

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД СО СКВОЗНЫМИ ТРЕЩИНАМИ В ПОКРЫТИИ

Батракова А. Г.¹, Урдзик С. М.¹, Батраков Д. О.²

¹ Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

² Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина

Аннотация. Рассмотрены возможности оценки геометрических параметров сквозных трещин в верхних слоях конструкций дорожных одежд нежесткого типа и влажности в нижних слоях конструкции под трещиной по данным георадарного обследования. Предложен подход к учету влияния трещин в покрытии на несущую способность конструкции дорожной одежды, опирающийся на результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды с привлечением метода конечных элементов.

Ключевые слова: конструкция дорожной одежды, сквозные трещины, георадарные методы, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Приоритетными показателями, характеризующими состояние дорожной одежды, является прочность конструкции, определяемая по величине упругого прогиба, а также дефектность покрытия. Являясь интегральной характеристикой состояния конструкции, эти показатели, вместе с тем, не учитывают характер трещин, их локализацию и геометрические параметры, в значительной степени определяющие степень снижения прочности и срок службы дорожной одежды. До недавнего времени анализ влияния трещин на характеристики конструкций дорожных одежд (КДО) нежесткого типа отсутствовал по двум основным причинам: отсутствия средств неразрушающего контроля, позволяющих в режиме реального времени обнаруживать такие разрушения и невозможности проведения точных расчётов напряженно-деформированного состояния (НДС) покрытия при наличии трещин. В настоящее время прогресс в области вычислительной техники и программного обеспечения открывает возможности для проведения численных расчетов НДС конструкций дорожных одежд при наличии трещин. Разумеется, такие расчеты требуют значительных вычислительных ресурсов и обоснования математических моделей. С другой стороны, успехи в развитии электроники и радиофизики способствовали внедрению георадаров в систему диагностики дорожных одежд, что открыло дополнительные возможности обнаружения, позиционирования и идентификации подповерхностных трещин при движении лаборатории.

Анализ публикаций

Актуальность задачи получения информации о параметрах КДО средствами неразрушающей диагностики и последующей оценки состояния КДО стимулировала развитие исследований в нескольких направлениях. Первое направление исследований ориентировано на развитие технических средств неразрушающей диагностики, в том числе георадаров, и методов интерпретации результатов диагностики [1–4]. Отраженные от дорожных одежд сверхширокополосные (СШП) импульсные сигналы позволяют получить информацию о внутренних параметрах исследуемого объекта, например о толщине и влажности слоев КДО [5], которая недоступна при использовании других средств неразрушающей диагностики или не может быть получена традиционным отбором кернов в силу технологии производства работ [6].

Второе направление исследований связано с развитием методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) исследуемых конструкций. Для проведения численного моделирования НДС дорожных одежд помимо традиционных методов расчёта на основе полуэмпирических моделей [7–9] широкое распространение получили численные алгоритмы на основе метода конечных элементов (МКЭ) [10–12]. Сюда относят численные методы решения дифференциальных уравнений: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объёмов, основанные на дискретизации соответствующих

уравнений [13]. В случае анализа деформационных характеристик дорожных одежд основное уравнение отражает обобщённый закон Гука [14]. Естественно, что такой анализ опирается на фундаментальные понятия теории упругости – модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Однако применение этих уравнений к описанию свойств материалов, применяемых в дорожной отрасли, требует большой осторожности. Это обусловлено, в первую очередь, температурной зависимостью упругих характеристик асфальтобетона. К другим материалам, используемым в дорожном строительстве, – щебень, песок, грунт применение упругих моделей требует ещё более аккуратного применения. Тем не менее, в силу сложившейся практики, наличия нормативных документов и накопленного практического опыта именно эти модели могут рассматриваться в качестве перспективных, особенно при условии их объединения с эмпирическими результатами.

Цель и постановка задачи

В работе [15] отмечено, что трещины различной конфигурации и глубины являются наиболее распространённым видом разрушений нежестких дорожных покрытий. При этом одиночные трещины могут иметь как продольное, так и поперечное направление (рис. 1). Основная задача неразрушающего контроля в этом случае, помимо контроля проектных параметров (толщины слоёв конструкции), заключается в обнаружении, позиционировании и оценке влияния трещин (сквозных и подповерхностных) на техническое состояние КДО.



Рис. 1. Асфальтобетонное покрытие городской улицы: 1 – продольные трещины; 2 – поперечные трещины

Поэтому данная работа посвящена решению следующих задач:

- рассмотреть способы позиционирования и идентификации трещин, а также оценки

влажности в нижних слоях конструкции под трещиной с привлечением данных георадарного обследования;

- разработать численные модели для оценки влияния сквозных трещин на напряжённо-деформированное состояние и несущую способность КДО.

Целью работы является разработка подхода к оценке состояния дорожных одежд с трещинами в покрытии, опирающегося на результаты георадарной диагностики и численное моделирование НДС нежестких дорожных одежд с привлечением метода конечных элементов. Данная статья является первой в серии статей, посвящённых использованию современных радиофизических технологий совместно с новыми достижениями в области компьютерного моделирования для решения актуальной проблемы – оценки и прогнозирования состояния КДО как основы обеспечения нормативного технико-эксплуатационного состояния КДО в течение срока службы.

Получение и анализ первичных данных

Моделирование процесса мониторинга КДО проводилось на моделях КДО с применением георадара «Одяг-1» (рис. 2).



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Для правильной с электродинамической точки зрения постановки задачи были привлечены лабораторные модели, воспроизводящие как поперечные, так и продольные трещины (рис. 3). Верхний слой модели, моделирующий покрытие со сквозной трещиной, представляет собой два слоя мелкозер-

нистого асфальтобетона толщиной 6,0 и 5,8 см, второй слой модели представлен рядовым гранитным щебнем фракции 5–20 мм, третий слой толщиной 20 см состоит из суглинка тяжелого пылеватого. Размер модели обосновывался из условия отсутствия краевых эффектов при георадарном зондировании и составлял 600 x 100 см.



Рис. 3. Лабораторная модель, воспроизводящая поперечные трещины

Экспериментальные исследования проводились на модели КДО без увлажнения и модели, в которой подстилающий грунт (третий слой модели) был увлажнен через трещину. Георадарное зондирование, первичная обработка и интерпретация полученных радарограмм проводились в соответствии с разработанными авторами алгоритмами калибровки и первичной обработки георадарных данных [3, 16]. На первом этапе после выполнения стандартных операций (вычитание сигнала прямого прохождения и обработка синтезированных импульсов) были получены следующие значения (рис. 4): диэлектрическая проницаемость (ϵ_1) и толщина слоя покрытия с трещиной (h_1) $\epsilon_1 = 6,8$, $h_1 = 12,2$ см; диэлектрическая проницаемость (ϵ_2) и толщина слоя основания из щебня (h_2) $\epsilon_2 = 4,0$, $h_2 = 12,5$ см; диэлектрическая проницаемость сухого грунта (ϵ_3) $\epsilon_3 = 2,9$, соответствующая влажности $0,62 W_T$. После увлажнения конструкции через трещину и проведения аналогичных измерений получены следующие результаты: диэлектрическая проницаемость (ϵ_1) и толщина слоя покрытия с трещиной (h_1) $\epsilon_1 = 6,8$, $h_1 = 12,1$ см; диэлектрическая проницаемость (ϵ_2) и толщина слоя основания из щебня (h_2) $\epsilon_2 = 4,0$, $h_2 = 12,8$ см; диэлектрическая проницаемость влажного грунта (ϵ_3) $\epsilon_3 = 7,2$, соответствующая влажности $0,75 W_T$.

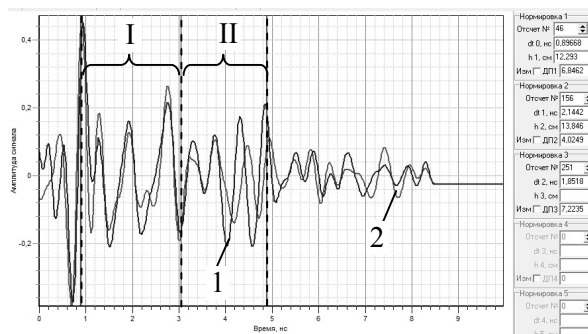


Рис. 4. Обработка и анализ сигналов георадара при разной влажности конструкции: 1 – сухая конструкция; 2 – влажная конструкция

Визуальный анализ отраженных сигналов свидетельствует, что в области I (рис. 4) между вертикальными маркерами, ограничивающими диапазон от 1 до 3 нс сигналы имеют подобную форму, что свидетельствует об одинаковых параметрах влажной и сухой КДО. В области II (рис. 4), ограниченной диапазоном от 3 до 4.9 нс форма сигналов существенно отличается, что свидетельствует об отличиях параметров слоя.

Оценка достоверности полученных значений влажности грунта проводилась стандартным термовесовым методом.

Таким образом, в данной серии экспериментов была решена основная задача первого этапа исследований – получение и анализ первичных данных о геометрических параметрах исследуемой конструкции дорожной одежды и влажности подстилающего грунта на основании обработки данных георадарного зондирования.

Анализ влияния ширины трещины и влажности

Расчёт НДС конструкций со сквозными трещинами разной ширины проводился с применением метода конечных элементов (МКЭ). Целью первого этапа исследований являлась оценка влияния положения нагрузки относительно трещины для выявления наиболее опасного с точки зрения НДС положения нагрузки (рис. 5).

В качестве вычислительной модели использовался прямоугольный представительский объем размером в плане 400 x 200 см и высотой 107 см. Для выявления принципиальных особенностей влияния сквозных трещин была создана относительно простая модель, включающая верхний слой покрытия толщиной 12 см (модуль Юнга материала

2600 МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$); промежуточный слой толщиной 25 см (модуль Юнга материала 1500 МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,30$); нижний слой основания толщиной 70 см (модуль Юнга материала 200 МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,32$). В качестве нагрузки использовалась модель колеса в виде эластичного тонкого цилиндра диаметром 35 см, к наружной поверхности которого равномерно приложено давление 0,8 МПа.

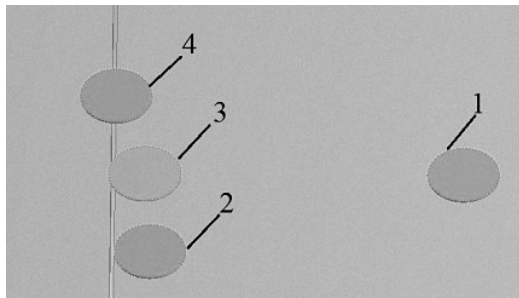


Рис. 5. Расположение нагрузки относительно трещины: 1 – без трещины; 2 – на краю трещины; 3 – частичное смещение на трещину; 4 – симметрично относительно трещины

Результаты расчётов показали (табл. 1), что наиболее неблагоприятным является расположение нагрузки с частичным перекрытием трещины (вариант 3), поэтому на следующих этапах моделирования НДС рассматривалось именно это положение нагрузки.

Таблица 1 – Параметры НДС конструкции с трещиной

Параметры НДС конструкции	Изменение параметров НДС при различных вариантах расположения нагрузки, %			
	1	2	3	4
Максимальные главные напряжения на нижней границе покрытия	100	115	184	141
Максимальные напряжения сдвига в промежуточном слое основания из несвязанных материалов	100	190	235	173
Максимальные напряжения сдвига на верхней границе грунтового основания	100	149	161	117

Рабочей гипотезой второго этапа исследований являлось предположение, что при

наличии сквозных трещин в покрытии возрастает влажность нижних слоев основания (грунта) в локальной зоне, расположенной под трещиной, вследствие проникновения воды через трещины в покрытие в нижние слои основания и подстилающий грунт. Вследствие наличия в нижнем слое КДО локальной зоны повышенной влажности изменяется НДС конструкции дорожной одежды.

Для проведения вычислительных экспериментов по моделированию влияния влажности нижнего слоя конструкции была создана максимально гибкая базовая модель, позволяющая быстро адаптировать параметры материалов под необходимые значения. Представительский объем модели имел внешние размеры 400 x 200 x 107 см. Модули упругости материалов слоёв (E_i) и коэффициент Пуассона (μ_i) имели значения:

– верхний слой покрытия толщиной 12 см: $E_1 = 2600$ МПа, $\mu = 0,35$, материал слоя – асфальтобетон;

– слой основания толщиной 25 см: $E_2 = 200$ МПа, $\mu = 0,30$; материал слоя – щебень рядовой;

– нижний слой подстилающего грунта толщиной 70 см: модуль упругости (E_3) изменяется в зависимости от влажности грунта от 75 до 40 МПа, $\mu = 0,32$; материал слоя – суглинок тяжелый пылеватый.

В качестве модели статической нагрузки принят цилиндрический штамп (отпечаток колеса автомобиля) диаметром 34 см, высотой 1 см с нагрузкой на внешнюю плоскость в виде равномерно распределённого давления 0,8 МПа.

Для оптимизации потребления машинных ресурсов (различного шага сетки) два верхних слоя были разделены на сегменты с одинаковым модулем упругости и коэффициентом Пуассона и различным размером элементов (рис. 6). Размер элементов модели изменялся в зависимости от близости к нагрузке. В частности, для ближних секторов верхнего слоя элементы имели размер 5 см, для слоя основания – 7 см, для подстилающего грунта – 8 см. В нижних слоях были выделены «вставки» в виде прямоугольных параллелепипедов (box) для обеспечения минимального потребления машинных ресурсов. Размеры элементов обосновывались исходя из условия, что уменьшение размера элемента приводит к увеличению времени расчета, практически не влияя на результат расчета НДС конструкции дорожной одежды.

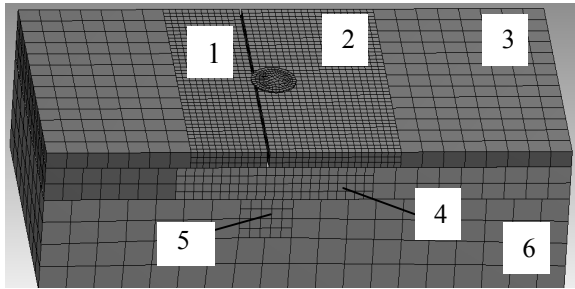


Рис. 6 – Модель для расчета НДС: 1 – сегмент модели слева от трещины; 2 – сегмент модели справа от трещины; 3 – основное тело модели слоя покрытия; 4 – сегмент слоя основания под трещиной; 5 – сегмент слоя грунтового основания повышенной влажности под трещиной; 6 – основное тело модели грунтового основания

На нижней грани представительского объёма были заданы условия неподвижного типа (fixed support), на боковых наружных гранях – условия скользящего типа (frictionless support). Последние подразумевают возможность перемещения материала вдоль наружной поверхности без изменения общего объёма. На боковой грани цилиндра нагрузки заданы условия вида цилиндрической «поддержки» (cylindrical support). Эти условия обеспечивают равномерность распределения нагрузки и предотвращение нарушения контакта на части покрытия слева от трещины (рис. 7).

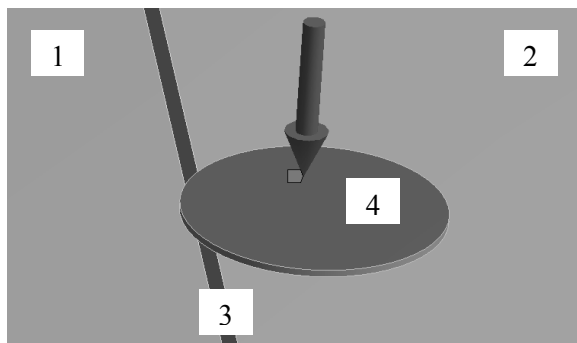


Рис. 7. Модель нагрузки: 1 – сегмент модели слева от трещины; 2 – сегмент модели справа от трещины; 3 – трещина; 4 – равномерно распределенная нагрузка с диаметром равновеликим отпечатку следа колеса

В качестве оптимальной (компромиссной) модели описания взаимодействия нагрузки с поверхностью покрытия была принята модель контакта с трением и коэффициентом

трения равным 0,3, что соответствует взаимодействию влажного асфальтобетона и колеса автомобиля (Frictional).

В соответствии с общими критериями теории прочности [17] дорожных одежд нежёсткого типа проводилось моделирование и расчёт следующих параметров:

- общий прогиб КДО под нагрузкой;
- растягивающие напряжения на подошве (нижней поверхности) покрытия;
- активные напряжения сдвига в слоях из несвязных материалов и подстилающем грунте.

Подчеркнём, что значения растягивающих напряжений на нижней поверхности покрытия в такой постановке задачи оказываются численно равными главным напряжениям (principal stress) на нижней поверхности слоя покрытия. Это требование относится к так называемой третьей гипотезе прочности [18], согласно которой причиной разрушения материала являются наибольшие касательные напряжения. Максимальное касательное напряжение для заданного объёмного напряжённого состояния τ_{\max} и эквивалентного ему линейного напряжённого состояния τ_{eq} одинаковы [17]:

$$\tau_{\max} = \tau_{eq} . \quad (1)$$

Формула наибольшего касательного напряжения при объёмном напряжённом состоянии, связывающая первое σ_1 и третье σ_3 главные напряжения, известна из теории упругости [17]:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 . \quad (2)$$

Эквивалентное напряжение при одноосном растяжении [17]:

$$\tau_{eq} = \sigma_{eq} / 2 . \quad (3)$$

В таком случае условие прочности записывается в виде [17]:

$$\sigma_{eq}^{(3)} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq |\sigma| . \quad (4)$$

Активные напряжения сдвига (τ) в слоях из несвязных материалов и подстилающем грунте должны удовлетворять условию связи допустимого напряжения сдвига, которое обусловлено сцеплением в грунте или мате-

риале (τ_∂) и коэффициента запаса прочности (K_{pr}):

$$\tau \leq \tau_\partial \cdot K_{pr}. \quad (5)$$

Влияние трещины на несущую способность КДО может быть учтено в расчетах путем уменьшения толщины слоя покрытия, содержащего трещину, а также через коэффициент концентрации напряжений.

В первом случае влияние трещины на цилиндрическую жесткость покрытия предложено учитывать коэффициентом K_h , определяемым по формуле [18]:

$$K_h = \sqrt[3]{\frac{w_{in}}{w_{cr}}}, \quad (6)$$

где w_{in} , w_{cr} – соответственно прогиб покрытия без трещины и с трещиной.

Тогда снижение несущей способности КДО учитывается путем приведения фактической толщины слоя покрытия без трещины (h_{in}) к эквивалентной толщине слоя покрытия с трещинами (h_{cr}) по формуле [18]:

$$h_{cr} = h_{in} \cdot K_h. \quad (7)$$

Таким образом, результаты моделирования общего прогиба конструкции (рис. 8), позволяют определить коэффициент влияния трещины на цилиндрическую жесткость покрытия (6) и эквивалентную толщину слоя покрытия с трещинами (7).

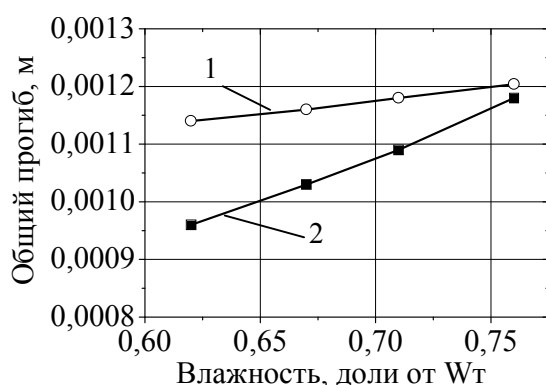


Рис. 8. Связь общего прогиба на поверхности покрытия с влажностью грунта: 1 – конструкция с трещиной; 2 – конструкция без трещины

Как свидетельствуют результаты расчетов (рис. 9), наличие трещины в покрытии уменьшает эквивалентную толщину слоя по-

крытия на 5,5 %. При значительном увеличении влажности грунта (до 0,75 Wт) трещины в покрытии практически не оказывают влияния на изменение несущей способности КДО, поскольку основной вклад в общий прогиб конструкции в этом случае вносят деформации подстилающего грунта.

Предположим, что единственным источником увлажнения грунта является вода, поступающая через трещину в покрытие. Тогда влажность грунта в конструкции без трещины не изменяется. В этом случае увеличение влажности грунта в конструкции с трещиной приводит к уменьшению толщины слоя покрытия на 8 % (рис. 9).

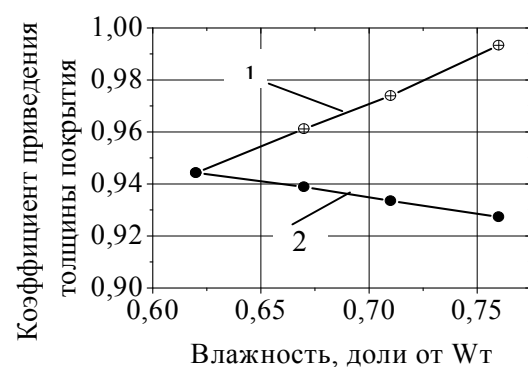


Рис. 9. Зависимость коэффициента приведения толщины покрытия от влажности грунта: 1 – влажность увеличивается в конструкции без трещины и в конструкции с трещиной; 2 – в конструкции без трещины влажность не увеличивается

Таким образом, влияние одиночной трещины на несущую способность КДО учитывается путем уменьшения толщины слоя покрытия от 5,5 до 8 %.

Рассмотрим возможность учета наличия трещины в покрытии через напряжения, действующие в КДО. Очевидно, что наличие сквозной трещины в покрытии приводит к уменьшению максимальных главных напряжений на нижней подошве пакета монолитных слоев покрытия (рис. 10).

При этом изменение влажности грунта оказывает большее влияние на максимальные главные напряжения в покрытии без трещины.

С другой стороны, как свидетельствуют результаты моделирования НДС, наличие трещины в покрытии приводит к существенному (более 200 %) увеличению напряжений сдвига в промежуточных слоях из слабо связанных материалов (рис. 11) и подстилающем грунте (рис. 12).

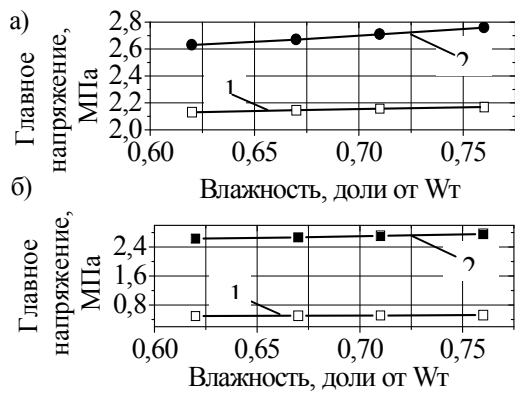


Рис. 10. Связь максимальных главных напряжений на нижней границе покрытия с влажностью грунта: а – справа от трещины; б – слева от трещины; 1 – конструкция с трещиной; 2 – конструкция без трещины

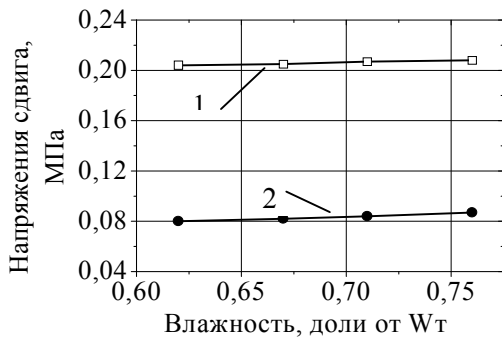


Рис. 11. Связь максимальных сдвигающих напряжений в промежуточном слое основания из несвязанных материалов с влажностью грунта: 1 – конструкция с трещиной; 2 – конструкция без трещины

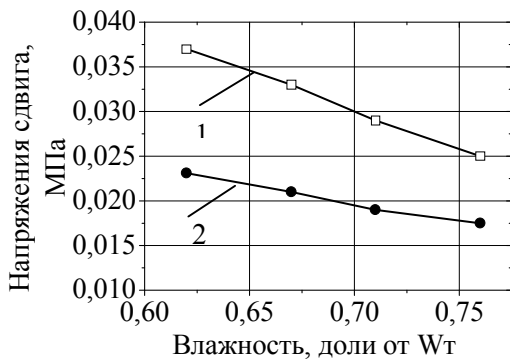


Рис. 12. Связь максимальных сдвигающих напряжений на верхней границе грунтового основания с влажностью грунта: 1 – конструкция с трещиной; 2 – конструкция без трещины

В этом случае стандартным инструментом описания изменения несущей способности КДО на участке, содержащей трещину в покрытии, является коэффициент «концентрации напряжений», определяемый как отно-

шение напряжений в конструкции с трещиной к напряжениям в конструкции без трещины ($k_{кн}$). Применим этот подход к описанию влияния трещины в покрытии на несущую способность КДО. Предположим по аналогии, что в нашем случае этот коэффициент равен отношению максимальных сдвигающих напряжений (τ^{mp}) в слоях из несвязанных материалов и подстилающем грунте в конструкции с трещиной к максимальным сдвигающим напряжениям (τ) в слоях из несвязанных материалов и подстилающем грунте в конструкции без трещины:

$$k_{кн} = \frac{\tau^{mp}}{\tau} \tag{8}$$

Тогда запишем условие прочности по критерию сдвига в грунтах земляного полотна и слоях из несвязанных материалов (5) в следующем виде:

$$\tau^{mp} \leq \tau_{\partial} \cdot K_{pr} \tag{9}$$

или

$$\tau \leq \tau_{\partial} \cdot \frac{K_{pr}}{k_{кн}} \tag{10}$$

Согласно результатам расчетов (рис. 13), наличие трещины в покрытии может быть учтено путем уменьшения допустимого напряжения сдвига в слоях из несвязанных материалов в 2,5–2,4 раза.

Рассмотрим второй предельный случай, когда единственным источником увлажнения грунта является вода, поступающая через трещину в покрытии, а влажность грунта в КДО без трещины не изменяется. В этом случае увеличение влажности грунта в конструкции с трещиной приводит к уменьшению допустимого напряжения сдвига в слоях из несвязанных материалов в 2,5–2,6 раза (рис. 13).

Для подстилающего грунта наличие трещины в покрытии следует учитывать путем уменьшения допустимого напряжения сдвига в грунте в 1,6–1,4 раза при наличии нескольких источников увлажнения (изменение влажности грунта в КДО без трещины и в КДО с трещиной в покрытии), а при наличии одного источника увлажнения через трещину в покрытии – в 1,6–1,1 раза (рис. 14).

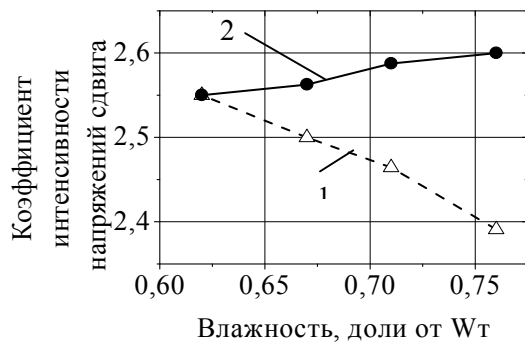


Рис. 13. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений сдвига в промежуточном слое основания из несвязанных материалов от влажности грунта: 1 – влажность увеличивается в конструкции без трещины и в конструкции с трещиной; 2 – в конструкции без трещины влажность не увеличивается

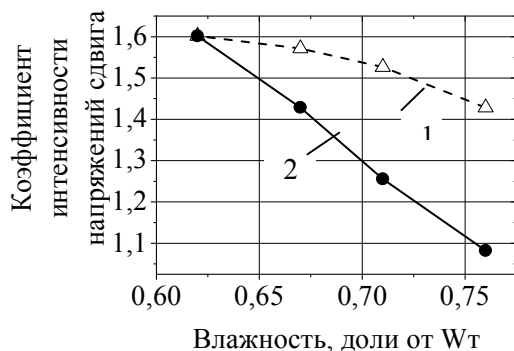


Рис. 14. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений сдвига в подстилающем грунте от влажности грунта: 1 – влажность увеличивается в конструкции без трещины и в конструкции с трещиной; 2 – в конструкции без трещины влажность не увеличивается

Выводы

Предложена новая базовая модель расчёта НДС конструкций дорожных одежд нежесткого типа, опирающаяся на наборы данных инструментальной диагностики с помощью георадаров. Модель ориентирована на расчёты основных параметров НДС: общего прогиба конструкции под нагрузкой, растягивающих напряжений на подошве верхнего слоя (асфальтобетон) и напряжений сдвига в слоях из несвязных материалов и подстилающем грунте. Усовершенствованы подходы к расчету дорожных одежд нежесткого типа при наличии сквозных трещин в покрытии.

Разработанные методики получения, обработки и анализа данных подповерхностного зондирования позволяют оценивать параметры конструктивных слоёв дорожных

одежд с трещинами в покрытии, исследовать связанные с ними закономерности изменения напряжённо-деформированного состояния конструкции, что составляет основу моделей и практических алгоритмов оценки и прогнозирования состояния конструкций дорожных одежд, находящихся в эксплуатации и имеющих разрушения в виде трещин (сквозных) в монолитных слоях покрытия и укрепленных слоях основания.

Литература

1. Ground penetrating radar, theory and applications / Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B.V., 2009. 508 p.
2. Evans R. D. Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to Assess Pavements. A dissertation thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree Doctor of Engineering (EngD), at Loughborough University, August 2009, 219 p.
3. Pochanin G. P., Masalov S. A., Ruban V. P., Kholod P. V., Batrakov D. O., Rubakova A. G., Urdzik S. N., Pochanin O. G. Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in: Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications. CRC Press - Taylor & Francis Group. London, 2016. P. 20–65.
4. Dmitry O. Batrakov, Mariya S. Antyufeyeva, Alexandr V. Antyufeyev, Angelika G. Batrakov. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Edinbourg, Scotland. 2017. P. 1–6. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7996072/> (дата звернення: 20.03.2019).
5. Sudyka J. and Krysiński L. Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2011. Vol. 4. № 3. P. 176–184.
6. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу [Чинний від 2005-01-01]. Київ: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2005. 176 с. (Відомчі Будівельні Норми)
7. Корсунский М. Б. Основы теории расчета нежестких дорожных одежд по предельным относительным удлинениям // Обоснование расчетных параметров для нежестких дорожных покрытий. Москва: Дориздат, 1952. С. 58–92.
8. Бируля А. К. Конструирование и расчет дорожных одежд автомобильных дорог. Москва: Трансиздат, 1964. 168 с.
9. Иванов Н. Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. Москва: Транспорт, 1973. 328 с.
10. Courant R. Variation methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin*

- of American Mathematical Society*. 1943. Vol. 49. P. 1–23.
11. Zienkitwicz O. C. The finite element method in engineering science. London: McGraw Hill, 1971. 521 p.
 12. Babuska I., Aziz A.K. Survey lectures on the mathematical foundations of the finite element method. In the : Mathematical Foundation of the Finite Element Method with Applications to Partial Differential Equations, 1972. P. 3–636.
 13. Oden J. T. Finite elements: an introduction. In the Handbook of Numerical Analysis II. Finite element methods. Part I. North-Holland, Amsterdam, 1991. P. 3–12.
 14. Жилкин В. А. Сопроотивление материалов: учебное пособие. Челябинск: ЧГАА, 2011. 524 с.
 15. Леонович И. И., Мельникова И. С. Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях и критерии их трещиностойкости. *Строительная наука и техника*. 2011. № 4. С. 37–41.
 16. Batrakov D. O., Antyufeyeva M. S., Antyufeyev A.V., Batrakova A. G. Inverse problems and UWB signals in biomedical engineering and remote sensing. 2016 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 5–11 September, Odessa, Ukraine, P. 148–151.
 17. Гольдштейн Ю. Б. Основы механики твердого деформируемого тела: учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 872 с.
 18. Гамеляк І. П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.11. / Національний транспортний ун-т. Київ, 2005. 525 с.
- References**
1. Ground penetrating radar, theory and applications (2009) / Jol Harry M. (Editor). Amsterdam: Elsevier B.V. 508 p.
 2. Evans R. D. (2009). Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to Assess Pavements. A dissertation thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree Doctor of Engineering (EngD). Loughborough University. 219 p.
 3. Pochanin G. P., Masalov S. A., Ruban V. P., Kholod P. V., Batrakov D. O., Batrakova A. G., Urdzik S. N., Pochanin O. G. (2016). Advances in Short Range Distance and Permittivity Ground Penetrating Radar Measurements for Road Surface Surveying, in: *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets and Applications*. CRC Press - Taylor & Francis Group. London. P. 20–65.
 4. Dmitry O. Batrakov, Mariya S. Antyufeyeva, Alexandr V. Antyufeyev, Angelika G. Batrakova. (2017). GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Edinbourg, Scotland. P. 1–6. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7996072/> (accessed: 20.03.2019).
 5. Sudyka J. and Krysiński L. (2011). Radar technique application in structural analysis and identification of interlayer bonding. *Int. J. Pavement Res. Technol.* Vol. 4. № 3. P. 176–184.
 6. VBN V.2.3-218-186-2004. Sporudy transportu. Dorozhniy odyah nezhorstkoho typu [Constructions of transport. Non-rigid pavement]. [Chynnyy vid 2005-01-01]. Kyiv: Derzhavna sluzhba avtomobilnykh dorih Ukrainy (Ukravtodor), 2005. 176 c. (Vidomchi Budivelni Normy). [in Ukrainian].
 7. Korsunskiy M.B. (1952). Osnovy teorii rascheta nezhestkikh dorozhnykh odezhd po predel'nyim otноситel'nyim udlineniyam. V kn.: Obosnovaniye raschetnykh parametrov dlya nezhestkikh dorozhnykh pokrytiy. [Fundamentals of the theory of calculation of non-rigid pavements for limiting relative elongations. In the book: Justification of the design parameters for non-rigid pavements]. M.: Dorizdat. C. 58–92. [in Russian].
 8. Birulya A.K. (1964). Konstruirovaniye i raschet dorozhnykh odezhd avtomobil'nykh dorog. [Design and calculation of road pavement]. M.: Transizdat. 168 c. [in Russian].
 9. Ivanov N.N. (1973). Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd. [Design and calculation of non-rigid pavement]. M.: Transport. 328 c. [in Russian].
 10. Courant R. (1943). Variation methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of American Mathematical Society*. Vol. 49. P. 1–23.
 11. Zienkitwicz O. C. (1971). The finite element method in engineering science. London: McGraw Hill. 521 p.
 12. Babuska I., Aziz A. K. (1972). Survey lectures on the mathematical foundations of the finite element method. In the: Mathematical Foundation of the Finite Element Method with Applications to Partial Differential Equations. P. 3–636.
 13. Oden J.T. (1991). Finite elements: an introduction. In the: Handbook of Numerical Analysis II. Finite element methods. Part I. North-Holland, Amsterdam. P. 3–12.
 14. Zhilkin V. A. (2011). Soprotivleniye materialov : uchebnoye posobiye. [Resistance materials: a tutorial]. Chelyabinsk: CHGAA. 524 c. [in Russian].
 15. Leonovich I. I., Mel'nikova I. S. (2011). Analiz prichin vozniknoveniya treshchin v dorozhnykh pokrytiyakh i kriterii ikh treshchinostoykosti. [Analysis of the causes of cracks in pavements and criteria for their crack resistance]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. № 4. C. 37–41. [in Russian].
 16. Batrakov D. O., Antyufeyeva M. S., Antyufeyev A. V., Batrakova A. G. (2016). Inverse problems and UWB signals in biomedical engineering and remote sensing. 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 5–11 September, Odessa, Ukraine. P. 148–151.
 17. Gol'dshteyn Yu. B. (2005). Osnovy mekhaniki tverdogo deformiruyemogo tela: ucheb. posobiye.

[Fundamentals of solid deformable body mechanics]. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU. 872 c. [in Russian].

18. Hamelyak I. P. (2005). Osnovy zabezpechennya nadiynosti konstruktsiy dorozhnoho odyahu [Basics of ensuring the reliability of pavement structures]: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.11. / Natsionalnyy transportnyy un-t. Kyiv, 2005. 525 c. [in Ukrainian].

Батракова Анжелика Геннадьевна¹,

д-р техн. наук, професор, тел.+38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

Урдзик Сергей Николаевич¹,

без степені, без звання, тел. +38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

кафедра проектування дорог, геодезії і землеустрою, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61002, г. Харків, Україна, ул. Ярослава Мудрого, 25,

Батраков Дмитрий Олегович²,

д-р фіз.-мат. наук, професор, тел. +38(057)707-52-57, e-mail: batrakov@karazin.ua,

кафедра теоретическої радіофізики, Харківський національний університет ім. В. М. Каразіна, 61022, г. Харків, Україна, пл. Свободи, 4.

Modeling and estimation of the condition of pavements with the through cracks

Abstract. The possibilities of assessing the state of non-rigid pavement structures with through cracks in the upper layers, which based on the results of GPR sounding and subsequent modeling of the stress-strain state of the structure, are considered. Water penetration across the through cracks to the lower layers may be the cause of an additional increase in the rate of degradation of the pavement. Attraction of GPR data allows one to estimate the humidity in the lower layers of the structure under the crack. To solve this problem, we used methods for processing pulse video signals of georadars. The assessment of the effect of through cracks in the pavement on the stress-strain state of the pavement design was carried out using the finite element method. For the simulation of the stress-strain state parameters of the calculated models was preliminarily justified. Experiments to determine the most unfavorable position of the load relative to the crack also was conducted. The results of calculations of the most important parameters affecting the strength and durability of the structure are given: tensile stresses on the lower plane of the upper layer, general deformation of the structure, shear stresses in layers with unbound materials and underlying soil. The stress-strain state modeling was carried out using the finite element method (FEM) and static models with different humidity of the lower layer. The results obtained allowed one to quantify the effect of a through crack in the pavement. It was proposed to take into account the effect of through cracks in the calculations on the

strength of the pavement by introducing an equivalent thickness of the monolithic pavement layer, reducing the ultimate shear stress in unbound base layers and underlying soil.

Keywords: pavement design, through cracks, GPR methods, finite element method, stress-strain state.

Batrakova Angelika G.¹,

Dr. Techn. Sci., Professor, tel.+38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

Urdzik Sergey N.¹,

No Sci. Degree, No Ac. Title, tel.+38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

61002 Ukraine, Kharkiv, 25 Yaroslava Mudroho str.,

Batrakov Dmitry O.²,

Dr. physics and mathematics. Sci., Professor, tel.+38(057)707-52-57, e-mail: batrakov@karazin.ua,

²V. N. Karazin Kharkov National University, Department of Theoretical Radiophysics, 61022 Ukraine, Kharkiv, 4 Svobody Sq.

Моделювання та оцінка стану дорожніх одягів з наскрізними тріщинами у покритті

*Анотація. Розглянуто можливості оцінки геометричних параметрів наскрізних тріщин у верхніх шарах конструкцій дорожніх одягів нежорсткого типу й вологості в нижніх шарах конструкції під тріщиною за даними георадарного обстеження. Запропонований підхід до врахування впливу тріщин у покритті на несучу здатність конструкції дорожнього одягу, що опирається на результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану конструкції дорожнього одягу із залученням методу скінченних елементів. **Ключові слова:** конструкція дорожнього одягу, наскрізні тріщини, георадарні методи, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан.*

Батракова Анжеліка Геннадіївна¹,

д-р техн. наук, професор, тел.+38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

Урдзик Сергій Миколайович¹,

без ступеня, без звання, тел.+38(057)707-37-32, e-mail: rp@khadi.kharkov.ua,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, кафедра проектування доріг, геодезії і землеустрою, 61002, м. Харків, Україна, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Батраков Дмитро Олегович²,

д-р фіз.-мат. наук, проф., тел. +38(057)707-52-57, e-mail: batrakov@karazin.ua,

²Харківський національний університет ім. В. М. Каразіна, кафедра теоретичної радіофізики, 61022, м. Харків, Україна, майдан Свободи, 4.