4,5]. С практической точки зрения важно, что информация о внутренних параметрах, определяемых по результатам георадарного обследования, позволит назначать мероприятия по устранению причин возникновения деформаций и разрушений.

Постановка задачи. Для оценки состояния конструкций дорожных одежд по результатам георадарной диагностики и последующего назначения ремонтных мероприятий необходимо исследовать влияние подповерхностных трещин на показатели, характеризующие прочностное и деформационное состояние конструкции: общий эквивалентный модуль упругости конструкции, растягивающие напряжения, действующие в монолитных слоях конструкции.

Поскольку строгие аналитические решения получены для покрытий, содержащих сквозную трещину [6-7], для реализации поставленной задачи были проведены серии экспериментов по моделированию работы конструкций дорожных одежд с привлечением метода конечных элементов. В численных экспериментах по моделиро-

ванию напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды, содержащей подповерхностную трещину в слое покрытия, решалась задача оценки вертикальных перемещений и растягивающих напряжений в монолитных слоях дорожной одежды. Расчет проводился для моделей дорожной одежды, содержащих в нижнем слое покрытия трещину (на всю высоту слоя) различной ширины, и аналогичной конструкции без подповерхностных трещин (рис. 1). Ширина раскрытия трещины (Δ) варьировалась в диапазоне от 1 мм до 20 мм

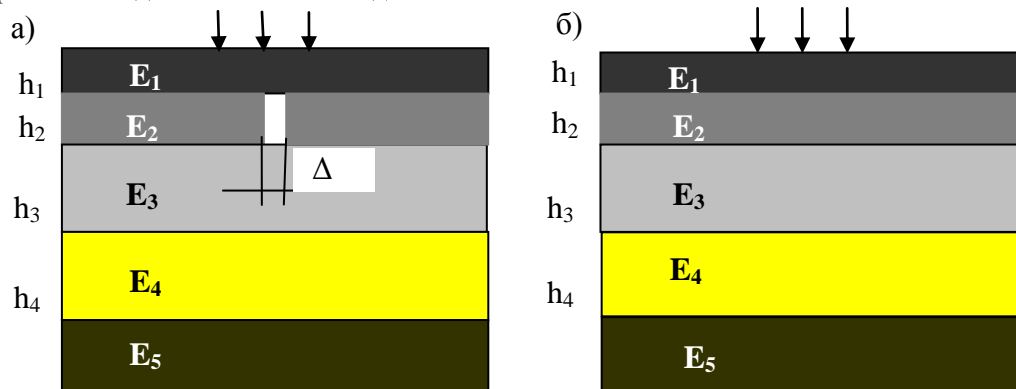


Рис. 1. Модели конструкции дорожной одежды а) с подповерхностной трещиной; б) без трещины

с шагом 1 мм. Параметры моделей расчета представлены в таблицах 1 – 2.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния принято статическое нагружение жестким круглым штампом с основными параметрами расчетной нагрузки: тип нагрузки $A_1 - 115$ кН, $A_2 - 100$ кН; давление на покрытие $p = 0,7$ МПа, $p = 0,6$ МПа; диаметр штампа равновеликого отпечатку следа колеса $D = 36,8$ см, $D = 37,0$ см.

Таблица 1

Параметры модели расчета вертикальных перемещений

Номер слоя	Толщина слоя, см	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
1 - покрытие	7	3200	0,35
2 - покрытие	7	2800	0,35
3 - основание	15	350	0,30
4 - основание	20	180	0,30
5 - грунт	-	71	0,32

Таблица 2

Параметры моделей расчета чаши прогиба и растягивающих напряжений

Номер слоя	Толщина слоя, см	Модуль упругости слоя, МПа		Коэффициент Пуассона
		Модель №1	Модель №2	
1 - покрытие	6	3200	2800	0,35
2 - покрытие	8	2800	2000	0,35
3 - основание	26	400	300	0,30
4 - грунт	-	68	47	0,32

Результаты численного моделирования. Расчет вертикальных перемещений на моделях конструкции дорожной одежды проводился на границе конструктивных слоев. Анализ полученных результатов (рис. 2) показал, что минимальные различия в величине вертикальных перемещений на верхней границе асфальтобетонного покрытия между конструкциями с подповерхностной трещиной и без трещины находятся в рамках погрешности метода измерений упру-

гого прогиба [8], что затрудняет их обнаружение при инструментальном измерении упругого прогиба конструкции по центру приложения нагрузки. Вместе с тем, наличие подповерхностных трещин приводит к анизотропии свойств исследуемой конструкции, поэтому задачу распределения вертикальных перемещений и растягивающих напряжений нельзя считать осесимметричной. Анализ вертикальных перемещений поверхности покрытия под действием

нагрузки для конструкций дорожных одежд, содержащих подповерхностную трещину, под-

твердил, что форма чаши прогиба не является симметричной.

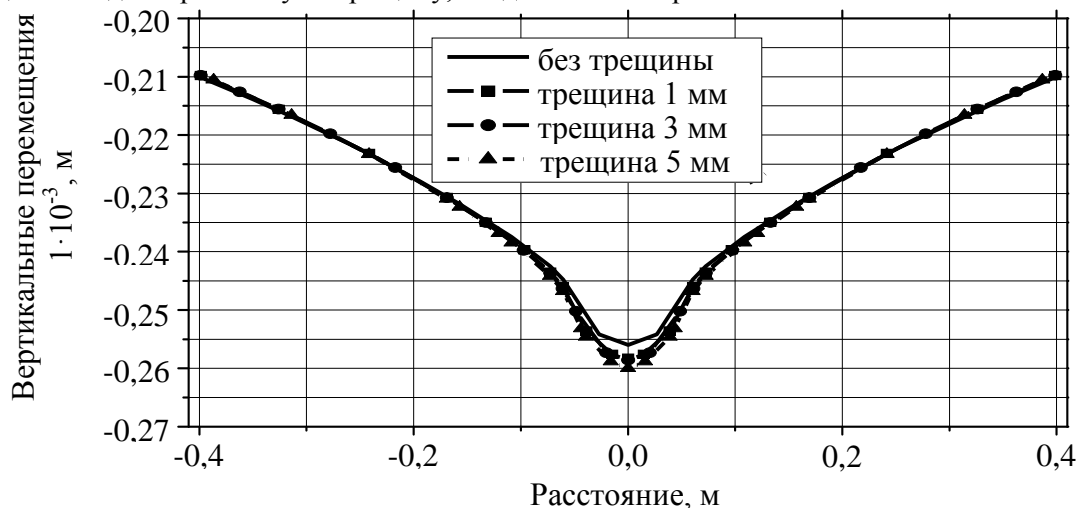


Рис. 2. Вертикальные перемещения на поверхности покрытия при различной ширине раскрытия подповерхностной трещины

По нормали к трещине на расстоянии от 20 см до 25 см от центра приложения нагрузки величина вертикальных перемещений конструк-

ции (рис. 3 а) более чем на 10 % – 15 % превышает вертикальные перемещения для конструкции без трещин.

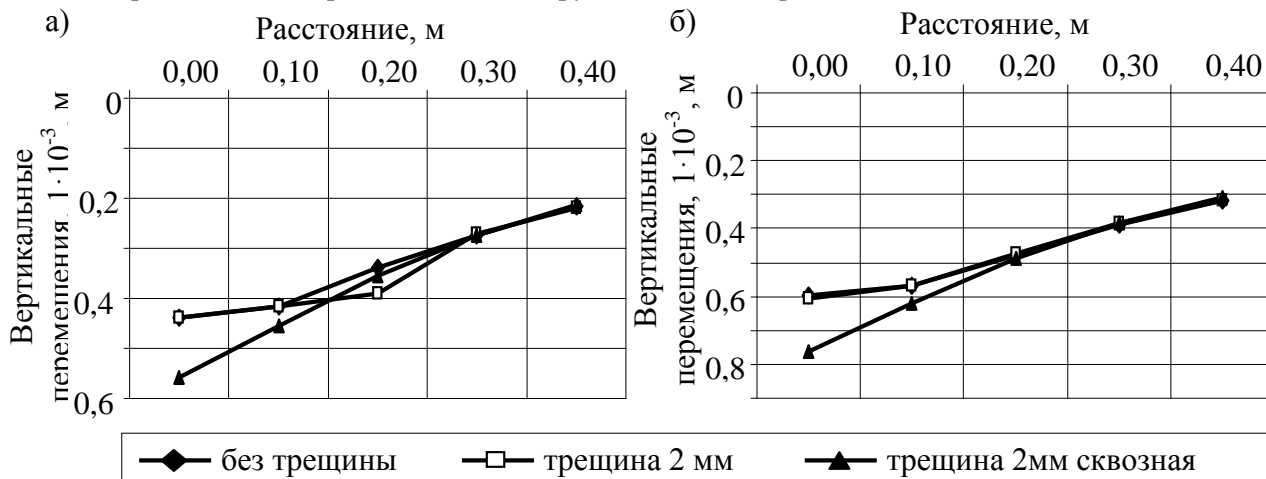


Рис. 3. Фрагмент чаши прогиба на разном расстоянии от центра приложения нагрузки а) для модель № 1 («прочная» конструкция); б) модель № 2 («слабая» конструкция)

Чем выше общий эквивалентный модуль упругости на поверхности основания, тем больше выражен эффект изменения формы чаши прогиба для конструкции, содержащей подповерхностную трещину. Для «слабых» конструкций (рис. 3 б) изменение формы чаши прогиба незначительно, поскольку основной вклад в общую деформацию вносит грунт земляного полотна. Таким образом, анализ формы чаши прогиба и величины вертикальных перемещений позволяет установить наличие и направление подповерхностной трещины, что может быть использовано при инструментальном измерении упругого прогиба на расстоянии 20 – 25 см от центра приложения нагрузки.

Результаты моделирования напряженно-

деформированного состояния конструкций дорожных одежд свидетельствуют, что растягивающие напряжения, действующие по нормали к трещине на границах слоев покрытия конструкции дорожной одежды в 2,0 – 2,5 раза превосходят напряжения, направленные вдоль трещины (рис. 4). Следовательно, при оценке состояния конструкции дорожной одежды необходимо в первую очередь учитывать напряжения, действующие по нормали к трещине.

Отметим, что характер и закономерности изменения растягивающих напряжений на границах монолитных слоев покрытия при наличии трещин различной ширины в нижнем монолитном слое существенно зависят от «капитальности» конструкции, то есть, обусловлены не

только шириной раскрытия трещины, но и деформационными характеристиками материалов слоев покрытия и основания, а также их толщиной (рис. 5). При моделировании напряженно-деформированного состояния конструкций разной капитальности средний модуль упругости покрытия рассчитывался по формуле:

$$E_{\text{ср_пок}} = \frac{\sum_{i=1}^2 E_i \cdot h_i}{\sum_{i=1}^2 h_i}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ср_пок}}$ – средний модуль упругости покрытия, МПа; E_i – модуль упругости i -го слоя покрытия, МПа; h_i – толщина i -го слоя покрытия, см.



Рис. 4. Связь максимальных напряжений на границах слоев конструкции с шириной раскрытия трещины (модель № 1)

Общий эквивалентный модуль на поверхности основания ($E_{\text{основ}}$) рассчитывался согласно [8]. Из проведенных расчетов следует, что для конструкций дорожных одежд с отноше-

нием $E_{\text{ср_пок}}/E_{\text{основ}}$, не превышающим 10, толщина пакета монолитных слоев оказывает незначительное влияние на растягивающие напряжения.

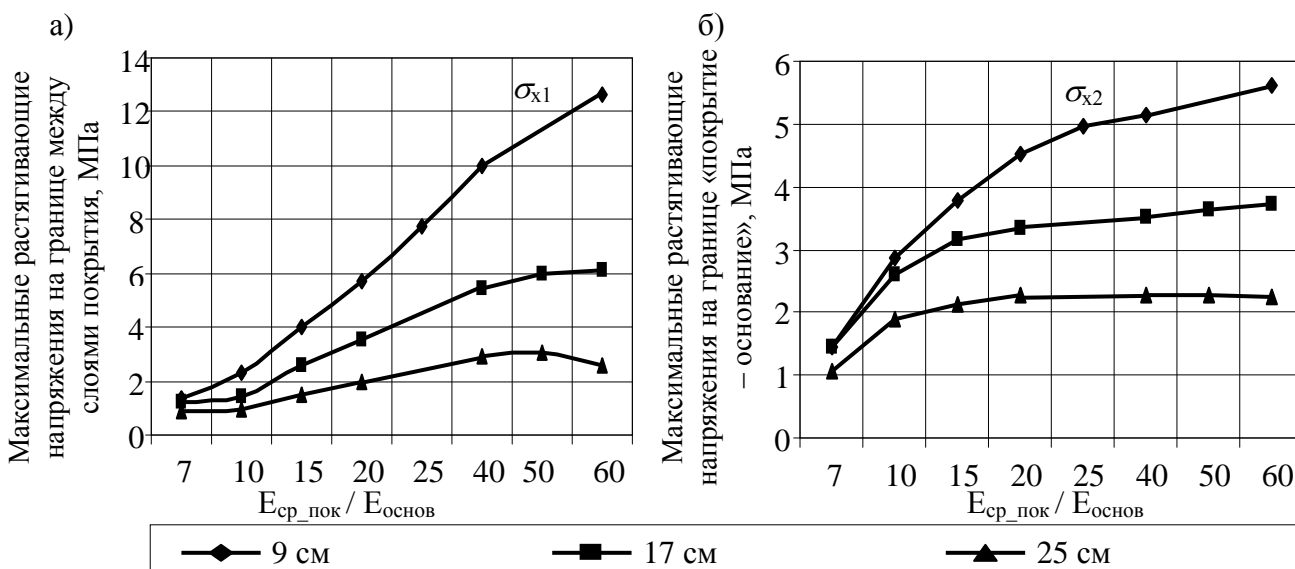


Рис. 5. Связь растягивающих напряжений на границах слоев покрытия с отношением среднего модуля покрытия к общему эквивалентному модулю основания. Цифры у кривых – толщина монолитных слоев покрытия. Трещина 2 мм

Так, увеличение толщины пакета монолитных слоев на 89 % приводит к уменьшению растягивающих напряжений на 12 %. В данном случае вертикальные деформации и напряжения обусловлены высокой прочностью конструкции дорожной одежды. При дальнейшем увеличении указанного отношения $E_{\text{ср_пок}}/E_{\text{основ}} = 40$, то есть фактическом уменьшении общего эквивалентного модуля основания, аналогичное увеличение толщины пакета монолитных слоев приводит к значительному снижению растягивающих напряжений в покрытии на 45 %. Следовательно, при расчетах усиления дорожной одежды наибольший эффект по критерию снижения растягивающих напряжений в покрытии, может быть получен при увеличении толщины покрытия в дорожных одеждах, характеризующихся отношением $E_{\text{ср_пок}}/E_{\text{основ}} = 20$ и более.

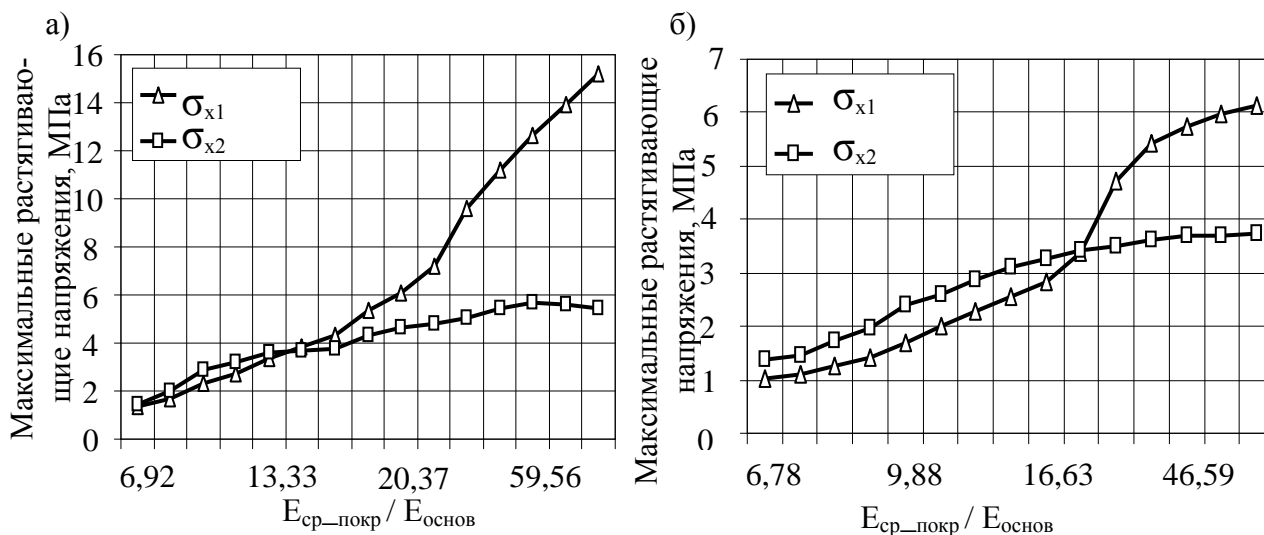


Рис. 6. Связь максимальных растягивающих напряжений с отношением модуля покрытия к эквивалентному модулю основания для конструкций разной прочности
а) толщина слоев покрытия 9 см; б) толщина слоев покрытия 17 см

Следовательно, одним из путей снижения растягивающих напряжений между слоями покрытия при проведении работ по устройству слоев усиления на старом покрытии, имеющем трещины, является обоснование толщины слоя усиления при известных значениях $E_{\text{ср_пок}}/E_{\text{основ}}$ из условия $\sigma_{x1} < \sigma_{x2}$ (рис. 7).

Поскольку модели конструкций дорожных одежд без подповерхностных трещин достаточно хорошо апробированы, они не нуждались в экспериментальной проверке. Вместе с тем, модели дорожных одежд, содержащие подповерхностные трещины, требуют экспериментальной проверки [9] ввиду неустойчивости получаемых решений. Экспериментальная проверка адекватности расчетных моделей показала, что расчетные модели с 95 % доверительной вероятностью описывает изучаемый процесс, поскольку экс-

периментальное значение критерия Фишера ($K_{\text{фз}}$) меньше теоретического значения ($K_{\text{фт}}$), то есть $K_{\text{фз}} = 1,099 < K_{\text{фт}} = 8,85$. Следовательно, результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций дорожных одежд, содержащих подповерхностную трещину в нижнем слое покрытия, в основу которого положены результаты георадарного обследования дорожных одежд, могут быть использованы для оценки их состояния.

Анализ результатов расчета максимальных растягивающих напряжений на границах слоев покрытия, содержащего подповерхностную трещину с шириной раскрытия 2 мм, позволяет установить соотношение $E_{\text{ср_пок}}/E_{\text{основ}}$, при котором растягивающие напряжения между слоями покрытия превышают растягивающие напряжения на границе «покрытие – основание» (рис. 6). Характерно, что это отношение увеличивается по мере увеличения «капитальности» конструкции – толщины пакета асфальтобетонных слоев. В области значений $E_{\text{ср_пок}}/E_{\text{основ}}$, где растягивающие напряжения между слоями покрытия (σ_{x1}) превышают растягивающие напряжения на границе «покрытие – основание» (σ_{x2}) создаются дополнительные условия для развития процесса трещинообразования.

Выводы. Представленные результаты демонстрируют общий подход к оценке фактического состояния конструкции по результатам георадарной диагностики дорожных одежд не жесткого типа с целью назначения ремонтных мероприятий, адекватных фактическому состоянию дорожных одежд.

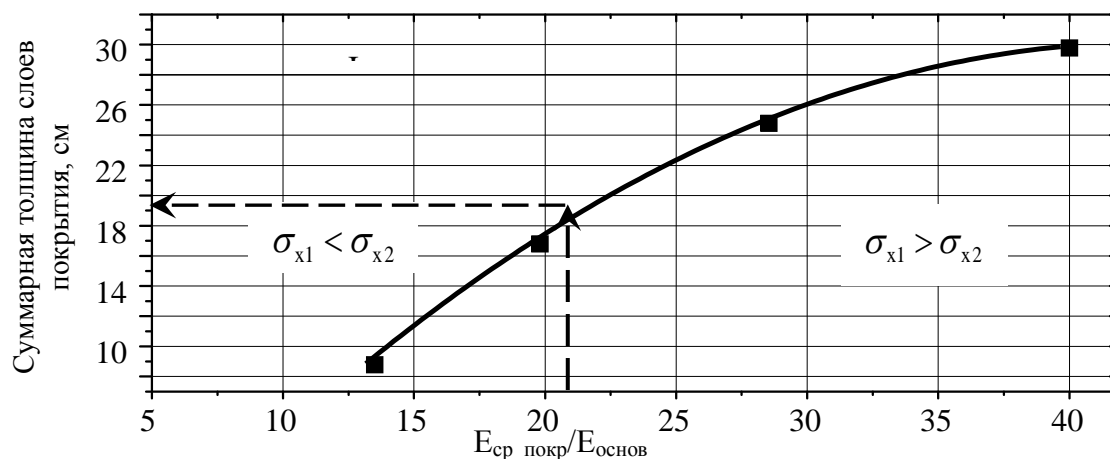


Рис. 7. Определение суммарной толщины слоев покрытия, обеспечивающей снижение растягивающих напряжений при наличии трещины в нижнем слое покрытия (расчет проведен для трещины 2 мм)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автомобильные дороги. Оценка и регистрация состояния дорожных покрытий и технических средств автомобильных дорог автоматизированными системами видеодиагностики: СОУ 45.2-00018112-080:2011. К. : Укравтодор, 2012. 45 с.

2. Буртыль Ю.В., Леонович И.И. Совершенствование методов оценки транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог // Автомобильные дороги и мосты. 2010. № 8. С. 95–105.

3. Гамеляк І.П., Цимбал М.А. Вплив товщини асфальтобетонного покриття на надійність конструкції дорожнього одягу // Вісник Національного транспортного університету. 2008. № 17. Ч. 2. С. 1–10.

4. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллективная монография / [под ред. А.Ю. Гринева]. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.

5. Кулижников А.М., Шабашева М.Л. Гео-

радары в дорожном строительстве // Автомобильные дороги: Обзорная информация. М. : Информавтодор, 2000. 51 с.

6. Westergaard H.M. New formulas for stresses in concrete pavements of airfields // Transactions. A.S.C.E. 1947. P. 68-701.

7. Радовский Б.С. Теоретические основы конструирования и расчета нежестких дорожных одежд на воздействие подвижных нагрузок: автореф. дис. доктора техн. наук. Москва, 1982. 35 с.

8. Сооружения транспорта. Дорожная одежда нежесткого типа: ВБН В.2.3-218-186-2004. К.: Укравтодор, 2004. 176 с.

9. Мерзликин А.Е., Капустников Н.В. Моделирование упругого однородного и двухслойного полупространства применительно к задачам по расчёту дорожных одежд методом конечных элементов [Электронный ресурс] // Дороги и мосты. Вып. 25. С. 63–72. URL: <http://rosdornii.ru/features-mainmenu-47/-q-q/204-25---q--q>