

4. Тимофеев, А.М. Энтропия потерь однофотонного асинхронного волоконно-оптического канала связи с приемником на основе счетчика фотонов с продлевающимся мертвым временем / А.М. Тимофеев // Актуальные проблемы науки XXI века, 2018. – вып. 7. – С. 5–10.

5. Тимофеев, А.М. Методика повышения достоверности принятых данных счетчика фотонов на основе анализа скорости счета импульсов при передаче двоичных символов «0» / А.М. Тимофеев // Приборы и методы измерений. – 2019. – т. 10. – № 1. – С. 80–89.

6. Тимофеев, А.М. Достоверность принятой информации при ее регистрации в однофотонном канале связи при помощи счетчика фотонов / А.М. Тимофеев // Информатика. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 90–98.

7. Тимофеев, А.М. Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник ТГТУ. – 2019. – т. 25. – № 1. – С. 36–46.

УДК 625.7.08

## ГЕОРАДАРНОАКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ГРУНТОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Кучинский П.В., Романов А.Ф., Ходасевич А.И., Чернобай И.А.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь

Одной из основных и важных составляющих обеспечения безопасности жизнедеятельности является надежность и качество автомобильных дорог. В целом надежность и качество дорог в сильной мере зависят от прочности и устойчивости подповерхностных грунтов, минимум влагосодержания которых является определяющим фактором прочности. На сегодняшний день не существует быстрых и доступных методов глубинного контроля влажности грунтов. Настоящая работа посвящена разработке нового георадарноакустического метода определения влажности подповерхностных грунтов автомобильных дорог.

Реализация метода основывается на комбинированном применении георадарного и акустического способов измерений, причем применяемая комбинация сочетает в себе положительные достоинства георадарного и акустического способов, что позволяет получить новый качественный результат по определению влажности подповерхностных слоев автомобильной дороги. Функционирование предлагаемого георадарноакустического способа заключается в одновременном излучении в подповерхностные грунты акустических импульсов и излучении коротких зондирующих радиоимпульсных сигналов с последующим приемом и детектированием сигналов, отраженных внутренними границами подповерхностных грунтов. Метод позволяет измерять толщину каждого слоя и времена распространения акустических импульсов в каждом подповерхностном слое. На основании измерений вычисляется скорость распространения акустической волны в каждом слое грунта. По результатам полученных вычислений определяется влагосодержание каждого слоя и оценивается его устойчивость и прочность.

Измерения скорости распространения акустических колебаний реализуется по временам распространения  $T_{P1}, T_{P2}, \dots, T_{Pn}$  акустических

волн, определяемым по моментам выделения фазоамплитудных флуктуаций отраженных радиолокационных сигналов от каждой границы между слоями, вибрирующей в соответствии со сдвигом фаз, вызванным распространением акустических волн от излучателя через контролируемые подповерхностные слои грунта. На основании полученных результатов для времен распространения вычисляются скорости распространения акустических волн в первом, втором, третьем ... и  $n$  – ом слоях:

$$v_1 = \frac{l_1}{T_{P1}}; v_n = \frac{l_n}{T_{Pn} - T_{Pn-1}}, \quad (1)$$

где  $l_1; l_2; \dots; l_n$  – толщины каждого слоя, измеряемые посредством отраженных радиолокационных сигналов по следующим формулам:

$$l_1 = \frac{c_0 t_1}{2\sqrt{\xi_1}}; \dots; l_n = \frac{c_0(t_n - t_{n-1})}{2\sqrt{\xi_n}}, \quad (2)$$

где:  $c_0$  – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме;  $t_1, t_2, \dots, t_n$  – отметки времени, измеряемые радиолокационным сигналом от момента времени излучения радиолокационного импульса до момента его приема при отражении от каждой границы между слоями;  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$  – величины диэлектрической проницаемости слоев.

Алгоритмом, описывающим функциональную зависимость диэлектрической проницаемости от влажности, является известная по литературным источникам достаточно сложная эмпирическая зависимость диэлектрической проницаемости грунтов от влажности [1,2]:

$$\xi = 3,03 + 9,3W_{об} + 146W_{об}^2 - 76,6W_{об}^3, \quad (3)$$

где:  $W_{об}$  - доля объемной влажности по отношению к плотности сухой породы в единице объема среды.

Функциональная зависимость (3) позволяет вычислительным методом определять влажность грунтов как функцию диэлектрической проницаемости, однако является ориентировочной. Определение влажности путем измерения диэлектрической проницаемости приводит к весьма приблизительным результатам по следующим причинам: имеют место погрешности влияния величин используемых частот, а также еще в большей мере имеют место погрешности за счет изменения и влияния физико-химических параметров подповерхностных грунтов, в особенности за счет их минерализации. Невозможность серьезной ориентировки на определение влажности подповерхностных грунтов дорожных конструкций посредством определения диэлектрической проницаемости грунтов подтверждается не только неопределенностью и нестабильностью функциональной зависимости  $W_n = W_0 \cdot f(\xi)_n$ , но и функциональной зависимостью относительной погрешности диэлектрической проницаемости подповерхностных грунтов от изменения температуры грунтов. Величина относительной погрешности определения диэлектрической проницаемости подповерхностных грунтов в зависимости от температуры грунтов исследовалась в работе [3] и представлена рисунком 1.

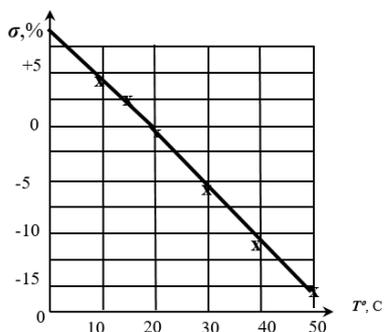


Рисунок 1 – Относительная погрешность определения диэлектрической проницаемости подповерхностных грунтов в зависимости от температуры грунтов из которого видно, что возникающие погрешности до  $\pm 15 \%$  накладывают ограничения на применимость этого метода по измерению влажности подповерхностных грунтов дорожных конструкций

Поэтому для получения достаточно высокой точности измерений в основу функционирования был положен более совершенный алгоритм [4], основанный на определении скорости распространения акустических волн в соответствии с уравнениями (1) и (2) в подповерхностных грунтах дорожных конструкций, так как функцио-

нальная зависимость скорости распространения акустических волн в подповерхностных грунтах различного состава имеет наиболее высокую степень корреляции с массовой долей влажности грунта. Зависимость скорости распространения в грунтах различного состава от массовой доли влажности грунта приведена на рисунке 2.

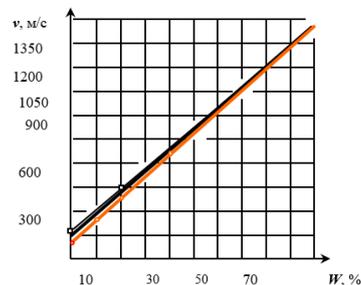


Рисунок 2 – Функциональная зависимость скорости распространения акустических волн в подповерхностных грунтах различного состава от массовой доли влажности грунта:  
 — □ — песок средней крупности;  
 — х — суглинок тяжелый;  
 — о — песок мелкой крупности

При этом важным моментом является то, что вычисленная относительная погрешность определения скорости распространения акустических волн в подповерхностных грунтах в зависимости от температуры грунтов является сравнительно небольшой. Функциональная температурная зависимость оценивалась в диапазоне от нулевой до 100 %-ной влажности грунта и составляет по абсолютной величине не более  $\pm 5 \%$ .

Эта погрешность может быть скомпенсирована путем введения температурной поправки, например путем измерения наружной температуры с последующей ее интерпретацией к внутренним слоям подповерхностных грунтов дорожных конструкций и с внесением температурных поправок в измерительно-регистрирующее устройство аппаратного комплекса, реализующего предложенный георадарноакустический метод.

#### Литература

1. Перспективные направления в развитии георадиолокационных исследований/ООО «НПЦ Геотех» [http://www.geotech.ru/about/stati/perspektivnye\\_napraleniya\\_v\\_razvitiy\\_georadiolokacionnyh\\_issledovaniy/](http://www.geotech.ru/about/stati/perspektivnye_napraleniya_v_razvitiy_georadiolokacionnyh_issledovaniy/)
2. Влияние влажности на диэлектрическую проницаемость «Справочник химика 21 века». – Москва. – 2001.
3. Antennas in Matter. Fundamentals, Theory and Applications. Ronold W.P. King, Glenn S. Smith. Cambridge, Massachusetts, and London. England. 1991.
4. Aliakseyeu, Yury Georadar vibration-acoustic technology for express-control of road pavement strength and results of its application / Zhongyu Li, Yury Aliakseyeu, Jicun Shi, Anatoly Romanov, Yuheng Liu, Xuejun Yue, Yonghui Chen, Aliaksandr Khadasevich, Ivan Charnabai // <https://www.jvejournals.com/article/20237>.