

УДК 625.7/.8

Батракова А.Г., канд. техн. наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Аннотация. В работе предложена методика, позволяющая на основе георадарных технологий оперативно определять как толщину слоев дорожной одежды, так и их плотность (пористость). Предложенная методика может быть использована для усовершенствования процедур определения текущего состояния (в частности, несущей способности) конструкции дорожных одежд. Получаемые данные необходимо учитывать при разработке алгоритмов назначения мероприятий по содержанию и ремонту автомобильных дорог.

Ключевые слова: георадарные технологии, толщина слоев дорожной одежды, плотность, пористость.

Анотація. В роботі запропоновано методику, що дозволяє на основі георадарних технологій оперативно визначати як товщину шарів дорожнього одягу, так і їх щільність (пористість). Запропонована методика може бути використана для удосконалення процедур визначення поточного стану (зокрема, несучої здатності) конструкції дорожнього одягу. Отримані дані необхідно враховувати при розробці алгоритмів призначення заходів з утримання та ремонту автомобільних доріг.

Ключові слова: георадарні технології, товщина шарів дорожнього одягу, щільність, пористість.

Annotation. In this paper based on GPR technology method that allows to identify in a real time investigations a thickness of a layer of pavement, and its

density (porosity) is proposed. The proposed method can be used to improve the procedures for determining the current state (e.g., carrying capacity) of the construction of road pavements. The resulting data should be considered during development of algorithms for road's maintenance and reconstruction.

Key words: GPR technologies, pavement layers thickness, density, porosity.

Одним из ключевых этапов мероприятий по содержанию автомобильных дорог является мониторинг их состояния. Цель мониторинга – оценка остаточного ресурса для разработки оптимальной стратегии содержания и ремонта автомобильных дорог. Для решения этой задачи используются различные подходы, основанные как на прямых методах контроля (керны), так и на обработке результатов косвенных измерений (модуля упругости, чаши прогиба). Эти методы либо слишком дорогостоящи, либо не дают полной картины состояния конструкции (косвенные измерения). В то же время, известно, что деградация дорожных покрытий – сложный процесс, который в зависимости от многих факторов протекает по-разному. К этим факторам относят: величину и характер циклических транспортных нагрузок, климатические условия, особенности самой конструкции и материалов (природных и искусственных) из которых она состоит. В силу этих причин полной теории и универсальных всеобъемлющих моделей разрушения дорожных одежд к настоящему времени не существует. В то же время, важность задачи диктует постоянный интерес к ней и совершенствование различных подходов к ее решению. Эти подходы в свою очередь, должны опираться на адекватный учет различных факторов, влияющих на деградацию покрытия дороги с одной стороны и на новые технологии – с другой.

В связи с развитием средств подповерхностного зондирования возникли новые методики применения георадарного оборудования для оценки состояния конструкций автомобильных дорог. Например, в связи с появлением и все большей популярностью технологий восстановления на полную глубину (по терминологии в западной литературе Full-depth reclamation (FDR)) к методам контроля и оценки состояния дорожных конструкций предъявляются новые требования.

Данные анализа экономической эффективности и срока службы таких конструкций, как отмечают авторы работы [1], значительно различаются. Это сильно затрудняет использование имеющихся результатов предшествующих

обследований автомобильных дорог и препятствует разработке типовых рекомендаций по проектированию и проведению ремонтных мероприятий. Поэтому авторами работы [1] была проведена комплексная оценка участков дорог с использованием как георадаров, так и других методик:

- измерения статического и динамического модулей упругости (resilient modulus, dynamic modulus);
- косвенного определения прочности на растяжение (indirect tensile strength);
- тестирования конструкции с помощью установки ударного нагружения (falling-weight deflectometer FWD);
- оценки экономической эффективности вложений (life-cycle cost analysis – LCCA).

В рамках такого подхода, прежде всего, были проведены отборы кернов на контролируемых участках автодорог. Затем в лабораторных условиях было проведено исследование отобранных образцов на предмет соответствия проектным требованиям и измерены их модуль упругости и прочность на растяжение при ограниченных динамических нагрузках. Далее для оперативной оценки толщины конструктивных слоев дорожной одежды на обследуемом участке использовался георадар. Затем, в выбранных точках определялась величина статического прогиба (D_0) и эффективный структурный показатель (SN_{eff}), называемый также индексом толщины. Полученные значения SN_{eff} использовались для вычисления коэффициентов слоев (a_i) – коэффициентов, определяемых эмпирическим путем, и отражающих функциональные возможности материалов соответствующих слоев. Согласно основному уравнению для SN_{eff} , для многослойной конструкции, он определяется по следующей формуле:

$$SN_{eff} = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3, \quad (1)$$

где D_i – толщина i -го слоя;

m_i – коэффициент, характеризующий его дренирующие свойства.

С помощью методики в [1], по сути, решается обратная задача – определения значений коэффициентов слоев. Разумеется, структурный показатель формально может быть записан и для каждого слоя в отдельности:

$$SN_1 = a_1 \cdot D_1. \quad (2)$$

Следует отметить, что, несмотря на относительную простоту задачи определения толщины слоя, значение коэффициента слоя не может быть рассчитано с помощью прямых формул. Это связано с тем, что свойства слоев конструкции определяются совокупностью многих факторов, таких как прочность материала, сдвигоустойчивость, модуль упругости, содержание влаги и даже положение относительно других слоев. С 1962 года в США используется значение $a_1 = 0,44$ для асфальтобетона. Это значение было получено эмпирическим путем по результатам «Дорожного Теста» для нежестких покрытий и используется многими дорожными организациями до настоящего времени. В последнее время в связи с появлением новых материалов – щебеночно-мастичных асфальтобетонов, вечных покрытий (PerpetualPavement и др.) предпринимаются попытки откорректировать это значение применительно к новым условиям [2].

В то же время проводится разработка методов определения фактических значений этих коэффициентов и эксплуатационных показателей по данным обследований. Смысл этих методов состоит в определении структурного показателя, связанного с эффективным модулем покрытия (общим модулем всех слоев, расположенных на подложке – E_p) формулой вида [2]:

$$SN_{eff} = c_0 \cdot D \cdot \sqrt[3]{E_p}. \quad (3)$$

где D – общая толщина покрытия на основании (в дюймах);

E_p – эффективный модуль покрытия (модуль всех слоев, лежащих на основании в единицах psi);

c_0 – эмпирический постоянный коэффициент ($c_0 = 0,0045$).

$$d_0 \cdot E_p - k_0 \cdot \frac{E_p}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} = k_0 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right], \quad (4)$$

где d_0 – прогиб в центре приложения нагрузки (в тысячных долях дюйма);

M_R – модуль упругости основания (в единицах psi);

D – общая толщина покрытия на основании (в дюймах),

a – радиус пластины (нагрузки, в дюймах),

$k_0 = 1,5 \cdot p \cdot a$,

p – давление нагрузки (в единицах psi).

Модуль упругости основания, являющийся фундаментальным свойством материала, может быть вычислен на основе следующей формулы [2]:

$$M_R = C \cdot \left[\frac{P \cdot (1 - \mu^2)}{\pi r \cdot d_r} \right], \quad (5)$$

где P – приложенная нагрузка (в фунтах силы);

μ – коэффициент Пуассона;

r – радиальное расстояние, на котором измеряется прогиб (в дюймах);

d_r – величина прогиба на расстоянии r (в тысячных дюйма);

$C = 0,33$ – постоянный коэффициент.

Таким образом, приведенные формулы образуют замкнутую задачу по определению структурного показателя из результатов измерений.

Однако, как уже отмечалось, свойства покрытия и конструкции в целом определяются всей совокупностью влияющих факторов. Отсюда следует важный с практической точки зрения вопрос о влиянии каждого из факторов на общий показатель конструкции в данной точке. Иными словами, если, например, в данной точке получено некоторое значение структурного показателя, то какими факторами обусловлено это значение и его отклонение, например, от значений в соседних точках. Очевидно, что обработка

результатов измерений по приведенной выше методике не может дать ответ на этот вопрос, поскольку исходные данные представляют собой лишь интегральные показатели. Они не позволяют ответить на ряд практических вопросов о конкретных причинах, которые привели к зафиксированному состоянию конструкции в данный момент времени. Поэтому весьма актуальной является задача определения не только интегральных (совокупных) характеристик конструкции, но и вклада каждого компонента конструкции (слоя) в итоговый результат и главное – выяснение причины (или комплекса причин), вызвавших отклонения в характеристиках.

Эффективным потенциалом для решения данной задачи обладают методы подповерхностного зондирования и соответствующие средства (георадары). Современные георадары вместе с программным обеспечением, созданным на основе соответствующих алгоритмов обработки импульсных сигналов, позволяют определять не только временные задержки сигналов (для построения георадарного профиля), но и толщины конструктивных слоев покрытия, а также электрофизические характеристики материалов слоев. Электрофизические характеристики материалов конструктивных слоев дорожных одежд (в первую очередь, ϵ), в свою очередь, существенным образом зависят от таких важных для практических приложений физико-механических показателей как влажность, пористость, плотность (степень уплотнения) [3]. Для практических приложений важную роль играет информация о содержании влаги (в различных формах), плотности и пористости материалов. Поэтому в данной работе рассмотрим методику определения толщины и плотности материалов слоев основания дорожной одежды с помощью георадаров и ее влияние на общие показатели конструкции.

Стандартная обработка сигналов георадара подразумевает в первую очередь определение времени задержки (или просто задержки) сигнала, отраженного от внутренних неоднородностей исследуемой конструкции (границы слоев). Главная же проблема интерпретации георадарных данных – зависимость задержки, как от толщины слоев, так и от их диэлектрической проницаемости. Иными словами, при изменении задержки будет непонятно – чем это вызвано, изменением толщины слоя или, допустим, изменением пористости (или влагосодержания) материала.

Поэтому предлагается использовать следующий вариант решения данной проблемы, состоящий в разбиении исходной задачи на две составляющие:

определение диэлектрической проницаемости слоя (и связанного с этим параметра – плотности) и последующее определение его толщины. Для этого понадобится дополнительная операция – так называемая калибровка. Суть этой операции состоит в первоначальном измерении характеристик сигнала, отраженного от тонкого листа металла, лежащего на поверхности слоя.

Сначала для ясности изложения рассмотрим задачу для однослойной структуры, то есть для слоя, лежащего на бесконечно толстом основании (рис. 1).

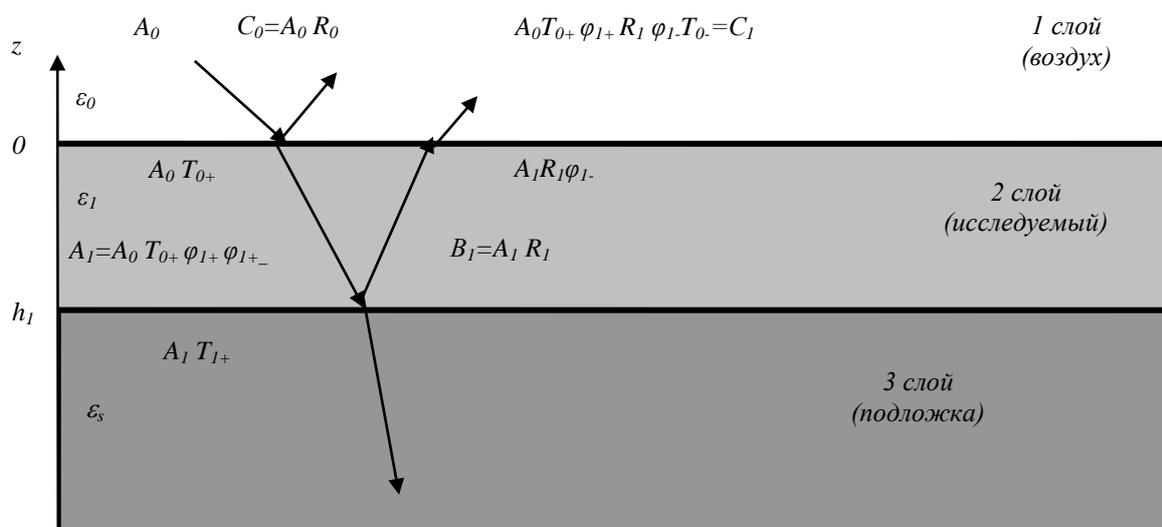


Рисунок 1 - Исследуемая структура и обозначения характеристик поля

В таком случае в приемную антенну георадара сначала попадет сигнал, отраженный от верхней границы слоя. Затем придет сигнал, отраженный от нижней границы слоя и прошедший сквозь верхнюю границу обратно к антенне. При каждом отражении от границы или прохождении сквозь границу часть энергии сигнала уходит на сопутствующий процесс прохождения (отражения от) границы. Соответственно амплитуды таких сигналов, которые называют переотраженными, быстро уменьшаются и их учитывать не будем. Обозначим амплитуды волн (сигналов), распространяющихся вниз (рис.1) A_0 , A_1 . Амплитуды волн, распространяющихся вверх, будем обозначать B_1 , B_2 . Отношения этих амплитуд после отражения или прохождения к исходным будем называть коэффициентами отражения или прохождения, и обозначать R и T соответственно. Снабдим эти коэффициенты индексами, определенными

номером соответствующей границы. Таким образом, R_0 – коэффициент отражения от верхней границы слоя.

Из теории электромагнетизма известно, что коэффициенты отражения и прохождения электромагнитных волн через плоскую границу раздела двух диэлектриков связаны с диэлектрическими проницаемостями сред соотношениями [4,5]:

$$R_0 = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_0}}, \quad T_{0+} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_0}}, \quad T_{0-} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_0}}. \quad (6)$$

Индексы $0+$ и $0-$ в последних соотношениях означают, что коэффициенты прохождения получены для волн, идущих сверху вниз и снизу вверх соответственно.

Если на верхнюю границу слоя положить лист металла (например, медную фольгу), то коэффициент отражения для такой границы будет равен минус 1. Это означает, что в антенну георадара попадет сигнал той же амплитуды, что и зондирующий, но имеющий обратную полярность. Если теперь, не сдвигая георадар, убрать лист металла, то антенна зафиксирует новое временное распределение сигнала, т.е. суперпозицию сигналов, отраженных не только от верхней границы, но и от внутренних структурных неоднородностей дорожной конструкции (в данном случае границ слоя). Основным смыслом такой операции калибровки в том, что теперь можно осуществить «привязку» характеристик нового сложного сигнала (суперпозиции отражений) к некоторому опорному (более простому) сигналу, в качестве которого и был выбран сигнал, отраженный от листа металла.

Следующий шаг состоит в определении диэлектрической проницаемости верхнего слоя (ε_1). Для этого перепишем формулу (6) в виде:

$$\varepsilon_1 = \left(\sqrt{\varepsilon_0} \frac{1+R_0}{1-R_0} \right)^2. \quad (7)$$

Подчеркнем, что диэлектрическая проницаемость верхней среды (в данном случае воздуха) известна (для воздуха она равна 1). Знание диэлектрической проницаемости слоя позволяет определить коэффициент

прохождения через верхнюю границу по формуле (6), а также вычислить набег фазы:

$$\varphi_{1\pm} = e^{ik_1 h_1}, \text{ где } k_1 = \left(\frac{\omega}{\tilde{n}}\right) \cdot \sqrt{\varepsilon_1} - \text{волновое число первого слоя;}$$

c – скорость света;

ω – частота сигнала.

Знание этих величин позволяет применить указанный алгоритм к следующей границе и вычислить диэлектрическую проницаемость нижнего слоя (в данном случае это бесконечно толстое основание).

Для определения толщины слоя h_1 необходимо на основании определенной экспериментально задержки Δt записать:

$$h_1 = \frac{(c \cdot \Delta t)}{2 \sqrt{\varepsilon_1(\omega)}}. \quad (8)$$

При наличии нескольких слоев указанную последовательность операций необходимо повторить. Подчеркнем, что данные формулы получены в предположении отсутствия потерь либо их малости.

Анализ формулы (8) показывает, что на точность определения свойств дорожных одежд существенное влияние будет оказывать точное знание диэлектрической проницаемости (вообще говоря, комплексной), а также ее дисперсионных свойств. Но получить простые аналитические формулы для определения частотной зависимости диэлектрической проницаемости (дисперсии) материалов, используемых в дорожном строительстве, не представляется возможным ввиду их сложного композиционного состава. Однако, для определения диэлектрической проницаемости материала (например, асфальтобетона), состоящего из смеси различных компонентов, существуют несколько простых моделей. Эти модели описываются соответствующими аналитическими уравнениями [6]:

- модель Нельсона : $n_e = v_1 n_1 + v_2 n_2 + v_3 n_3 + \dots + v_N n_N$; (9)

- модель Ландау: $\sqrt[3]{\varepsilon_e} = v_1 \sqrt[3]{\varepsilon_1} + v_2 \sqrt[3]{\varepsilon_2} + v_3 \sqrt[3]{\varepsilon_3} + \dots + v_N \sqrt[3]{\varepsilon_N}$; (10)

- модель Лихтенекера: $\ln \varepsilon_e = v_1 \ln \varepsilon_1 + v_2 \ln \varepsilon_2 + v_3 \ln \varepsilon_3 + \dots + v_N \ln \varepsilon_N$, (11)

где $n_e = \sqrt{\varepsilon_e}$ – эквивалентный показатель преломления всей среды,

N – общее количество составляющих (включая воздух),

v_1, v_2, \dots, v_N – объемная доля каждой составляющей ($v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_N = 1$).

Объемная доля каждого компонента может быть вычислена по формуле:

$$v_n = \frac{m_n}{d_n} \cdot \frac{100}{V_e} (\%), \quad (12)$$

где v_n, m_n, d_n – соответственно объемная доля, массовая доля, удельная плотность n – й компоненты;

V_e – общий объем образца.

Введем в рассмотрение эквивалентную диэлектрическую проницаемость материала с максимальной плотностью (без воздушных полостей) и обозначим ее через ε_m . Тогда формула (9) может быть переписана в виде:

$$n_e = k_a v_1 + v_m n_m, \quad (13)$$

где v_1 – объемная доля пор (содержание воздуха);

v_m, n_m – объемная доля других компонент и их эффективный показатель преломления;

n_e – эффективный показатель преломления всего материала;

k_a – поправочный коэффициент, определяемый путем калибровки.

Далее определяем с помощью (7) ε_1 , т.е. эффективную диэлектрическую проницаемость верхнего слоя. Затем рассчитываем соответствующий эффективный показатель преломления $n_{1,e} = \sqrt{\varepsilon_1}$. В итоге теперь мы можем рассчитать объемную долю воздуха по формуле, следующей из (13):

$$v_1 = \frac{n_{1,e} - v_m n_m}{k_a}. \quad (14)$$

При этом предполагается, что значения величин v_m, n_m известны, т.е. получены на этапе предварительных измерений.

Калибровочные данные предлагается получать в лабораторных условиях следующим образом:

1. Изготавливается образец с максимальной плотностью, измеряются его объем V_m (толщина h_m) и масса P_m , определяется его плотность.

2. На поверхность приготовленного образца кладется тонкий лист металла и измеряется отраженный сигнал (и его амплитуда A_0), который фиксируется (запоминается) в программе обработки данных.

3. Лист металла убирается с поверхности и производится измерение отраженного от поверхности образца сигнала и его амплитуды A_1 . Все остальные параметры (в первую очередь положение антенны георадара относительно поверхности) должны оставаться неизменными. При этом желательно, чтобы образец имел значительную толщину, позволяющую разделить сигналы, отраженные от верхней и нижней границ образца. Глубина может (не обязательно) составлять 20 и более сантиметров. Отраженный сигнал также фиксируется в программе.

4. По формуле $R_{0,m} = \frac{A_1}{A_0}$ вычисляется коэффициент отражения и полученное значение подставляется в формулу (7), которую теперь перепишем

в виде $n_{1,m} = n_0 \frac{1 + R_0}{1 - R_0}$.

5. Далее из этого же материала готовится менее плотный образец и его параметрам приписываются индексы l . Затем для этого образца измеряются исходные параметры, в том числе и объемная доля воздуха $v'_{1,l}$. Повторяются этапы 2-4.

6. Этапы 1-5 повторяются для новых образцов с уменьшающейся плотностью. Данные заносятся в таблицу.

7. Производится обработка полученных результатов, состоящая в вычислении объемной доли воздуха в образцах по формуле (14), где поправочный коэффициент k_a полагается равным 1 и полученные результаты сравниваются с истинными значениями $v'_{1,l}$. На основании сравнения данных вычисляется значение поправочного коэффициента k_a .

Таким образом, предложенная методика позволяет оперативно определять как толщину слоев дорожной одежды, так и их плотность (пористость), что может быть использовано для определения текущего состояния (в частности, несущей способности) конструкции. Следовательно, эти данные необходимо учитывать при разработке алгоритмов назначения ремонтных мероприятий. В последующем предложенная процедура может быть развита для диагностики состояния всех слоев многослойных конструкций на основе методов решения обратных задач, рассмотренных в [7].

Литература

1. Diefenderer B. K., Apeageyi A. K. Analysis of Full-Depth Reclamation Trial Sections in Virginia. / B.K. Diefenderer, A.K. Apeageyi // Final Report VCTIR. – 2011. – 54 p.
2. Pologruto M. Procedure for Use of Falling Weight Deflectometer to Determine AASHTO Layer Coefficients. / M. Pologruto // Transportation Research Record 1764: [Transportation R.B.]. – Washington: D.C. – 2001.
3. Fauchard C. Influence of compaction on bituminous mixtures at microwaves frequencies. / C. Fauchard, Bo Li, E. Ferrari, L. Laguerre, X. Derobert et al. // NDTCE'09. Non-Destructive Testing in Civil Engineering Nantes: France, June 30th – July 3rd. – 2009. – P. 1-7.
4. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд. МГУ, 2005. – 153 с.
5. Jol Harry M. Ground penetrating radar, theory and applications. / M. Jol Harry. – Elsevier B.V., 2009. – 508 p.
6. Mardeni R.R. Road pavement density analysis using a new non-destructive ground penetrating radar system / R.R. Mardeni, S.A. Raja Abdullah, H.Z.M. Shafri // Progress In Electromagnetics Research. – Vol. 21. – 2010. – P. 399-417.
7. Батракова А.Г. Определение плотности и влажности грунтов земляного полотна методами георадиолокации / А.Г. Батракова, Д.О. Батраков // Дороги і мости: Збірник наукових статей. – Київ: ДержНДІ ім. М.П. Шульгіна – 2006. – Вип. 5. – С. 15-35.