

Определение эффективных электрофизических свойств слоя асфальтобетона с целью оценки его качественного состава

Н. В. Штабель^{1,2}, Е. И. Штанько¹, Д. В. Добролюбова^{1,2}*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

*e-mail: orlovskayanv@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Разработка методики бесконтактной оценки качества уложенного дорожного полотна без извлечения проб для анализа является крайне актуальной задачей. В работе предлагается оценить степень влияния гранулометрического состава образца верхнего слоя дорожного покрытия на его эффективные электромагнитные свойства. Это позволит в дальнейшем оценить толщину и фактический состав уложенного покрытия по данным бесконтактных измерений, с учетом полученных функциональных связей между измеряемыми эффективными значениями (диэлектрическая проницаемость и/или электрическое сопротивление) и качественным составом исследованных численно образцов верхнего слоя дорожного покрытия, рассматриваемого на данном этапе как однородная среда с характерными эффективными электромагнитными свойствами. Математическое моделирование образцов с учетом их гетерогенной внутренней структуры выполняется векторным методом конечных элементов. Определение эффективных свойств среды осуществляется на основе проведенного прямого моделирования в трехмерной расчетной области, приближенной по своей внутренней геометрии и физическим свойствам к образцу асфальтобетона.

Ключевые слова: векторный метод конечных элементов, эффективных характеристики среды, асфальтобетон

Calculation of Effective Electrophysical Properties of Asphalt Concrete Layer in Order to Assess Its Qualitative Composition

N. V. Shtabel^{1,2}, E. I. Shtanko¹, D. V. Dobrolubova^{1,2}*

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

*e-mail: orlovskayanv@ipgg.sbras.ru

Abstract. The development of a non-contact technique for the road surface quality control without extracting samples for analysis is an extremely urgent task. The paper proposes to evaluate the influence of the granulometric composition of the road surface sample on its effective electromagnetic properties. This will make it possible to assess the thickness and actual content of the paved surface according to the data of non-contact measurements. It will be possible to obtain the functional relationships between the measured effective values (dielectric permeability and/or electrical resistance) and the qualitative composition of the numerically studied samples of the road surface, considered at this stage as a homogeneous medium with characteristic effective electromagnetic properties. Mathematical modeling of the samples considering their heterogeneous internal structure is performed by the vector method of finite elements. The effective properties of the medium are

determined by direct modeling in a three-dimensional calculation domain approximated by its internal geometry and physical properties to the asphalt concrete sample.

Keywords: vector finite element method, effective characteristics, asphalt concrete

Введение

Качественно уложенное асфальтобетонное покрытие на дорогах – залог их долгой эксплуатации, снижения затрат на капитальный ремонт, а также снижения аварийности по причине образования колеи, трещин и ям на дорожном полотне. Существующие на сегодняшний день процедуры проверки качества ремонта дорожного полотна предполагают извлечение образца покрытия путем вырезания отверстия и изучение его гранулометрического состава в лабораторных условиях [1]. Ширина полученных отверстий незаметна для проезжающего автомобильного транспорта, но может быть источником повышенной опасности для мотоциклов, велосипедов и самокатов. Кроме того, нарушенная целостность дорожного полотна позволяет осадкам проникать в более глубокие слои дороги, что является неблагоприятным фактором для эксплуатации.

Одним из возможных решений проблемы оценки качества дорожного покрытия является разработка бесконтактных методов исследования на базе геофизических электромагнитных методов измерений. Верхний слой дорожного полотна состоит из включений твердых горных пород различной степени мелкости, песка и связующего компонента на основе битумных смол [2]. Все это делает объект изучения крайне неоднородным по электромагнитным свойствам.

Гомогенизацией называется оценка электромагнитных свойств асфальтобетонной смеси (электропроводность/удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость) как однородного объекта с эффективными свойствами. Среди предлагаемых в литературе методов определения эффективных электрических свойств среды можно выделить широкий класс аналитических подходов [3-5], активно применяемых для гомогенизации свойств сред с периодической внутренней структурой, либо при наличии некоторой априорной информации о форме неоднородностей и их расположении. Различные подходы, основанные на асимптотических приближениях уравнения Пуассона [6] также могут быть отнесены к аналитическим или полуаналитическим методам гомогенизации. Применение схем, строящихся в предположении об особом строении внутренней структуры образца, для сред вида асфальтобетона с произвольной разномасштабной внутренней структурой затруднительно.

Для стационарного электромагнитного воздействия разработаны модификации аналитических схем, позволяющие вычислять эффективные характеристики в тензорной форме [7]. В частотной области такие подходы реализуются значительно реже и в основном для метаматериалов, имеющих специфическую внутреннюю структуру [8].

Для сред с произвольной внутренней структурой наиболее перспективными выглядят численные методы гомогенизации, включающие в себя прямое моделирование электромагнитного поля в среде с неоднородностями [9].

В работе рассматривается применение алгоритма гомогенизации электрофизических свойств гетерогенной среды с произвольной внутренней структурой, в основе которого лежит численное моделирование процесса распространения электромагнитного поля в исследуемом образце [10]. Алгоритм адаптирован для применения в средах, имитирующих асфальтобетонную смесь. Проведение математического моделирования на серии таких образцов позволит получить набор значений эффективных коэффициентов электропроводности и диэлектрической проницаемости для различных вариаций их гранулометрического состава. Сформированная база эффективных характеристик затем может быть использована для интерпретации данных неразрушающих электромагнитных измерений.

Методы и материалы

Асфальтобетонная смесь состоит из минеральной части (щебень, песок, минеральный порошок) и битумного вяжущего компонента, а также вкраплений воздушных пузырьков, количество которых должно быть минимальным. Типы асфальтобетона разделяют по максимальному размеру минерального наполнения. Размер включений твердых горных пород может быть от 4 до 16 мм. К основным показателям асфальтобетонных смесей относятся: глубина вдавливания штампа, зерновой состав и содержание вяжущего вещества. К дополнительным показателям относятся: содержание воздушных пустот, предел прочности на растяжение при изгибе, предельная относительная деформация растяжения, истираемость [2]. Бесконтактными электромагнитными методами можно оценить зерновой состав и содержание вяжущего вещества, а также идентифицировать наличие воздушных пустот.

Согласно ГОСТу [11], в состав асфальтобетона должны входить частицы с размерами 40 мм, 20 мм, 15 мм, 10 мм и 5 мм. По зерновому составу асфальтобетон разделяют на: асфальт с крупным щебнем (или крупнозернистый) с максимальным размером частиц 40 мм и асфальт с мелким щебнем (он же мелкозернистый, до 20 мм). Основу мелкозернистого щебня составляют фракции 5–20 и 10–20. Такой щебень используется для верхнего слоя дорожного покрытия. Оптимальная форма щебня для асфальта – кубическая и тетраэдрическая. Такие камни хорошо трамбуются и уплотняются. Но в процессе дробления породы могут образовываться игловидные и плоские частицы. Их называют лещадными. Доля лещадных частиц варьируется от 15 до 35% в зависимости от группы по ГОСТу.

В данной работе в качестве образца асфальтобетона рассматривается идеализированный виртуальный аналог образца верхнего дорожного покрытия, приведенный на рис.1. В нем присутствуют как кубические, так и тетраэдральные формы включений. Приведенный образец является первым приближением к реальной среде, на котором можно оценить влияние формы, количества включений и их материалов на эффективный тензор. В дальнейших исследованиях предполагается переход к хаотичным распределениям и включениям произвольной формы, однако, близкой к кубической или тетраэдральной.

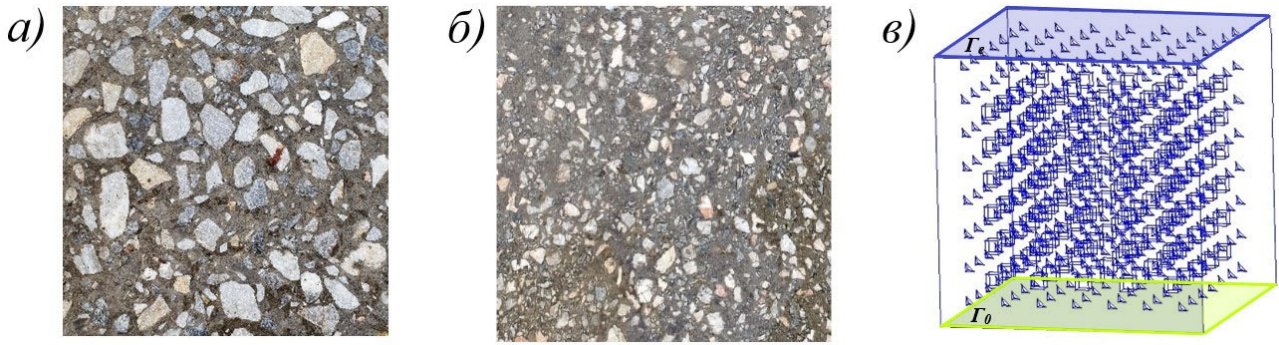


Рис. 1. а), б) образец дорожного покрытия; в) модель образца

Этап прямого численного моделирования заключается в расчете электромагнитного поля в приведенной на рис.1 области. Распространение электрической волны в среде описывается уравнением Гельмгольца:

$$\nabla \times \mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E} + i\omega(\sigma + i\omega\varepsilon)\mathbf{E} = 0 \text{ в } \Omega \quad (1)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического поля [В/м]; $\mu = \mu_0\mu_r$ – магнитная проницаемость [Гн/м], $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота [Гц], f – частота источника электромагнитного поля [Гц], σ – удельная электропроводность [См/м], $\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r$ – диэлектрическая проницаемость [Ф/м], ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; Ω – трехмерная расчетная область с Липшиц-непрерывной границей $\Gamma = \Gamma_e \cup \Gamma_0 \cup \Gamma_m$.

На внешней границе Γ области Ω заданы следующие краевые условия:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \times \mathbf{E}|_{\Gamma_e} &= \mathbf{E}_g, \\ \mathbf{n} \times \mathbf{E}|_{\Gamma_0} &= \mathbf{0}, \\ \mathbf{n} \times \mu^{-1} \nabla \times \mathbf{E}|_{\Gamma_m} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{n} – единичная внешняя нормаль к границе области, \mathbf{E}_g – ненулевой вектор, задающий возбуждение поля на внешней границе.

Численное решение поставленной задачи выполняется векторным методом конечных элементов [12] на согласованном адаптивном симплицальной разбиении расчетной области Ω , учитывающим внутренние неоднородности среды.

Эффективная электрическая характеристика среды вводится как комплекснозначный тензор второго ранга вида:

$$\mathbf{Z}^{eff} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} = \text{Re}(\mathbf{Z}^{eff}) + i\omega\varepsilon_0 \text{Im}(\mathbf{Z}^{eff}) \quad (3)$$

Введенная величина определяется из взаимосвязи напряженности электрического поля \mathbf{E} и ротора напряженности магнитного поля \mathbf{H} , устанавливаемой законом Максвелла-Ампера:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \underbrace{(\sigma + i\omega\varepsilon)}_{Z^{eff}} \mathbf{E} \quad (4)$$

Эффективный тензор среды вычисляется в результате арифметического осреднения тензоров Z , полученных в результате решения СЛАУ вида [10]:

$$\begin{bmatrix} E_x(x_i) & E_y(x_i) & E_z(x_i) \\ E_x(x_j) & E_y(x_j) & E_z(x_j) \\ E_x(x_k) & E_y(x_k) & E_z(x_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{m1} \\ Z_{m2} \\ Z_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{H}_m(x_i) \\ \tilde{H}_m(x_j) \\ \tilde{H}_m(x_k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\tilde{H}_m(x_i)$, $m=1,2,3$ – компоненты вектора $\nabla \times \mathbf{H}$ в точках $x_i, x_j, x_k \in \Omega$, $Z_{m1}, Z_{m2}, Z_{m3}, m=1,2,3$ – элементы m -ой строки тензора Z^{eff} . В общем случае, когда рассматриваются трехмерные области с произвольной внутренней структурой, не обладающие специфической внутренней симметрией, заранее предсказать вид эффективного тензора нельзя, он считается комплекснозначным и несимметричным [13-15].

Результаты

Для асфальтобетона на дорогах с интенсивным движением подходит щебень, состоящий из таких горных пород как габбро, диорит или гранит. В качестве связующего вещества используются битумные смолы.

Экспериментальный образец приведен на рис. 1. Внешние габаритные размеры $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м. Построенная модель содержит включения щебня кубической формы (125 включений) со стороной $0,005$ м, тетраэдральной формы (343 включения) с радиусом описанной сферы $0,005$ м. Физические параметры включений для расчетов использовались следующие [16]: гранит $\sigma = 10^{-7}$ См/м, габбро $\sigma = 10^{-5}$ См/м, битумная смола $\sigma = 10^{-14}$ См/м. Диэлектрические и магнитные свойства соответствуют диэлектрической и магнитной проницаемостям вакуума. Частота возбуждения внешнего электромагнитного поля 1 МГц.

Рассмотрено 5 различных образцов верхнего слоя асфальтобетона. Гранулометрический состав образцов представлен в таблице 1.

Образец 1 содержит смесь щебня разной геометрической формы и разной породы. В образцах 2 и 3 исключаются включения одной или другой породы относительно образца 1. В образцах 4 и 5 варьируется материал включений (гранит или габбро), при этом он выбирается одинаковым для включений разной формы.

Эффективные тензоры, полученные для каждого образца, согласно (5) имеют одинаковую мнимую часть, диагональные значения, которой соответ-

свуют диэлектрической проницаемости вакуума, умноженной на частоту и равны $5,560e-05$. В таблице 2 представлены действительные части эффективных тензоров для каждого образца.

Таблица 1

Гранулометрический состав образцов

Образец	Матрица	Кубические включения	Тетраэдральные включения
Образец 1	битум	гранит	габбро
Образец 2	битум	гранит	битум
Образец 3	битум	битум	габбро
Образец 4	битум	гранит	гранит
Образец 5	битум	габбро	габбро

Таблица 2

Действительная часть эффективной характеристики

Образец	Z^{Re}		
Образец 1	1,248e-07	-9,563e-10	4,227e-10
	-4,598e-11	1,247e-07	2,181e-10
	1,568e-10	-2,950e-09	1,259e-07
Образец 2	3,814e-09	2,001e-10	2,806e-11
	-2,365e-11	3,914e-09	2,220e-13
	-3,767e-11	3,085e-10	3,866e-09
Образец 3	1,285e-07	-6,581e-10	-1,849e-10
	-6,653e-11	1,283e-07	4,101e-10
	6,414e-11	-2,879e-09	1,296e-07
Образец 4	5,104e-09	5,340e-10	-2,376e-11
	9,000e-13	5,131e-09	1,705e-11
	-5,148e-12	-1,689e-10	5,109e-09
Образец 5	5,003e-07	2,511e-10	-9,909e-12
	-4,805e-12	5,003e-07	-4,492e-11
	-1,478e-10	-3,420e-10	5,004e-07

Обсуждение

Рассмотренные геометрии образцов и породы не предполагают наличие какой-либо анизотропии, что подтверждается структурой вычисленных тензоров. Эффективные тензоры обладают значительным диагональным преобладанием (2-5 порядков), внедиагональные элементы можно считать близкими к вычислительному нулю. Соответственно в данной конфигурации говорить о симметрии или плотном заполнении тензора не имеет смысла. Значения диагональных элементов слабо изменяются в зависимости от направления – менее чем на 1% для всех образцов, кроме образца 2 (различие менее 3%).

Анализ действительных частей эффективных тензоров для рассмотренных образцов показывает, что можно определить наличие включений из габбро по порядку получаемых диагональных значений тензора. Образцы, содержащие щебень из габбро, имеют диагональные элементы тензора порядка 10^{-7} , что на два порядка меньше электропроводности габбро. Образцы, содержащие щебень из гранита, имеют диагональные элементы тензора порядка 10^{-9} , что также на два порядка меньше электропроводности гранита, используемого для расчета.

Сравнивая тензоры, полученные для третьего и пятого образцов, содержащих включения из габбро в различной концентрации, видно, что большее количество включений дает больший отклик в тензоре. Диагональные значения тензора с тетраэдральными включениями из габбро дает примерно в пять раз меньший отклик по сравнению с образцом, содержащим и кубические, и тетраэдральные включения из габбро.

Образцы 2 и 4 дают похожие результаты на разной концентрации включений. В образце 2 присутствуют только кубические включения из гранита, в образце 4 все включения из гранита. Отношение диагональных компонент полученных тензоров 4 и 2 составляет примерно 1,3.

Образец со смешанным щебнем в составе по результатам вычисления эффективного тензора приближен к образцу с тетраэдральными включениями из габбро, но относительная разница диагональных элементов составляет около 3%. Присутствие кубических включений из гранита уменьшает полученные диагональные значения тензора.

Заключение

В работе рассмотрено приложение алгоритма гомогенизации электрических свойств гетерогенной среды, разработанного и реализованного авторами, для определения эффективных свойств синтетического образца асфальтобетона. Для набора модельных сред определены эффективные тензорные характеристики при изменении формы включений, их объема и материала. На основе проведенных вычислений показано, что можно качественно оценить тип породы используемого щебня и объем включений на основе анализа рассчитанных эффективных тензоров. Дальнейшее развитие исследований предполагает переход к образцам с нерегулярной внутренней структурой для определения палеток эффективных характеристик, которые будут использованы в качестве физических свойств верхнего слоя дороги при расчетах прямых задач методом частотного зондирования.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ FWZZ-2022-0025.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 58407.5-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Методы отбора проб из уплотненных слоев дорожной одежды.
2. ГОСТ Р 54401-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси литые асфальтобетонные дорожные горячие и асфальтобетон литой дорожный. Технические условия.

3. Markel V. A. Introduction to the Maxwell Garnett approximation: tutorial // JOSA A. –2016. – Vol. 33. – №. 7. – P. 1244-1256.
4. Talebian E., Talebian M. A general review on the derivation of Clausius–Mossotti relation // Optik. – 2013. – Vol. 124. – №. 16. – P. 2324-2326.
5. Cruciani S., De Santis V., Feliziani M., Maradei F. Cole-Cole vs Debye models for the assessment of electromagnetic fields inside biological tissues produced by wideband EMF sources // IEEE. – 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – P. 685-688.
6. Andrianov I. V., Awrejcewicz J., Starushenko G. A. Asymptotic models and transport properties of densely packed, high-contrast fibre composites. Part I: Square lattice of circular inclusions // Composite Structures. – 2017. – Vol. 179. – P. 617-627.
7. Kidwai O., Zhukovsky S. V., Sipe J. E. Effective-medium approach to planar multilayer hyperbolic metamaterials: Strengths and limitations // Physical Review A. – 2012. – Vol. 85. – №. 5. – P. 053842.
8. Каневский В. И., Розенбаум В. М., Шкода Н. Г. Рассеяние плоских электромагнитных волн на углеродной нанотрубке // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Vol. 3. – №. 5 (63).
9. Ren Z., Qiu L., Tang J., Wu X., Xiao X., Zhou Z. 3-D direct current resistivity anisotropic modelling by goal-oriented adaptive finite element methods // Geophysical Journal International. – 2018. – Vol. 212. – №. 1. – P. 76-87.
10. Shurina E.P., Epov M.I., Shtabel N.V., Mikhaylova E.I. The Calculation of the Effective Tensor Coefficient of the Medium for the Objects with Microinclusions // Engineering. – 2014. – Vol. 6. – № 3. – P.101-112.
11. ГОСТ 32703-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования.
12. Monk P. Finite element methods for Maxwell's equations. – Oxford University Press: Numerical Mathematics and Scientific Computation, 2003. – 446 p.
13. Bergman D.J., Li X., Strelnik Y.M. Macroscopic conductivity tensor of a three-dimensional composite with a one or two-dimensional microstructure // Physical Review B. – 2005. – Vol. 71. – № 3. – P. 035120.
14. Overhauser A. Anomalous Effects in Simple Metals. – John Wiley & Sons, 2011. – 706 p.
15. Caldwell T. G., Bibby H. M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. – 2004. – Vol. 158. – P. 457–469.
16. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М: URSS, 2019. – 368 с.

© Н. В. Штабель, Е. И. Штанько, Д. В. Добролюбова, 2022