

**О ПЕРСПЕКТИВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ
МОНОЛИТНЫХ СЛОЕВ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ
НЕРАЗРУШАЮЩИМ СПОСОБОМ**

Канд. техн. наук **Р.А. Еремин**
(ГБУ «Автомобильные дороги»)
Конт. информация: r.eremin.01@gmail.com

В статье описываются основанные на излучении и регистрации электромагнитных волн устройства и методы измерения толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев дорожной одежды. В результате анализа возможностей серийного оборудования и экспериментов других исследователей предлагается модель нового устройства для определения толщины асфальтобетона и цементобетона на базе георадарного оборудования.

Ключевые слова: дорожная одежда, измерение, толщина слоя, асфальтобетон, цементобетон, метод общей глубинной точки, георадар.

Асфальтобетон и цементобетон являются одними из наиболее дорогих материалов в конструкциях дорожных одежд, поэтому очевидно стремление собственников (правообладатели, владельцы) автомобильных дорог обеспечить соответствие толщины этих слоев проектным данным. Метод отбора кернов монолитных материалов позволяет лишь выборочно контролировать толщину слоев после их устройства, однако такой метод является дорогостоящим и негативно влияет на долговечность дорожной конструкции. Тем не менее имеются возможности измерения толщины асфальтобетона и цементобетона без бурения.

Рассмотрим ряд наиболее известных серийных приборов, работающих на основе излучения и регистрации электромагнитного импульса и позволяющих измерять толщину асфальтобетона и цементобетона неразрушающим способом. Приведем описание приборов производства Великобритании (E-spott) [1], Германии (MIT-SCAN-T3) [2], Норвегии (3D-Radar) [3] и США (RoadScan) [4].

Прибор **E-spott** [1] разработан специально для выполнения измерений толщины связных слоев дорожной одежды. Оборудование представляет собой небольшой короб с дисплеем, на котором отображается толщина слоев (**рис. 1**).

Благодаря небольшому весу прибора между точками измерений его переносят вручную. Таким прибором, установленным на поверхность дорожного покрытия, осуществляют измерения толщины слоя,

при этом на дисплее отображаются полученные два значения: верхнее и нижнее.



Рис. 1. Пример обследования дорожной конструкции прибором E-spot

Если проектная толщина слоя находится в пределах 7-15 см, то наиболее достоверным считается верхнее значение, в пределах 15-60 см – нижнее. Толщина слоя менее 7 см не регистрируется прибором, максимальная глубинность съемки – 60 см. В случаях, когда удалось зафиксировать отражение от подошвы измеряемого слоя, средняя погрешность измерений составляет порядка 5%. Однако данный прибор не снабжен средствами оперативного контроля (отсутствует режим профилирования с отображением записанного разреза и местоположения прибора на нем), что не позволяет достоверно оценивать отражение электромагнитной волны от искомой границы.

Прибор **MIT-SCAN-T3** [2] (рис. 2) является средством измерения с погрешностью $0,5\% \pm 1\text{ мм}$ от толщины обследуемого слоя. Диапазон измеряемой толщины составляет 0-50 см, с разрешающей способностью 1 мм. Указанная эффективность прибора обеспечивается исключительно в тех случаях, когда дорожная конструкция построена с встроенными маркерами из металлического материала (рис. 3), в иных случаях получить результаты не представляется возможным.



Рис. 2. Прибор MIT-SCAN-T3

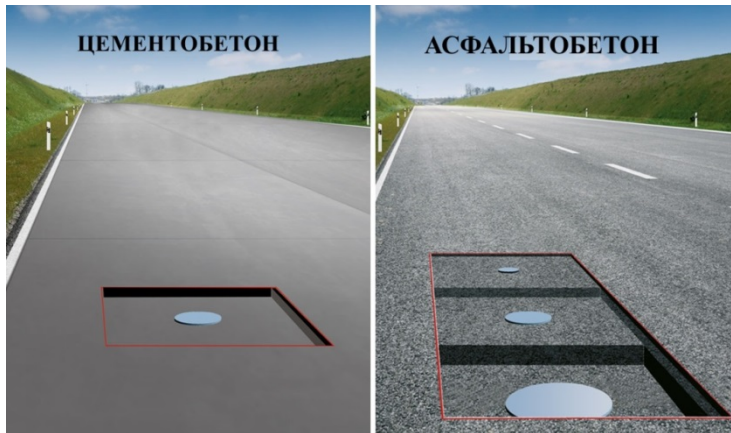


Рис. 3. Маркеры MIT REFLECTORS

Устройство *3D-Radar* [3] (рис. 4) не является специализированным оборудованием по измерению толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев дорожной одежды. Это – высокопроизводительный георадар, в большей степени ориентированный на решение широкого круга инженерных задач и обладающий возможностью обеспечения высокой плотности съемки за счет большого количества антенн. Благодаря конструкции антенного блока имеется возможность его работы по методу общей глубинной точки для измерений толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев. Антенный блок может крепиться на различных видах транспорта и дорожно-строительной техники.



Рис. 4. Антенный блок 3D-Radar

Система **RoadScan** [4] является более традиционным оборудованием (рис. 5).



Рис. 5. Система RoadScan

При помощи такой системы имеется возможность выполнять измерения толщины первого слоя (общей толщины пакета асфальтобетонных слоев) дорожной одежды по методу амплитуд за счет особой методики калибровки прибора над металлическим листом и программного

обеспечения, позволяющего автоматически в режиме записи отслеживать границу подошвы асфальтобетона.

Рассмотрим данное оборудование подробнее, поскольку его разработке предшествовала серьезная научно-экспериментальная работа [5], выполненная по заказу департамента транспорта США штата Калифорния в 2003 г. Целью работы было сравнение результатов по измерению толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев дорожных одежд различными способами: вариацией георадарных методов, импакт-эхо методом (англ. Impact-Echo method – метод волны удара) и технологией MRT (англ. Modeling the Multi-Receiver Technique – метод моделирования при помощи универсального приемника). При этом каждый из указанных способов позволял получать информацию без выполнения буровых работ, однако для проверки полученных результатов отбор кернов осуществлялся во всех случаях. Согласно материалам этой работы, наилучшие результаты в определении толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев показали измерения рупорной (бесконтактной) антенной по методу амплитуд (на его основе и базируется система RoadScan) и двумя грунтовыми (контактными) антеннами по методу общей глубинной точки. Погрешность измерений, согласно отчету, для метода амплитуд – 10 мм, для метода общей глубинной точки – 12 мм. При этом необходимо учитывать, что во время экспериментов по методу общей глубинной точки использовались грунтовые антенны, вследствие чего было невозможно измерить толщину слоев менее 75 мм. Кроме того, особенности конструкции грунтовых антенн характеризуются сравнительно большими погрешностями при выполнении измерений. Вероятно, по этой причине в системе RoadScan применены рупорные (бесконтактные) антенны, а не грунтовые (контактные). Несмотря на изначально неравные условия в конструкциях антенн, получены сопоставимые погрешности измерений по методу амплитуд и методу общей глубинной точки. Таким образом, объединив преимущества метода общей глубинной точки и рупорных (бесконтактных) антенн существует возможность повысить точность результатов измерений. Принимая в расчет минимальную разрешающую способность прибора *MIT-SCAN-T3* и экспериментально доказанную погрешность системы *RoadScan*, погрешность оборудования для измерения толщины асфальтобетона и цементобетона может быть менее 10 мм. Подтверждением этого предположения служат результаты экспериментальных работ, выполненных группой исследователей из политехнического университета Гонконга и университета штата Иллинойс США в Урбана-Шампейн (2013-2014 гг.) [6]. Исследователи модифицировали серийное георадарное оборудование, в результате получили бесконтактный антенный блок, работающий по методу общей глубинной точки (рис. 6).



Рис. 6. Бесконтактный антенный блок, работающий по методу общей глубинной точки

Для испытаний был подготовлен специальный полигон, на котором была произведена укладка асфальтобетонных слоев различной толщины, в основании которых были установлены металлические пластины, являющиеся абсолютным отражателем для электромагнитной волны. Для заверки полученных данных по толщине осуществлялся отбор кернов. Результаты показали, что погрешность измерений толщины слоев от 10 до 20 см находятся в пределах 0,9-4,2% (1-5 мм). Для слоев толщиной менее 10 см не удалось получить стабильного результата, как признали сами участники исследований, причиной тому является близкое расстояние между двумя антеннами. По их мнению, если бы расстояние между антеннами изменялось в процессе измерений, то можно было бы получить положительный результат и для толщины слоев менее 10 см.

На основании представленного материала можно сделать вывод, что метод общей глубинной точки является перспективным решением для измерения толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев дорожной конструкции.

Способы измерения толщины слоев подповерхностной среды *методом общей точки приема* [7]¹ или *методом общей глубинной точки* [8]² достаточно известны в инженерной геофизике. Однако они применяются для решения задач и инженерно-геологических изысканий (определение толщины слоев грунта) с использованием контактных (грунтовых) антенных блоков.

Годограф отраженной волны описывается уравнением (1) [7]:

$$t = \frac{(\sqrt{x^2 + 4h^2})}{V}, \quad (1)$$

где

t – время прихода электромагнитной волны в точку на оси синфазности, снятое с радарограммы;

h – толщина слоя;

x – расстояние от передающей антенны до приемной;

V – скорость распространения волн в слое.

Поскольку величины h и V являются неизменными для узкого диапазона обследуемой среды, имея 2 и более точек годографа, можно выразить величину h .

При использовании метода амплитуд [9] бесконтактный (рупорный) антенный блок георадара вывешивают над металлическим листом и выполняют георадиолокационные измерения. Затем осуществляют традиционные измерения методом георадиолокационного профилирования или зондирования. В ходе указанных процедур измеряют амплитуду отраженного сигнала от металлического листа и поверхности асфальтобетонного покрытия. Расчет толщины асфальтобетонных слоев при измерениях методом амплитуд производится по общеизвестной формуле (2) [9]:

$$h = \frac{c\Delta t}{2\sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

где

h – толщина слоя;

c – скорость света в вакууме;

Δt – двойное время пробега волны;

ϵ – диэлектрическая проницаемость.

¹ Метод общей точки приема заключается в перемещении передатчика относительно приемника.

² Метод общей глубинной точки заключается в одновременном удалении приемника и передатчика друг от друга с равной скоростью перемещения.

При этом диэлектрическая проницаемость определяется по формуле (3) [9]:

$$\sqrt{\varepsilon} = \frac{1 + \frac{A_0}{A_m}}{1 - \frac{A_0}{A_m}}, \quad (3)$$

где

A_0 – амплитуда отражения от поверхности асфальтобетонного покрытия;

A_m – амплитуда отражения от поверхности металлической пластины.

Бесконтактный антенный блок георадара, работающего по методу общей глубинной точки, конструкция которого устроена только из одного приемника и одного передатчика, закрепленных на специальном раздвижном кронштейне, равномерно перемещающихся друг относительно друга в ходе измерения, позволяет получить большое количество точек годографа, что повышает точность измерения толщины слоев асфальтобетона (цементобетона). Следует отметить, что при осуществлении измерений по методу общей глубинной точки в отличие от метода амплитуд оцениваются прямые, а не косвенные зависимости.

Далее рассмотрим модель нового устройства для определения толщины асфальтобетона и цементобетона на базе георадарного оборудования.

На **рис. 7** представлена измерительная мобильная лаборатория с антенным блоком 1 авторского устройства для определения толщины асфальтобетона (цементобетона) [10], установленного на автомобиле 2 с помощью специализированного крепления 3.

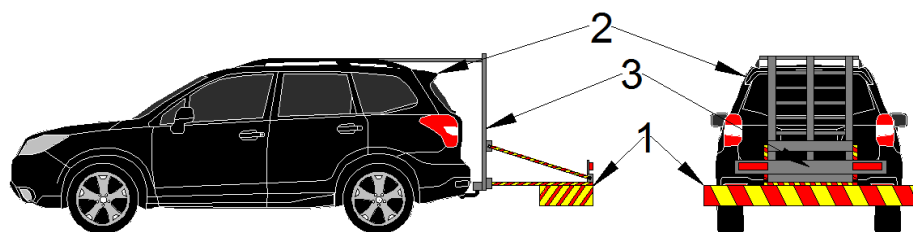


Рис. 7. Устройство для измерения толщины асфальтобетона (цементобетона)

Антенный блок устройства состоит из раздвижного кронштейна 4 и двух антенн 5 и 6 (рис. 8).

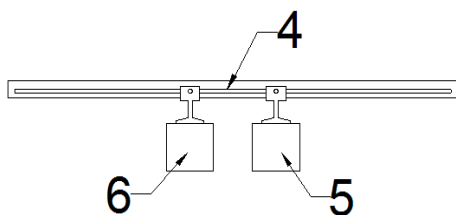


Рис. 8. Схема бесконтактного антенного блока устройства для определения толщины асфальтобетона (цементобетона)

В процессе измерений по методу общей глубинной точки раздвижной кронштейн 4 с помощью электропривода одновременно разносит друг относительно друга антенны 5 и 6 (рис. 9), при этом передатчик антенны 6 генерирует сигнал, а приемник антенны 5 регистрирует его, позволяя осуществлять измерение толщины асфальтобетонного слоя покрытия 7, уложенного на основание дорожной одежды 8.

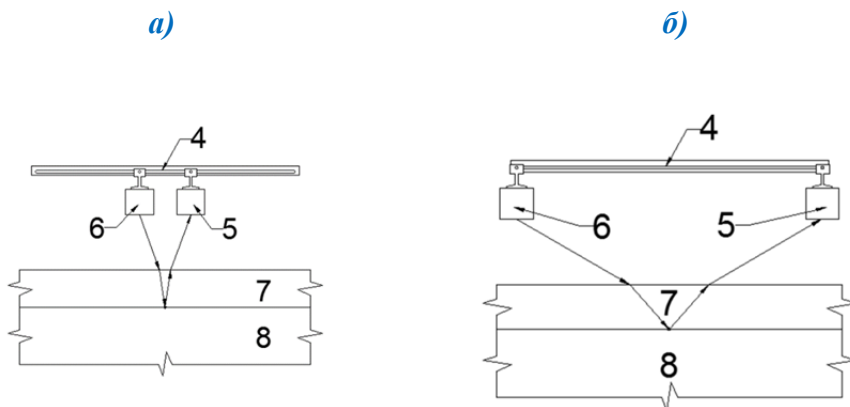


Рис. 9. Схема работы антенного блока по методу общей глубинной точки:

*а – положение антенн в начальный момент выполнения измерения;
б – положение антенн по окончании измерения*

Для проверки вышеизложенного необходимо разработать конструкторскую документацию, изготовить и апробировать прототип устройства для определения толщины слоя асфальтобетона (цементобетона). С целью выполнения экспериментов потребуется заверка методом отбора кернов на специально подготовленном полигоне и участках эксплуатируемых дорог. В ходе разработки и испытаний прототипа устройства с целью минимизации погрешности измерений следует определить следующее:

- оптимальные значения частоты приемно-передающих антенн;
- расстояния разноса антенн друг относительно друга;
- высоты отрыва антенн над поверхностью асфальтобетонного или цементобетонного слоев;
- тип и направление поляризации антенн;
- шаг сканирования и другие технические особенности.

Отдельным предметом исследований будет являться оптимизация работы раздвижного кронштейна с целью обеспечения возможности выполнения измерения методом общей глубинной точки в процессе движения мобильной лаборатории. Альтернативным вариантом изменения расстояния между приемником и передатчиком в ходе измерений по методу общей глубинной точки может быть симметричное перемещение каждой из антенн по траектории окружности или эллипса.

Устройство для определения толщины слоев асфальтобетона и цементобетона на базе георадарного оборудования будет актуально при осуществлении оценки соответствия выполненных дорожно-строительных работ в ходе операционного и приемочного контроля по ОДМ 218.3.075-2016 [11], а также при выполнении диагностики и инженерно-геологических изысканий по методическим рекомендациям по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций [12], ГОСТ 32836-2014 [13] и ГОСТ 32868-2014 [14].

ВЫВОДЫ

1. Георадарное оборудование, работающее по методу общей глубинной точки, позволяет выполнять измерения толщины асфальтобетонных и цементобетонных слоев дорожной одежды без бурения.
2. Разработка устройства для определения толщины слоев асфальтобетона и цементобетона имеет теоретические и эксперимен-

тальные предпосылки к выполнению измерений с фиксированной погрешностью, не превышающей 5% от толщины слоя.

3. Устройство для определения толщины слоев асфальтобетона и цементобетона на базе георадарного оборудования найдет широкое применение в рамках работ по диагностике, инженерным изысканиям, операционному и приемочному контролю в соответствии с положениями ГОСТ 32836-2014, ГОСТ 32868-2014, ОДМ 218.3.075-2016 и методическими рекомендациям по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *PipeHawk Plc* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pipehawk.com/products/e-spott> (дата обращения: 10.01.2017).
2. *MIT Mess- und Prüftechnik GmbH* [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mit-dresden.de/fileadmin/MIT-Dateien/Downloads/pdf/SCANT2/Description_of_the_Measuring_Method_042013.pdf (дата обращения: 22.02.2016).
3. *Lapland University of Applied Sciences* [Электронный ресурс] – URL: http://maranord.ramk.fi/static/content_files/3d-Radar_MARA_Nord_2012.pdf (дата обращения: 22.02.2016).
4. *Geophysical Survey Systems, Inc.* [Электронный ресурс] – URL: <http://www.geophysical.com/roadscan30.htm> (дата обращения: 10.01.2017).
5. *Kenneth R. Maser. Non-destructive Measurement of Pavement Layer Thickness / Final report.* – Caltrans No. 65A0074 / California Department of Transportation. – April 25th, 2003. – 91 p.
6. *Zhen Leng, Imad L. Al-Qadi. An Innovative Method for Measuring Pavement Dielectric Constant Using the Extended CMP Method with Two Air-coupled GPR Systems // NDT & E International.* – 2014. – № 9. – V. 66. – PP. 90–98. – Электрон. данные. – URL: <http://www.elsevier.com/locate/ndteint> (дата обращения 24.05.2016).
7. *Владов М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов: учебное пособие.* – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
8. *ПНСТ 55-2015. Коммуникации подземные. Определение местоположения и глубины залегания неразрушающими методами.* – М.: Стандартинформ, 2015. – 35 с.

9. C. Berthelot. *Application of Ground Penetrating Radar for Cold In-Place Recycled Road Systems* / Berthelot C., Scullion T., Gerbrandt R., Safronetz L. // *Journal of Transportation Engineering*. – 2001. – Jul. / Aug. – Vol. 127. – No 4. – PP. 269-274.
10. Пат. 166300 UI Российская Федерация, МПК G01B 15/02 (2006/01). *Устройство для определения толщины асфальтобетона (бетона) на базе георадарного оборудования [Текст] / Еремин Р.А.; заявитель и патентообладатель Еремин Р.А. – № 2016107853/28; заявл. 03.03.2016; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32.*
11. ОДМ 218.3.075-2016. *Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации / Утвержд. Распоряжением Росавтодора № 1025-р от 10.06.2016. – 75 с.*
12. *Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций / Росавтодор. – М., 2003. – 37 с.*
13. ГОСТ 32836-2014. *Дороги автомобильные общего пользования. Изыскания автомобильных дорог. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 57 с.*
14. ГОСТ 32868-2014. *Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий. – М.: Стандартинформ, 2016. – 62 с.*

L I T E R A T U R A

1. PipeHawk Plc [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pipehawk.com/products/e-spott> (дата обращения: 10.01.2017).
2. MIT Mess- und Prüftechnik GmbH [Электронный ресурс]. – URL: http://www.mit-dresden.de/fileadmin/MIT-Dateien/Downloads/pdf/SCANT2/Description_of_the_Measuring_Method_042013.pdf (дата обращения: 22.02.2016).
3. Lapland University of Applied Sciences [Электронный ресурс]. – URL: http://maranord.ramk.fi/static/content_files/3d-Radar_MARA_Nord_2012.pdf (дата обращения: 22.02.2016).
4. Geophysical Survey Systems, Inc. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.geophysical.com/roadscan30.htm> (дата обращения: 10.01.2017).

5. *Kenneth R. Maser. Non-destructive Measurement of Pavement Layer Thickness / Final report. – Caltrans No. 65A0074 / California Department of Transportation. – April 25th, 2003. – 91 p.*
6. *Zhen Leng, Imad L. Al-Qadi. An Innovative Method for Measuring Pavement Dielectric Constant Using the Extended CMP Method with Two Air-coupled GPR Systems // NDT & E International. – 2014. – № 9. – V. 66. – PP. 90–98. – Электрон. данные. – URL: <http://www.elsevier.com/locate/ndteint> (дата обращения 24.05.2016).*
7. *Vladov M.L. Vvedenie v georadiolokaciju / M.L. Vladov, A.V. Starovojtov: uchebnoe posobie. – M.: Izdatel'stvo MGU, 2004. – 153 s.*
8. *PNST 55-2015. Kommunikacii podzemnye. Opredelenie mestopolozhenija i glubiny zaleganiya nerazrushajushhimi metodami. – M.: Standartinform, 2015. – 35 s.*
9. *C. Berthelot. Application of Ground Penetrating Radar for Cold In-Place Recycled Road Systems / Berthelot C., Scullion T., Gerbrandt R., Safronetz L. // Journal of Transportation Engineering. – 2001. – Jul./Aug. – Vol. 127. – No 4. – PP. 269-274.*
10. *Pat. 166300 UI Russian Federation, IPC G01B 15/02 (2006/01). A Device for Determining the Thickness of Asphalt (concrete) on the Basis of GPR Equipment [Text] / Eremin RA.; the applicant and the patentee Eremin RA – № 2016107853/28; appl. 03/03/2016; publ. 20.11.2016. – Bull. No 32.*
11. *ODM 218.3.075-2016. Rekomendacii po kontrolju kachestva vypolnenija dorozhno-stroitel'nyh rabot metodom georadiolokacii / Utverzhd. Rasporjazheniem Rosavtodora # 1025-r ot 10.06.2016. – 75 s.*
12. *Metodicheskie rekomendacii po primeneniju georadarov pri obsledovanii dorozhnyh konstrukcij / Rosavtodor. – M., 2003. – 37 s.*
13. *GOST 32836-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Izyskanija avtomobil'nyh dorog. Obshhie trebovanija. – M.: Standartinform, 2016. – 57 s.*
14. *GOST 32868-2014. Dorogi avtomobil'nye obshhego pol'zovanija. Trebovanija k provedeniju inzhenerno-geologicheskikh izyskanij. – M.: Standartinform, 2016. – 62 s.*

***ABOUT PERSPECTIVES OF NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT
OF THE THICKNESS OF THE MONOLITHIC LAYERS
IN ROAD PAVEMENT***

*Ph. D. (Tech.) R.A. Eremin
(SBI «Roads»)*

Contact information: r.eremin.01@gmail.com

The article deals with devices and methods based on emission and recording of electromagnetic waves for measuring the thickness of asphalt concrete and cement concrete pavement layers. Following on from the analysis of the serial equipment features and the other researchers' experiments the new device model based on GPR for determining the thickness of the asphalt concrete and cement concrete is proposed.

Key words: *road pavement, measurement, layer thickness, asphalt concrete, cement concrete, common mid-point method, GPR.*

Рецензент: д-р тех. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 05.12.2016 г.