



УДК 625.7./.8

Батракова А.Г., канд. техн. наук, Урдзик С.Н., Процюк В.А.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДАРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛАЖНОСТИ И ИНФИЛЬТРАЦИИ В СЛОЯХ КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Состояние и характеристики грунтов основания земляного полотна и несущих слоев конструкции играют важную роль в оценке несущей способности, как покрытия, так и всей конструкции дорожной одежды в целом. Только с привлечением этих данных можно сделать обоснованное заключение о текущем состоянии конструкции дорожной одежды и ее остаточном ресурсе. В то же время известно, что состояние и характеристики подстилающих грунтов и слоев конструкции существенным образом зависят от содержания влаги. Процедура принятия управленческих решений относительно мероприятий по обслуживанию и ремонту дорог во многом базируется на оценке несущей способности основания. Как известно, термин несущая способность подразумевает способность конструкции выдерживать определенное число приложений расчетной нагрузки. Следовательно, если оценка несущей способности основания (зависящей также и от влагосодержания) сделана неточно или не проводилась вовсе, то рекомендации по проведению мероприятий по обслуживанию и ремонту могут оказаться неверными, что приведет к значительным убыткам, либо излишним затратам.

В настоящее время наиболее распространенным средством оценки несущей способности является установка динамического нагружения, измеряющая «жесткость» (динамический модуль упругости) конструкции. Однако такая методика отражает лишь общий модуль упругости всей конструкции и не позволяет выяснить модули элементов конструкции и, тем более, причины которыми обусловлены именно такие значения их характеристик. В то же время известно, что увеличение содержания влаги в грунтах основания может привести к уменьшению модуля слоев [1], вызвав при этом больший прогиб при испытаниях. При этом существенно, что оценки прочности с помощью установки динамического нагружения основываются на данных единичных испытаний, моделирующих циклическую нагрузку. Следовательно, они должны быть дополнены соответствующими данными, позволяющими учесть изменение условий во времени (например, сезонные колебания влажности).

В этой связи представляется перспективным использование совместно с установками динамического нагружения также и георадаров для определения влажности в нижних слоях конструкции. В дальнейшем эти результаты полевых испытаний совместно с результатами лабораторных исследований связи влагосодержания в материалах конструкции с ее прочностными характеристиками могут послужить основой для получения более точных оценок несущей способности покрытия при изменяющихся условиях эксплуатации.

Другим направлением использования георадарных технологий является определение максимального сезонного (с вероятностью) содержания влаги. Эти данные могут способствовать повышению достоверности прогнозов сезонного изменения свойств дорожных конструкций. Кроме того, очевидно, что данные полевых обследований влажности нижних слоев могут быть использованы для назначения адекватных мероприятий по содержанию и ремонту покрытия. Результаты, полученные другими исследователями [2,3] свидетельствуют о том, что излишнее количество влаги в верхнем слое асфальтобетона и нижних слоях основания может быть причиной возникновения таких серьезных дефектов конструкции, как нарушение сцепления между слоями (расслоение) и отрыва верхних слоев. В таком случае технологии подповерхностного зондирования могут быть использованы для обнаружения и позиционирования участков повышенной влагопроницаемости с целью получения более надежного локального прогноза деградации конструкции на обследуемом участке дороги.

Оценка влажности нижних слоев конструкции также необходима для определения эффективности дренажных систем или обоснования рекомендаций по устройству дренажа. Несмотря на существенную капиталоемкость мероприятий по устройству дренажных систем, соответствующие проекты часто выполняются без достаточной информации о свойствах подстилающих грунтов. В результате оказывается, что дорогостоящие дренажные системы не приносят никакой пользы, в то время как использование затраченных на них средств на устройство дренажа на других участках могло бы существенно повысить долговечность последних. В таком случае георадарные технологии могли бы использоваться для выявления участков, где устройство дренажа может принести наибольшую пользу в смысле повышения надежности и долговечности конструкции. Это, в конечном итоге, обеспечит рациональное распределение затрат и материальных ресурсов.

Оценка влажности материалов, используемых в дорожном строительстве, в настоящее время проводится с использованием различных методов. К ним относятся: взвешивание образцов, временная



рефлектометрия, регистрация нейтронного прохождения (neutron probe logging), емкостные измерения либо измерения проводимости и родственный метод импедансной томографии. Эти методы являются дорогостоящими, трудоемкими и обладают значительными погрешностями, связанными в первую очередь с попаданием в образцы воды, применяемой для охлаждения инструментов, используемых при отборе кернов. Поэтому процедура определения влагосодержания в конструктивных слоях дорожных одежд до последнего времени не входила в набор мероприятий по обследованию дорог. Георадарные технологии, напротив, являются неразрушающими и позволяют осуществлять сбор и обработку данных в режиме реального времени с участков большой протяженности. Поэтому такие технологии относятся к весьма перспективным в плане применения в дорожной отрасли. Об этом свидетельствуют исследования по применению георадарных технологий для определения влагосодержания в дорожных конструкциях. В частности, в [4] использован анализ амплитуд сигналов для качественной оценки инфильтрации соленой воды сквозь покрытие автобана, авторы [5] использовали амплитудные данные для количественной оценки содержания воды в промежуточных слоях конструкции дорожной одежды в лабораторных условиях.

Среди методик оценки степени увлажнения слоев дорожных конструкций, основанных на определении диэлектрической проницаемости с последующим пересчетом ее распределения в распределение влажности можно выделить несколько групп. Из них основными являются две.

Методики первой группы основываются на анализе так называемых поверхностных волн. При решении задач геозондирования такие волны принято называть «грунтовыми волнами» (ground waves) (рис.1). Смысл технологий такого типа состоит в анализе сигналов, распространяющихся вдоль поверхности дороги.

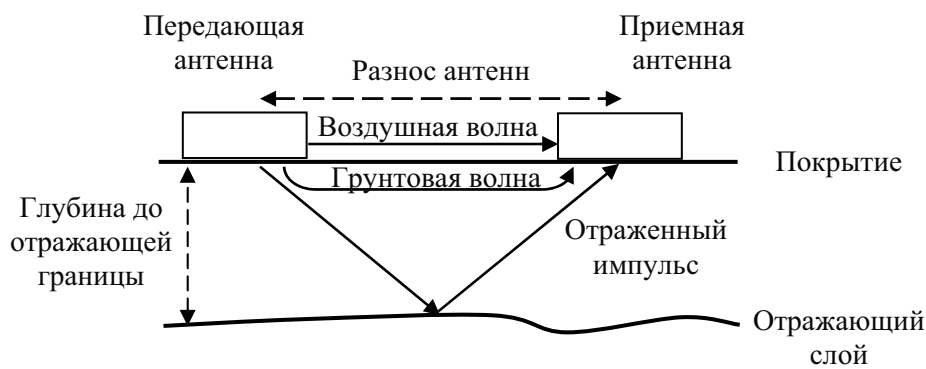


Рисунок 1 – Схема положения антенн радара и прохождения грунтовых, воздушных и отраженных волн

Методики второй группы основываются на анализе волн, прошедших через исследуемую структуру. При этом используют моностатические (приемо-передающие антенны) (рис.2).

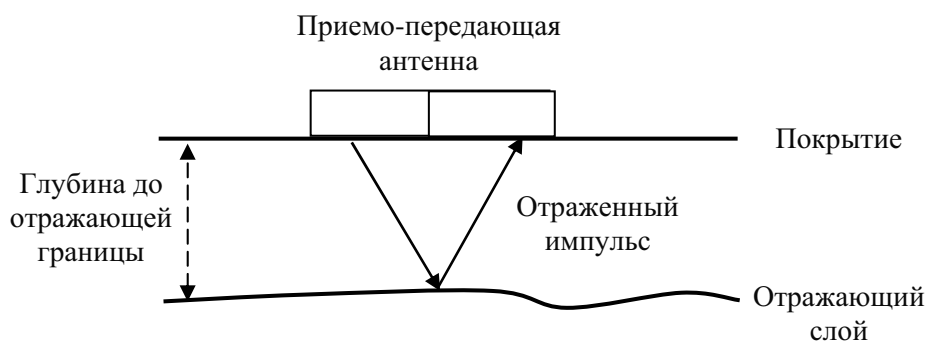


Рисунок 2 – Схема положения антенн радара и прохождения грунтовых, воздушных и отраженных волн

К настоящему времени разработаны методики обработки георадарных данных с целью построения распределения диэлектрической проницаемости по глубине исследуемой структуры [6], основанные на обработке голограммы дифрагированной волны. Дифрагированная волна на радараграмме отображается в виде гиперболы, описываемой уравнением [7]:



$$t(x) = \frac{2 \times L}{V} = \frac{2 \times \sqrt{x^2 + h^2}}{V},$$

(1)

де L – путь, пройденный волной, см;
 V – скорость распространения, см/нс;
 h – глубина залегания объекта, см.
 $t(x)$ – время прохождения волны до объекта.

При этом скорость распространения волны в среде пропорциональна значению угла наклона ветки гиперболического отражения на радарограмме – чем острее угол наклона, тем меньше скорость распространения волны в среде.

Вместе с тем, в настоящее время разработать строгие аналитические формулы для восстановления непрерывного профиля комплексной диэлектрической проницаемости дорожных одежд и грунтов земляного полотна с учетом их влагонасыщенности не представляется возможным в силу сложности задачи. Поэтому на данном этапе предлагается использовать для оценки влажности слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна лабораторную калибровку георадара применительно к конкретным материалам. Основу данной калибровки составляет определение связи диэлектрической проницаемости с влажностью.

Известно, что величина диэлектрической проницаемости (ϵ') и скорость распространения волн в грунтах (V) существенным образом зависят от их влажности (W). Значения диэлектрической проницаемости могут в одних случаях быть индикатором количества влаги в грунтах, а в других – количественного состава компонентов в исследуемой смеси.

Для материалов можно воспользоваться эмпирическими зависимостями:

а) для песков и суглинков [7]:

$$\epsilon' = 3,2 + 1,1 \times W,$$

(2)

где W – влажность грунта, доли единиц;

б) для осадочных пород в широком диапазоне изменения влажности от 3 % до 45 % [8]:

$$\epsilon' = 3,03 + 9,6 \times W_{об} + 146 \times W_{об}^2 - 76,7 \times W_{об}^3,$$

(3)

где $W_{об}$ – объемная влажность грунта, доли единиц,

$$W_{об} = \frac{W \times \gamma}{\gamma_в},$$

(4)

где γ – плотность сухого грунта, г/см³;

$\gamma_в$ – плотность воды, г/см³, $\gamma_в = 1$ г/см³.

Для сред с большой влажностью (свыше 45 %) [7]:

$$\epsilon' = \frac{720}{(180 - W)}.$$

(5)

Диэлектрическая проницаемость дискретных материалов зависит от фракции и плотности слоя.

Связь диэлектрической проницаемости с влажностью щебеночного слоя определялась экспериментальным путем. Для проведения экспериментальных исследований по определению диэлектрической проницаемости слоя щебня был использован щебень фракции 5-10 мм. Толщина исследуемого щебеночного слоя составляет 40 см. Влажность щебня определялась согласно ДСТУ Б В.2.1-17.

Для определения диэлектрической проницаемости слоя проводилось зондирование увлажненного щебня и различных типов грунтов с известными коэффициентом уплотнения. По результатам



интерпретации радарограм с помощью программы «Geovisu» установлена величина диэлектрической проницаемости исследуемого материала слоя. График зависимости диэлектрической проницаемости слоя щебня и песчаного грунта от влажности приведен на рисунке 3.

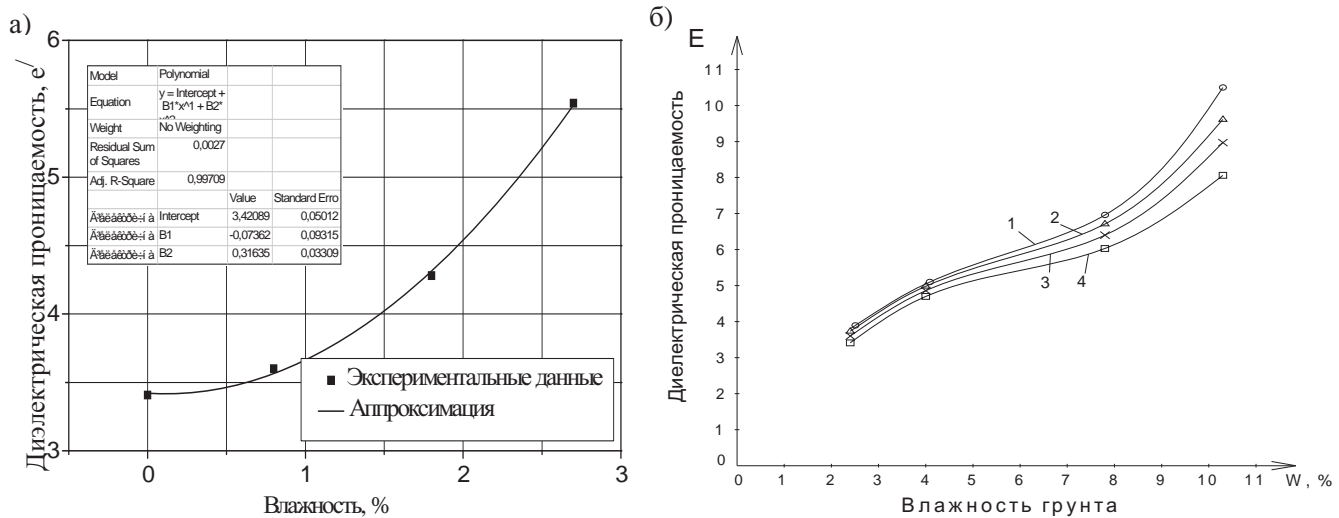


Рисунок 3 – Связь диэлектрической проницаемости с влажностью материалов:
а) слоя щебня; б) грунтов при различном коэффициенте уплотнения

Диэлектрическая проницаемость щебеночного слоя связана с влажностью соотношением:

$$(6) \quad \epsilon' = 3,4209 - 0,07362 \times W + 0,31635 \times W^2,$$

где W – влажность слоя, %.

Результаты проведенных лабораторных экспериментов могут быть использованы при георадарном обследовании автомобильных дорог на этапе эксплуатации. Примером может служить участок автомобильной дороги, находящийся в эксплуатации первый год после капитального ремонта, на котором была определена достаточно протяженная по длине просадка дорожной одежды.

На рисунке 4 представлены радарограммы, полученные по результатам георадарного обследования, и результаты обработки сигналов по исследуемому профилю. На радарограмме (рис. 4) достаточно четко определяются зоны повышенного увлажнения (им отвечают зоны затухания сигнала). На данных аномальных участках была определена влажность грунтов земляного полотна. Дальнейшее установление связи между влажностью и диэлектрической проницаемостью грунта позволило подтвердить правильность интерпретации радарограм.

По результатам георадарного сканирования и дальнейшего экспериментального определения влажности грунтов земляного полотна было установлено, что возможной причиной просадки покрытия на данном участке дороги является повышенное увлажнение грунтов земляного полотна. Это может приводить к снижению несущей способности подстилающегося грунта и, как следствие, просадке дорожной конструкции. Окончательный вывод по данному участку дороги можно сделать только после расчетов сдвигающих напряжений в конструкции дорожной одежды и грунтах земляного полотна.

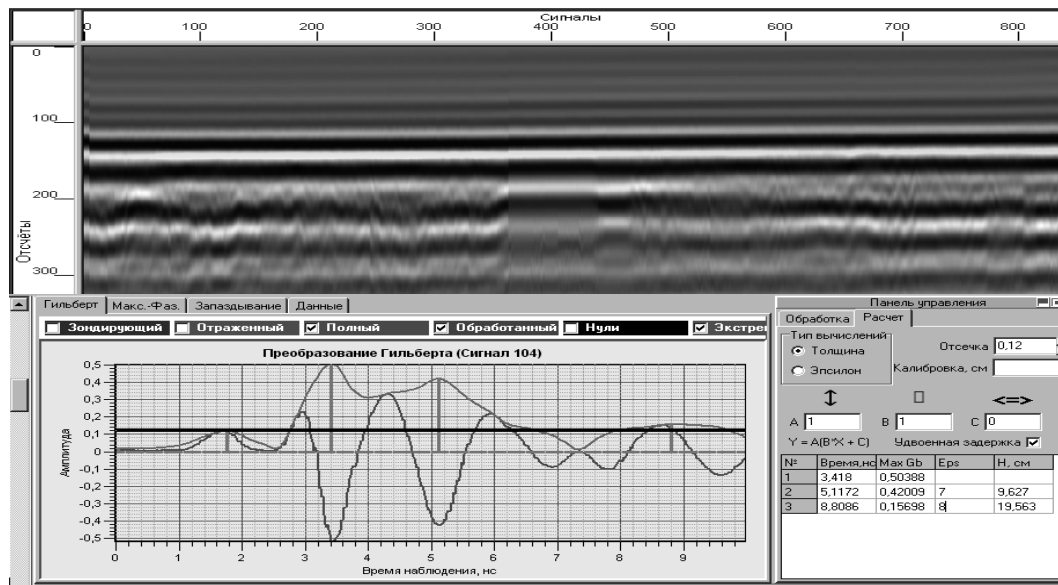


Рисунок 4 – Обследование дорожной одежды

Второй участок автомобильной дороги был выбран по критерию скорости развития деформаций и разрушений покрытия. По результатам визуального обследования и данными дефектных ведомостей системы управления состоянием покрытия (СУСП) на данной дороге выбирались участки, на которых мера поражения такими дефектами как колеиность, просадка, сетка трещин существенно образом возрастала из года в год.

Целью георадарного сканирования было установление возможных причин развития деформаций.

Зондирование участков велось в продольном и поперечном направлениях. В начале маршрута зондирования выполнялась калибровка георадарных данных с целью определения диэлектрической проницаемости слоев покрытия. Для идентификации подповерхностных дефектов, которые были установлены по результатам георадарного сканирования, проводился отбор кернов на исследуемом участке дороги.

Как свидетельствуют результаты георадарного сканирования поперечника на марке № 3 (рис. 5), в конструкции дорожной одежды наблюдается повышенная влажность слоев дорожной одежды и грунтов земляного полотна. Участкам повышенной влажности соответствуют зоны затухания сигналов.

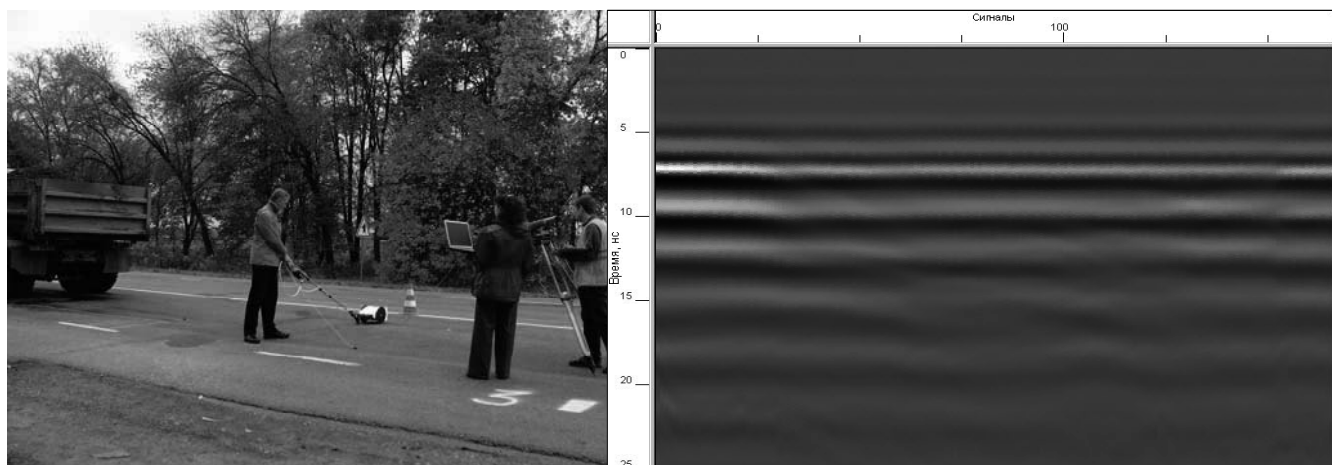


Рисунок 5 – Сканирование поперечного профиля на марке №3



Для подтверждения выводов, сделанных по результатам интерпретации радарограмм, на марке № 3 была определена влажность грунтов на обочине на глубине 50 см с помощью влагомера, а также проведен отбор кернов (рис. 6).



Рисунок 6 – Определение влажности грунтов на обочине на глубине 50 см; керны на марке № 3

По результатам отбора кернов определено, что слои основания переувлажнены, нижний слой асфальтобетонного покрытия поддается разборке вручную, что свидетельствует о существенном снижении прочностных характеристик материалов конструкции дорожной одежды.

Таким образом, георадарное обследование участка дороги на марке № 3 позволило сделать вывод, что первопричиной преждевременного разрушения конструкции дорожной одежды является небезопасность водоотвода от земляного полотна. Это необходимо учитывать при планировании и назначении мероприятий по ремонту и содержанию данного участка дороги.

Вместе с тем, сопоставление значений влажности грунтов земляного полотна и слоев дорожной одежды, полученных путем оценки данных о времени прохождения электромагнитного импульса георадара и путем гравиметрических измерений, показали, что расхождение между этими двумя методами составляет приблизительно 3 %.

Эти результаты свидетельствуют, что методы подповерхностного зондирования могут использоваться для точной, неразрушающей оценки влажности слоев дорожной одежды, грунтов земляного полотна, а также оценки эффективности дренажных слоев.

Литература

1. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004 – [Чинний від 2005-01-01]. – К.: Державна служба автомобільних доріг України (Укравтодор), 2004. – 153 с. – (Стандарт Укравтодор).
2. Scullion T. Pavement evaluations using ground penetrating radar in Texas / T. Scullion, C.L. Lau, Y. Chen // Proc. 5th Intl. Conf. on GPR, June 12-16, Kitchener, Ontario. – 1994. – Vol. 1 of 3. – PP. 449-463.
3. Maser K.R. Condition assessment of transportation infrastructure using ground-penetrating radar / K.R. Maser // J. Infrastruct. Syst. – 1996. – Vol. 2 (2). – PP. 94-101.
4. Saarenketo T. The use of ground penetrating radar for monitoring water movement in road structures / T. Saarenketo, T. Nikkinen, S. Lotvonen // Proc. 5th Intl. Conf. on GPR, June 12-16, Kitchener, Ontario. – 1994. – Vol. 3. – PP. 1181-1192.
5. Scullion T. Colormap – user's Manual with Case Studies. / T. Scullion, Y. Chen, C.L. Lau – Texas: DOTPD [Rep. TX-95-1341-1]. – 1995.
6. Денисов Р. Р. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме / Р. Р. Денисов, В. В. Капустин // Геофизика. – 2010. – №4. – С. 76-80
7. Владов М.Л. Введение в георадиолокацию: учебное пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд. МГУ, 2005. – 153 с.