



Dielectric Constant of Asphalt Concrete Pavement

Kirillov, A.M.^{1*}

¹ Automotive-road college, Sochi, Russian Federation

* kirill806@gmail.com

Keywords:

Asphalt concrete; Dielectric constant; Adhesion; Monitoring of the pavement; Concrete pavement

Abstract:

The article investigates the temporal evolution of the dielectric constant of asphalt concrete pavement. Analysis of the electrophysical properties of the pavement makes it possible to monitor its operational properties and predict the residual life. Considered the relationship of the physico-mechanical properties of the asphalt mix (asphalt pavement) with its electrophysical properties, and the behavior of the dielectric constant of the coating during its operation. As a result, the following conclusions were drawn: 1) the dielectric constant, correlating with the adhesive and cohesive properties of the material, can serve as a parameter for monitoring the condition of pavements in order to assess the residual life of the pavement; 2) modeling of the asphalt concrete road mixture using a layered capacitor allows us to describe the evolution of its dielectric constant in good agreement with the actual behavior of this parameter during operation of the road surface.

1 Introduction

Площади современных автомобильных дорог исчисляются тысячами квадратных километров, поэтому актуальны исследования по разработке экспресс-методов мониторинга их состояния. К таким методам относятся электрофизические методы, достоинство которых - это быстрота и относительная простота измерений электрофизических свойств материалов и конструкций. Электрофизические свойства же тесно связаны с составом, плотностью, прочностными показателями, которые необходимо контролировать в соответствии с требованиями материаловедения.

Связь механических и электрофизических свойств материалов рассмотрим на примере такого явления как адгезия. В физике адгезия определяется, как сцепление поверхностей разнородных твердых и/или жидких тел, и обусловлена межмолекулярными взаимодействиями в поверхностном слое (на границе раздела фаз). Адгезия – это межфазное взаимодействие, приводящее к уменьшению поверхностной энергии системы. Количественной мерой процесса сцепления битума с поверхностью минерального материала служит работа адгезии, пропорционально которой изменяется сцепление битума с минеральным материалом.

Адгезия матрицы и наполнителя композитов (композиционных материалов) является также одним из важнейших факторов, влияющих на их прочность. Асфальтобетон - это композиционный материал, состоящий из минеральных частиц (размером от нескольких микрон до десятков миллиметров), соединенных всего несколькими процентами битума. Поэтому адгезионные свойства дорожного битума, безусловно, влияют на качество асфальтобетонной смеси, определяя прочностные характеристики этого композиционного материала. Адгезия битумного вяжущего к минеральным материалам является параметром, определяющим долговечность строительных конструкций и покрытий дорог.

Таким образом, исследования адгезионных свойств асфальтобетона, несомненно, являются актуальными.

Исследования [1-5] показали, что такие свойства, как адгезия A и диэлектрическая проницаемость ϵ битумов коррелируют. Это, по мнению авторов [3], позволяет использовать диэлектрическую проницаемость как показатель для оценки качества битумного вяжущего и значительно интенсифицировать процесс определения адгезионных свойств битумов.

Данную корреляцию на качественном уровне достаточно легко объяснить с помощью электрической теории адгезии. С точки зрения электрической теории «адгезионные силы» имеют электрическую природу и вызваны образованием электрического поля на границе раздела плёнки битума и твёрдого минерального материала. Эта ситуация тождественна притяжению разноименно заряженных обкладок конденсатора. Энергия электрических и, соответственно, «адгезионных» сил равна:

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V E^2}{2}, \quad (1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, V – объем области пространства, в которой сосредоточено электрическое поле напряженностью E .

Таким образом, на основании вышесказанного и соотношения (1) можно заключить, что адгезия $A \sim \varepsilon$.

С уменьшением толщины d пленки вяжущего на минеральном материале адгезия увеличивается по гиперболическому закону [6, 7], что также объясняется с помощью выражения (1), записанного в виде:

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S U^2}{2d}. \quad (2)$$

В выражении (2) площади пленки S сопоставлена площадь пластин конденсатора, толщине пленки d – расстояние между обкладками конденсатора, $U = E \cdot d$ – электрическое напряжение на обкладках конденсатора.

На характеристики битумных материалов кроме его адгезионных свойств влияют также и когезионные свойства [8]. Если силы адгезии действуют между частицами разных фаз, то когезионные силы действуют между частицами одной фазы. Как адгезионные, так и когезионные свойства зависят от полярности его компонентов. Диэлектрическая проницаемость косвенно характеризует степень полярности частиц материала и их количество в единице объема, поэтому может использоваться для оценки адгезионных и когезионных свойств битума и материалов с его использованием, в частности асфальтобетонных дорожных смесей и, соответственно, для оценки состояния асфальтобетонных дорожных покрытий [9-14].

В последние годы в автодорожной отрасли значительное место занял относительно новый метод – метод подповерхностной георадиолокации [15-19] и электрофизические свойства дорожных материалов имеют здесь первостепенное значение.

Объектом исследования в данной работе является диэлектрическая проницаемость асфальтобетонного дорожного покрытия. Данное исследование актуально для дорожной отрасли в связи с тем, что электрофизические и механические свойства дорожных строительных материалов коррелируют друг с другом. Анализ электрофизических свойств дорожного покрытия дает возможность мониторинга его эксплуатационных свойств и прогнозирования остаточного ресурса. Рассмотрены: 1) вопросы связи физико-механических свойств асфальтобетонной смеси (асфальтобетонного дорожного покрытия) с ее электрофизическими свойствами; 2) поведение диэлектрической проницаемости покрытия в процессе его эксплуатации.

2 Methods

В работе применяются методы физико-математического моделирования и численного анализа на его основе. Например, дорожная асфальтобетонная смесь моделируется плоским конденсатором слоистой структуры. Проводится сравнительный анализ численных расчетов по этой модели и по другим известным моделям, описывающим композиционный диэлектрик (например, модели Максвелла и Максвелла-Гарнетта).

Асфальтобетон – композиционный материал и, несомненно, его диэлектрическая проницаемость зависит от диэлектрических проницаемостей его компонентов и их удельного содержания в материале. Согласно [21], дисперсная среда с хаотической структурой может быть представлена в виде диэлектрических слоев («емкостная» модель). Рассматривая плоский конденсатор с композитом в качестве диэлектрика и считая, что компоненты композита последовательно расположены слоями, параллельными обкладкам (рис. 1), можно получить выражение для диэлектрической проницаемости композита:

$$\varepsilon = \frac{d}{\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} + \dots + \frac{d_n}{\varepsilon_n}} = \frac{d}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i}}, \quad (3)$$

где d – расстояние между обкладками конденсатора, d_i – толщина слоя i -го компонента, ε_i – диэлектрическая проницаемость i -го компонента. Подобный подход применен, например, в работе [22]. Далее, задав соотношения между d и d_i , а также характер изменения их с течением времени можно получить выражения, отражающие поведение диэлектрической проницаемости во времени.

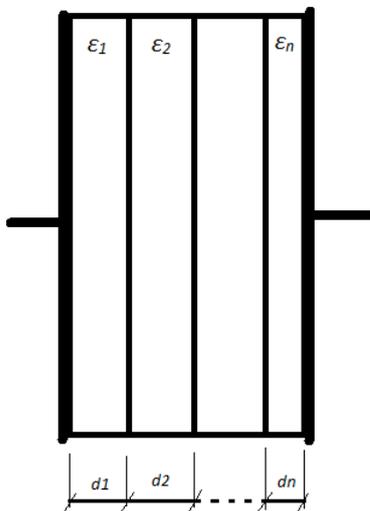


Рис. 1 - Конденсатор слоистой структуры

Fig. 1 - Layered Capacitor

Может возникнуть возражение, что в асфальтобетоне компоненты (битум, минеральная основа и др.) расположены не слоями, а однородно перемешаны. Однако можно показать, что последовательность чередования слоев, параллельным обкладкам, не влияет на емкость конденсатора. Емкости же слоев, перпендикулярных обкладкам суммируются (как для параллельно соединенных конденсаторов). В итоге результирующая емкость конденсатора с диэлектриком, состоящем из однородной смеси различных диэлектриков (изотропная структура), эквивалентна емкости конденсатора со слоистой структурой (рис. 1).

Конкретно для асфальтобетона введем следующую индексацию величин, входящих в формулу (1). Индекс 1 – битум, индекс 2 – минеральная составляющая, индекс 3 – воздух, индекс 4 – вода. В модели применим грубое, но значительно упрощающее анализ линейно приближение, т.е. характер изменения толщин d_i будем полагать линейным.

3 Results and Discussion

В работе [20] приводятся данные о том, что «свежий» асфальтобетон имеет диэлектрическую проницаемость порядка 5. Затем в процессе эксплуатации значение диэлектрической проницаемости плавно увеличивается, достигая значений порядка 8. Речь идет о нормальном эксплуатационном периоде покрытия. Если после этого не проведено ремонтных мероприятий, то в результате ускоренной деградации покрытия диэлектрическая проницаемость резко снижается и достигает значений порядка 4,5. Назовем эти периоды условно: I – период роста и II – период уменьшения. Таким образом, задача эксплуатационных и ремонтных предприятий не допустить наступления периода II и в определенное время провести ремонтные работы.

Приведенная выше емкостная модель, позволяет на качественном уровне объяснить подобное поведение диэлектрической проницаемости.

I период. В этот период происходит доуплотнение асфальтобетонного покрытия и уменьшение удельной доли воздуха, находящегося в закрытых порах (увлажнением покрытия на

этом этапе пренебрежем). В рассматриваемой модели это выражается в уменьшении толщины слоя воздуха d_3 . В итоге формула для расчета диэлектрической проницаемости будет иметь вид:

$$\varepsilon_I = \frac{d - at}{\frac{kd}{\varepsilon_1} + \frac{(1-2k)d}{\varepsilon_2} + \frac{kd - at}{\varepsilon_3}}, \quad (4)$$

где k – относительная толщина битумного и воздушного слоев (для упрощения будем считать их равными); a – скорость уменьшения воздушного слоя. График зависимости (рис. 2) ε_I от t построен для значений $\varepsilon_1 = 3$, $\varepsilon_2 = 4.5$, $\varepsilon_3 = 1$, $k=0.1$ и $a=d/28$. Отметим, что поведение зависимости не зависит от значения d (его можно исключить из выражения).

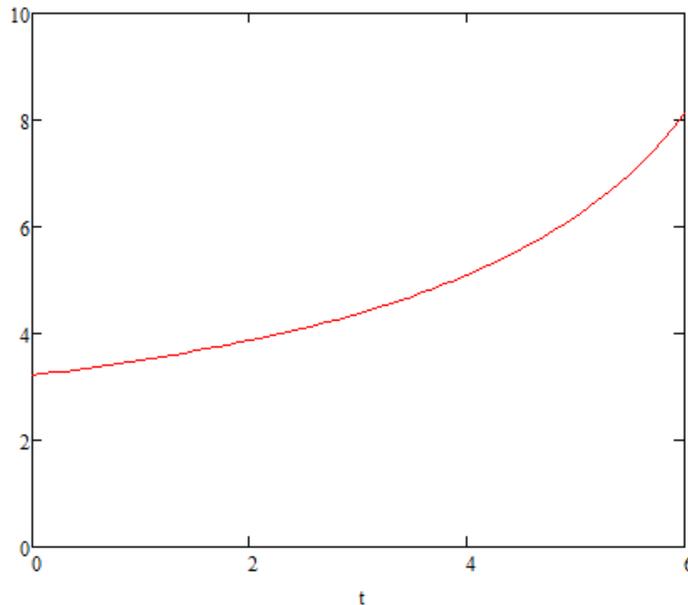


Рис. 2 - Зависимость диэлектрической проницаемости асфальтобетона от времени (период I)

Fig. 2 - The dependence of the dielectric constant of asphalt on time (period I)

Можно видеть, что характер изменения диэлектрической проницаемости качественно согласуется с данными работы [20].

II период. В этот период, согласно [20], при деградации асфальтобетонного покрытия, происходит уменьшение его диэлектрической проницаемости. Происходящее интенсивное трещинообразование и выкрашивание покрытия приводит к увеличению доли воздуха в покрытии и его влагоносности. Также начинает сказываться на физических свойствах асфальтобетона (в том числе и электрофизических) и старение битума.

Формула для расчета диэлектрической проницаемости в этот период будет иметь вид:

$$\varepsilon_{II} = \frac{d}{\frac{kd}{\varepsilon_1 - bt} + \frac{(1-2k)d - 2at}{\varepsilon_2} + \frac{kd + at}{\varepsilon_3} + \frac{kd + at}{\varepsilon_4}}, \quad (5)$$

где k – относительная толщина битумного, воздушного и водного слоев (для упрощения будем считать их равными); a – скорость увеличения воздушного и водного слоев, b – скорость уменьшения диэлектрической проницаемости битума в результате его старения. График зависимости (рис. 3) ε_{II} от t построен для значений $\varepsilon_1 = 3$, $\varepsilon_2 = 4.5$, $\varepsilon_3 = 1$, $\varepsilon_4 = 81$, $k=0.1$, $a=d/28$ и $b = \varepsilon_1 / 15$.

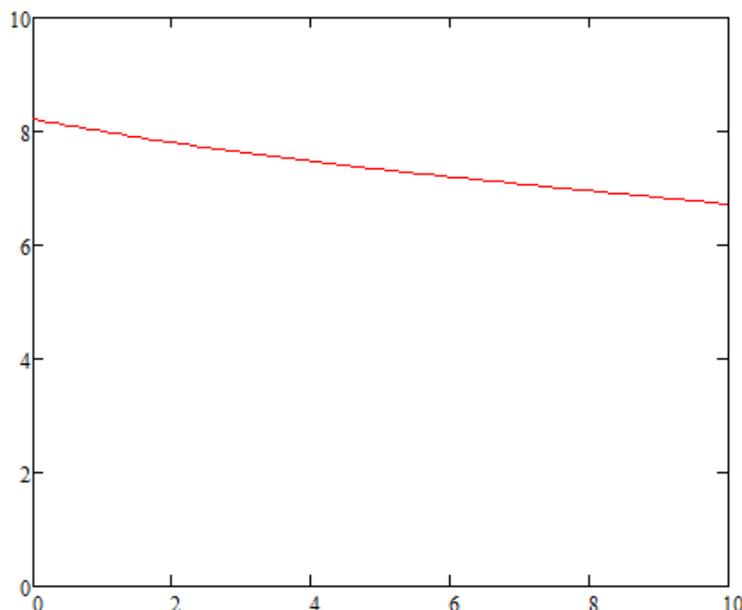


Рис. 3 - Зависимость диэлектрической проницаемости асфальтобетона от времени (период II)

Fig. 3 - The dependence of the dielectric constant of asphalt on time (period II)

Численный анализ показывает, что водонасыщение покрытия практически не влияет на его диэлектрическую проницаемость. Это можно объяснить тем, что при последовательном соединении конденсаторов общая емкость оказывается меньше меньшей емкости в батарее.

Существуют модели эффективной среды [23-25], которые позволяют рассчитывать диэлектрическую проницаемость композиционного диэлектрика. Это, например, модели Рэля, Максвелла, Максвелла-Гарнетта, Бруггемана. Сравнение результатов расчетов диэлектрической проницаемости по модели, представленной в работе [23], и по упомянутым выше моделям, показало хорошее согласие с моделями Максвелла и Максвелла-Гарнетта. Например, для двухкомпонентного диэлектрика (1- матричная среда - битум, 2 – дисперсная среда - минерал), при $\varepsilon_1 = 3$, $\varepsilon_2 = 4.5$ и объемной доле минералов равной 0.9, расчет по модели, представленной в данной работе, дает результат $\varepsilon = 4.29$, по модели Максвелла - $\varepsilon = 4.16$, по модели Максвелла-Гарнетта - $\varepsilon = 4.328$. В работе [9] также показано, что для сухих смесей хорошо согласуются результаты «емкостной» и Максвелла-Гарнетта моделей. Отметим также, что модель Максвелла-Гарнетта дает практически одинаковый результат при смене матрица-включения. Расчет для $\varepsilon_1 = 4.5$, $\varepsilon_2 = 3$ и объемной доле битума равной 0.1 дает результат $\varepsilon = 4.333$ (сравните с $\varepsilon = 4.328$).

4 Conclusions

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Диэлектрическая проницаемость, коррелируя с адгезионными и когезионными свойствами материала, может служить критериальным параметром для мониторинга состояния дорожных покрытий и оценки остаточного срока их службы.

2. Моделирование асфальтобетонной дорожной смеси с помощью конденсатора слоистой структуры дает результаты, описывающие эволюцию его диэлектрической проницаемости, хорошо согласующиеся с реальным поведением этого параметра в процессе эксплуатации дорожного покрытия.

References

1. Lyne, Å.L., Taylor, N., Jaeverberg, N., Edin, H., Birgisson, B. Low frequency dielectric spectroscopy of bitumen binders as an indicator of adhesion potential to quartz aggregates using Portland cement (2016) Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 49 (4), pp. 1327-1336. DOI: 10.1617/s11527-015-0579-5

Kirillov, A.M.

Dielectric Constant of Asphalt Concrete Pavement;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 89 Article No 8905. doi:10.18720/CUBS.89.5

2. Rodgers, W.J., Gunay, B., Woodside, A. Rheological and electrical properties of modified bitumen (2010) Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport, 163 (4), pp. 175-182. DOI: 10.1680/tran.2010.163.4.175
3. Kortyanovich, K.V., Yevdokimova, N.G., Zhirnov, B.S. Dielektricheskaya pronitsayemost kak pokazatel kharakterizuyushchiy adgezionnyye svoystva bitumov [Dielectric constant as an indicator characterizing the adhesion properties of bitumen] (2006) Elektronnyy zhurnal Neftegazovoye delo [Electronic journal Oil and gas business], 2, (rus).
http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Kortyanovich/Kortyanovich_1.pdf
4. Gorelov S.V., Goltsov Yu.I., Stroyev D.A. Issledovaniye vzaimosvyazi dielektricheskoy pronitsayemosti bitumnogo vyazhushchego s yego fiziko-mekhanicheskimi svoystvami [Investigation of the relationship of the dielectric constant of a bitumen binder with its physical and mechanical properties] (2006) Vestnik Kharkovskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], 34-35, pp. 127-129. (rus)
5. Subbotin, I.V. Primeneniye ultrazvukovoy aktivatsii bituma na asfaltobetonnykh zavodakh [Usage of ultrasound activation of bitumen on asphalt-concrete plants] (2012) Internet-zhurnal Naukovedeniye [Internet Journal of Science], 13 (4), pp. 1-7. (rus)
<https://naukovedenie.ru/PDF/87tvn412.pdf>
6. Bashkarev, A.Ya., Bepalova, N.N. Izmeneniye prochnostnykh i adgezionnykh svoystv bituma pod vozdeystviyem temperaturno-vremennogo faktora [Change in the strength and adhesive properties of bitumen under the influence of the temperature-time factor]. (2014) Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye [Modern engineering. Science and education], 4, pp. 650-659. (rus)
7. Bashkarev, A.Ya., Bepalova, N.N. Dependence adhesion of bitumen from the time-temperature modes on making asphalt (2014) Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta, 190 (1), pp. 186-190. (rus)
<https://elibr.spbstu.ru/dl/2/3923.pdf/view>
8. Abdullin, A.I., Emelyanycheva, E.A. A study of properties of road petroleum bitumen modified with polymer additives (2018) Journal of chemical technology and metallurgy, 53(3), pp. 422-429.
https://dl.uctm.edu/journal/node/j2018-3/4_17-148_422-429.pdf
9. Jaselskis, E.J., Grigas, J., Brilingas, A. Dielectric properties of asphalt pavement (2003) Journal of Materials in Civil Engineering, 15 (5), pp. 427-434. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(427)
10. Al-Qadi, I.L., Lahouar, S. Ground penetrating radar: State of the practice for pavement assessment (2004) Materials Evaluation, 62 (7), pp. 759-763.
11. Chang, C.-M., Chen, J.-S., Wu, T.-B. Dielectric modeling of asphalt mixtures and relationship with density (2010) Journal of Transportation Engineering, 137 (2), pp. 104-111. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000204
12. Evans, R., Frost, M., Stonecliffe-Jones, M., Dixon, N. Assessment of in situ dielectric constant of pavement materials (2007) Transportation Research Record, (2037), pp. 128-135. DOI: 10.3141/2037-12
13. Loizos, A., Plati, C. Field and Laboratory Test for Assigning Dielectric Constants of Asphalt Pavement Materials (2006) Road Materials and Pavement Design, 7 (4), pp. 513-532. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690049
14. Sun, T. Dielectric loss law of asphalt mixture under the condition of microwave heating (2014) International journal of applied electromagnetics and mechanics, 46 (1), pp. 313-323.
<https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae150153>
15. Benedetto, A., Pensa, S. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques (2007) Journal of Applied Geophysics, 62 (2), pp. 107-123. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2006.09.001
16. Loulizi, A., Al-Qadi, I.L., Lahouar, S. Optimization of ground-penetrating radar data to predict layer thicknesses in flexible pavements (2003) Journal of Transportation Engineering, 129 (1), pp. 93-99. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:1(93).
17. Al-Qadi, I.L., Leng, Z., Lahouar, S., Baek, J. In-place hot-mix asphalt density estimation using ground-penetrating radar (2010) Transportation Research Record, (2152), pp. 19-27. DOI: 10.3141/2152-0
18. Al-Qadi, I.L., Lahouar, S. Detection of asphalt binder aging in flexible pavement by ground

Kirillov, A.M.

Dielectric Constant of Asphalt Concrete Pavement;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 89 Article No 8905. doi:10.18720/CUBS.89.5

penetrating radar (2005) *Materials Evaluation*, 63 (9), pp. 921-925.

19. Ateeq, M., Wylie, S., Al-Shammaa, A., Al-Nageim, H. Microwave spectroscopy: A potential technique to analyse bitumen dielectric and physical properties (2012) *Measurement Science and Technology*, 23 (8), art. no. 085503. DOI: 10.1088/0957-0233/23/8/085503

20. Saarenketo, T. Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping (2001) Helsinki, Finland: Roadscanners, 13 p.

21. Belyayeva, T.A., Bobrov, A.P., Bobrov, P.P., Mandrygina, V.N. Issledovaniye dielektricheskikh modeley dlya opredeleniya dielektricheskoy pronitsayemosti svyazannoy vody v gruntakh [Study of dielectric models for determining the dielectric constant of bound water in soils] (2005) *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 5 (2), pp. 237-242. (rus)

http://www.iki.rssi.ru/earth/articles/sec8_03.pdf

22. Korchagin, S.A., Terin, D.V., Kondratyeva, O.Yu., Romanchuk, S.P. Mnogomasshtabnoye modelirovaniye dielektricheskikh svoystv kompozitov sloistoy struktury [Multiscale modeling of the dielectric properties of layered composites] (2016) *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy shkoly-seminara "Vzaimodeystviye sverkhvysokochastotnogo, teragertsovogo i opticheskogo izlucheniya s poluprovodnikovymi mikro- i nanostrukturami, metamaterialami i bioobyektami"* [Proceedings of the All-Russian Scientific School-Seminar "Interaction of microwave, terahertz and optical radiation with semiconductor micro- and nanostructures, metamaterials and bioobjects"], Saratov: Izdatelstvo Saratovskiy istochnik, pp. 56–59. (rus)

23. Korchagin, S.A., Terin, D.V., Romanchuk, S.P. Synergetics of mathematical models for analysis of composite materials (2015) *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 23 (3), pp 55–64.

<http://mi.mathnet.ru/eng/ivp/v23/i3/p55>

24. Romanchuk, S.P., Terin, D.V. Matematicheskoye modelirovaniye kompozitnykh sred [Mathematical modeling of composite media] (2012) *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii i IT-obrazovaniye [Modern information technology and IT education]*, 8, pp. 781-785. (rus)

25. Bolshunova, O.M., Korzhev, A.A., Vatlina, A.M., Kamyshyan, A.M. Determination of multicomponent media permittivity by high-frequency method (2018) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 194 (6), art. no. 062004. DOI: 10.1088/1755-1315/194/6/062004