

СВЧ диэлектрическая проницаемость дисперсных влагосодержащих сред

Ф. М. Хаммуд, В. П. Герасимов, Ю. Е. Гордиенко

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина
E-mail: mepu@kture.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 21 июля 2005 г.

Обоснован численно-аналитический алгоритм моделирования эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП) дисперсных влагосодержащих сред, базирующийся на представлениях об особенностях взаимодействия неоднородной N -слоистой среды с электромагнитным полем полого одномодового регулярного резонатора на E -виде колебаний при полном заполнении его поперечного сечения такой средой. Показано, что при N , превышающем установленные в работе значения, ЭДП слоистой среды в таком поле соответствует значению ЭДП для дисперсной среды с параметрами частиц и прослоек, идентичными параметрам слоев. Соответствие установлено по экспериментальным данным и результатам оценок ЭДП влагосодержащих дисперсных сред другими методами. Алгоритм эффективен для исследования ЭДП многокомпонентных сред с широкими пределами вариации гетерогенности.

1. Введение

Влагосодержащие дисперсные среды являются широко распространенными объектами, исследование физических свойств которых представляет научный и практический интерес. С научной точки зрения весьма важно уяснить механизмы вхождения воды в структуру объекта и ее взаимодействия с частицами основного материала, а также влияние воды на физические и физико-химические свойства различных сред. С практической – необходимо располагать возможностями соотносить параметры технологических процессов для таких объектов с содержанием и состоянием влаги в них. Во всех случаях необходимо иметь прецизионный, широкодиапазонный и экспрессный неразрушающий метод определения влагосодержания в таких средах.

Из известных методов влагометрии в настоящее время наиболее перспективным яв-

ляется СВЧ метод [1-3]. Совместно с гравиметрическим этот метод может дополнительно обеспечить исследование характера физико-химической связи воды с основным веществом [4-6].

СВЧ метод использует большие значения действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости воды в СВЧ диапазоне. Это предполагает сильную зависимость комплексной эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП) влагосодержащей среды от процентного содержания воды, что хорошо подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями. Подробные и точные сведения о положении области дисперсии ϵ' и ϵ'' воды, их зависимости от температуры и влияния примесей можно найти, например, в [1]. Для структурно однородных диэлектриков и полупроводников также существует исчерпывающая информация об их диэлектрических свойствах. Поэтому на первый

взгляд несложно установить зависимость комплексной ЭДП влагосодержащих сред от процентного количества входящей в них влаги.

Вместе с тем градуировку СВЧ средств влагометрии, как правило, осуществляют по классическому гравиметрическому методу [7]. Для теоретической градуировки средств СВЧ метода в первую очередь необходима строгая теория ЭДП влагосодержащих сред. Она может базироваться на теории СВЧ диэлектрических свойств смесей.

Однако универсальная и строгая теория СВЧ диэлектрической проницаемости существует только для влагосодержащих газов и жидкостей [8, 9]. Твердокомпонентные среды являются более сложными по своей макроструктуре, характеру вхождения в них воды, ее состоянию. Достаточно заметить, что такие среды в основном полидисперсные с широким диапазоном размеров частиц. Сами частицы также неоднородны по макроструктуре – содержат поры, поверхностные слои другой природы и т. п. Вода при этом может заполнять свободное пространство между частицами, входить в поры, модифицировать поверхностные слои. В каждом случае ее структурное состояние и степень связи молекул с веществом существенно отличаются. Одновременно следует заметить, что строгая теория диэлектрической проницаемости даже двухкомпонентных полидисперсных смесей (например, твердые частицы – воздух) отсутствует.

Из многочисленных экспериментальных работ по исследованию диэлектрических свойств влагосодержащих твердокомпонентных сред в СВЧ диапазоне можно заключить, что взаимодействие СВЧ электромагнитного поля с входящей в них водой носит нелокальный характер. Однако иногда это может трактоваться как проявление различия диэлектрических свойств воды в микро- и макро-размерных слоях.

Целью настоящей работы является установление особенностей поведения ЭДП влагосодержащих слоистых структур в зависимости от размеров и диэлектрических параметров компонент и обоснование

на этой базе теоретических моделей СВЧ диэлектрической проницаемости дисперсных сред, в том числе влагосодержащих. При этом предполагается, что размер слоев значительно меньше длины волны.

Для достижения этой цели необходимо располагать эффективным методом адекватного моделирования процесса взаимодействия электромагнитного поля с многослойными средами и оценки по его результатам ЭДП таких сред.

2. Метод оценки ЭДП многослойных сред в СВЧ диапазоне

Дисперсная многокомпонентная среда является весьма сложным объектом при оценке ее ЭДП в СВЧ диапазоне из-за неидентичности формы частиц, различия параметров компонент и их взаимного расположения. Однако основные закономерности влияния размеров и диэлектрических параметров компонент можно выявить, исследуя плоскостойкую многокомпонентную модель ячеистой структуры, состав каждой ячейки которой идентичен по количеству и характеристикам компонент. На рис. 1 представлена пятислойная трехкомпонентная ячейка толщиной $h_{яч}$.

Опыт разработки СВЧ метода диагностики слоистых полупроводниковых сред [10, 11] показал высокую эффективность применения резонаторных измерительных преобразователей (РИП). Для них применимы строгая теория взаимодействия элек-

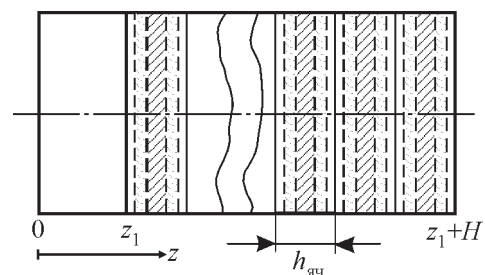


Рис. 1. Схематическое изображение резонатора со слоистым заполнением

тромагнитного поля датчика с объектом диагностики и многопараметрические исследования.

Воспользуемся так называемым одноמודовым приближением теории РИП H - и E -типа для исследования рассматриваемой здесь модели дисперсной среды. В соответствии с этим приближением предполагается, что многослойный объект заполняет частично по длине и полностью по поперечному сечению полый цилиндрический резонатор с H - или E -видом рабочего колебания (рис. 1). Тогда будет строго справедливым характеристическое уравнение, связывающее значение комплексной резонансной частоты $\tilde{\omega}_1 = \omega'_1 + j\omega''_1$ заполненного таким образом резонатора со всеми параметрами заполняющей среды, [10]:

$$\text{th}\gamma_1 z_1 = -Y_{12} \frac{\text{th}\gamma_2 h_2 + Y_{23} \frac{\text{th}\gamma_3 h_3 + Y_{34} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1 + \dots}}{1 + Y_{34} \text{th}\gamma_3 h_3} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1 + \dots}}{1 + Y_{23} \text{th}\gamma_2 h_2 \frac{\text{th}\gamma_3 h_3 + Y_{34} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1 + \dots}}{1 + Y_{34} \text{th}\gamma_3 h_3} \frac{\text{th}\gamma_4 h_4 + \dots}{1 + \dots}}, \quad (1)$$

где $Y_{ij} = \frac{\tilde{\epsilon}_i \gamma_j}{\tilde{\epsilon}_j \gamma_i}$; $\gamma_i = \tilde{\omega}_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \left(\tilde{\epsilon}_i - \left(\frac{\omega_{\text{кр}}}{\tilde{\omega}_1} \right)^2 \right)}$; $\tilde{\epsilon}_i = \epsilon'_i - j\epsilon''_i$; h_i – толщина i -го слоя; z_1 – высота незаполненной части резонатора (см. рис. 1); ϵ_0 , μ_0 – абсолютные значения диэлектрической и магнитной проницаемостей вакуума; $\omega_{\text{кр}}$ – предельная частота для данного поперечного сечения пустого резонатора.

Уравнение (1) записано для РИП с E -видом рабочего колебания, т. к. при взаимодействии реальной дисперсной среды с любым электромагнитным СВЧ полем на частицу действует как нормальная, так и тангенциальная электрические составляющие поля. (В РИП с H -видом колебаний для рассматриваемой модели взаимодействие с нормальной составляющей будет отсутствовать.)

Пользуясь этим уравнением, можно проводить численные исследования зависимости $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega'_1 - \omega_0}{\omega_0}$ и $\frac{\Delta Q}{Q_1} = \frac{Q_0 - Q_1}{Q_1}$ от параметров слоистого заполнения в широких пределах вариации структуры и параметров слоев. Здесь ω_0 и Q_0 – резонансная частота и добротность РИП в отсутствие заполнения.

Суть предлагаемого нами метода оценки ЭДП рассматриваемой модели заключается в условном представлении многослойного заполнения в виде сплошной однородной среды суммарной толщиной $H = N h_{\text{яч}} = N \sum_{j=1}^n h_j$ (N – число ячеек, n – число слоев в ячейке), имеющей искомую ЭДП, которая устанавливается из уравнения

$$\text{th}\gamma_1 z_1 = -\frac{\gamma_{\text{эфф}}}{\gamma_1} \frac{\tilde{\epsilon}_1}{\tilde{\epsilon}_{\text{эфф}}} \text{th}\gamma_{\text{эфф}} H \quad (2)$$

по ранее вычисленным с помощью (1) значениям ω'_1 и ω''_1 . Здесь $\gamma_{\text{эфф}} = \tilde{\omega}_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \left(\tilde{\epsilon}_{\text{эфф}} - \left(\frac{\omega_{\text{кр}}}{\tilde{\omega}_1} \right)^2 \right)}$;

$$\tilde{\epsilon}_{\text{эфф}} = \epsilon'_{\text{эфф}} - j\epsilon''_{\text{эфф}}.$$

Предварительные численные исследования показали, что определенная таким образом ЭДП плоскостойкой модели дисперсной среды существенно зависит от количества ячеек N и искать ее значения имеет смысл только при $N > 10^2$, так как толщины слоев значительно меньше длины волны.

Типичный вид зависимостей $\epsilon'_{\text{эфф}}$ и $\epsilon''_{\text{эфф}}$ от N для трехкомпонентной плоскостойкой ячейки (воздух, вода, сухой компонент, вода, воздух) приведен на рис. 2, а, б при $\theta = (\omega_{\text{кр}}/\omega_0)^2 = 0.1$, $\omega_0 = 10$ ГГц для различных значений плотности дисперсной среды $p = h_{\text{возд}}/h_{\text{яч}}$ и влагосодержания $w = h_{\text{вод}}/h_{\text{яч}}$ ($h_{\text{возд}}$ и $h_{\text{вод}}$ – суммарные толщины слоев воздуха и воды в ячейке). Наличие насыщения $\epsilon'_{\text{эфф}}$ и $\epsilon''_{\text{эфф}}$ при больших N является характерным для любых значений параметров различных по составу ячеек. Отличие заключается в значении $N = N_{\text{нас}}$, при которых оно наступает для разных структур.

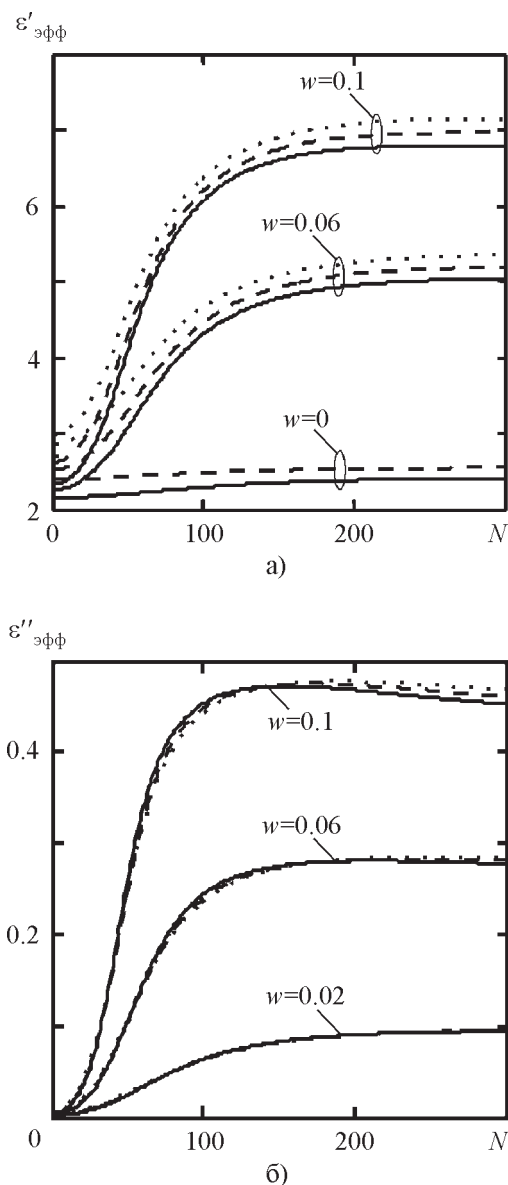


Рис. 2. Зависимость $\epsilon'_{эфф}$ (а) и $\epsilon''_{эфф}$ (б) от N : сплошные линии – $p=0.15$; штриховые – $p=0.075$; точечные – $p=0$

Детальные исследования подобных зависимостей для двухкомпонентных ячеек показали, что $N_{нас}$ уменьшается при уменьшении различия между ϵ'_i компонент среды и увеличении толщины слоев сухого компонента $h_{сух}$. Например, при увеличении $h_{сух}/\lambda_0$ от 0.002 до 0.02 значения $N_{нас}$ уменьшается от 200 до 20 для влагосодержащей дисперсной среды. При этом прак-

тически отсутствует зависимость $N_{нас}$ от содержания влаги в диапазоне $0 \div 30\%$ объема ячейки. Аналогично выглядит зависимость $N_{нас}$ от толщины и удельного объема воздушных прослоек.

Отдельные исследования зависимости устанавливаемых таким образом значений $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$ (при $N > N_{нас}$ и неизменном удельном объеме компонент) от толщины слоев различных компонент показали, что они не зависят от этого параметра.

Поэтому можно предположить, что модель применима не только для представления смесей с одинаковыми размерами компонент и дисперсных сред с однородным распределением удельного объема компонент, но и для полидисперсных сред.

3. Анализ некоторых особенностей ЭДП влагосодержащих дисперсных сред

Влагосодержащая дисперсная среда даже при одном сорте сухих частиц в рассматриваемой модели должна представляться ячейкой: воздух – вода – сухой компонент – вода – воздух. Таким образом будет учитываться факт различной плотности таких сред. Однако моделирование влагосодержания будет идеализированным из-за неучета водонаполнения самих частиц основного материала.

Рассмотрим отдельно зависимости ЭДП такой среды от плотности и влагосодержания. Численные оценки зависимости $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$ от влагосодержания для однокомпонентной дисперсной среды проводились при вариации ее плотности p от 1.0 до 0.7, размеров частиц $h_{сух}/\lambda_0$ от 10^{-4} до 10^{-2} , $\epsilon'_{сух}$ от 2.0 до 10; $\text{tg}\delta_{сух}$ от 10^{-3} до 10^{-2} . В каждой области значений этих параметров устанавливалась справедливость выполнения условия $N > N_{нас}$ и $\epsilon'_{эфф}$, $\epsilon''_{эфф}$ определялись при этом условии.

Полученные зависимости от влагосодержания в пределах $w=0 \div 10^{-1}$ линейны, что качественно соответствует известным из многих работ данным, а количественно подтверждается результатами оценок по аналитическим выражениям из работ [5, 6].

На рис. 3, а, б представлены зависимости $\epsilon'_{эфф}$ и $\epsilon''_{эфф}$ от плотности p и влагосодержания w для $h_{сух}/\lambda_0 = 0.00033$; $\epsilon'_{сух} = 2.7$; $tg\delta_{сух} = 0.001$. Точками на рис. 3, а показаны экспериментально измеренные значения $\epsilon'_{эфф}$ порошка полистирола от степени его сжатия при $w=0$. Эксперимент ставился с использованием РИП на волне H_{012} . Удовлет-

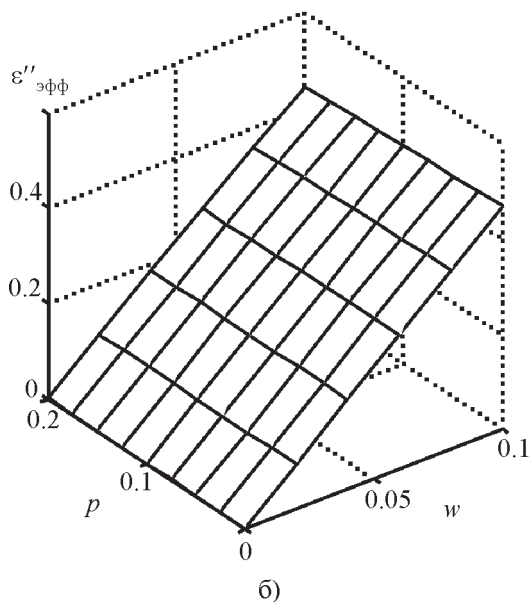
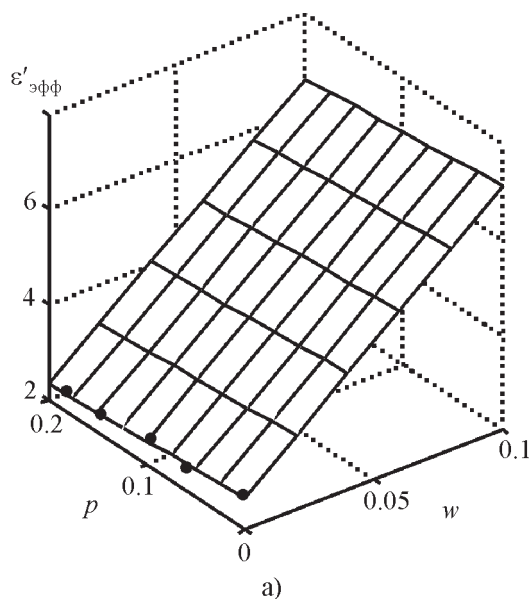


Рис. 3. Зависимость $\epsilon'_{эфф}$ (а) и $\epsilon''_{эфф}$ (б) дисперсной среды от ее плотности p и влагосодержания w

ворительное совпадение теоретических оценок с экспериментальными данными свидетельствует об адекватном описании реальной среды предложенной моделью и об универсальности оценок ЭДП таким методом при условии, что толщина образца обеспечивает выполнение условия $N > N_{нас}$.

На рис. 4 приведены зависимости $tg\delta_{эфф}$ трехкомпонентной среды (частицы сухого материала, покрытые водой, разделены воздушной прослойкой) от плотности и влагосодержания. Вид их совпадает с результатами экспериментальных исследований уже цитировавшихся работ. На рисунке точками представлены результаты экспериментальных исследований зависимостей $tg\delta_{эфф}$ поваренной соли от содержания влаги. Исследования выполнены также с использованием РИП на волне H_{012} . Содержание влаги в образце уменьшалось со временем из-за непрерывного просушивания при температуре в РИП $40^\circ C$ и контролировалось весовым методом с применением кварцевых весов, на срезе датчика которых располагался образец. Плотность также определялась по весу сухого образца.

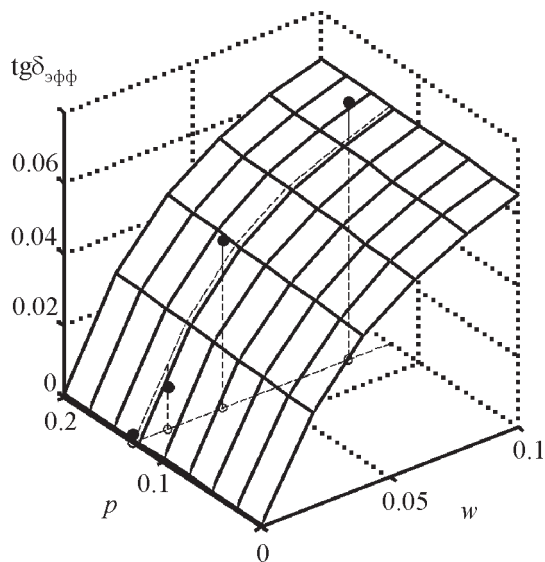


Рис. 4. Зависимость $tg\delta_{эфф}$ дисперсной среды от ее плотности p и влагосодержания w

В большинстве последних работ по СВЧ влагометрии сыпучих материалов особое внимание уделяется установлению возможности измерений, независимых от плотности материала [12-15]. В таком случае становится допустимой градуировка технических средств по эталонному гравиметрическому методу. Неоднократно высказываемое предположение о независимости $\text{tg}\delta_{\text{эфф}}$ от изменения плотности таких сред, как следует из приведенных на рис. 4 кривых и данных ряда экспериментов, не подтверждено. В связи с чем осуществляются попытки найти более оптимальную в этом смысле комбинацию $\epsilon'_{\text{эфф}}$ и $\epsilon''_{\text{эфф}}$ [15-17].

Нам представляется, что численные оценки на основе рассмотренной здесь модели могут заменить обычно проводимые обширные и трудоемкие экспериментальные исследования.

Таким образом, можно утверждать, что предложенный метод численно-аналитического моделирования обеспечивает достаточную точность описания ЭДП реальных дисперсных сред и одновременно удобство исследования.

4. Заключение

В результате проведенных исследований обоснован универсальный метод численно-аналитического моделирования ЭДП многокомпонентных дисперсных сред. Удобством его является детерминированность связи ЭДП с реально оцениваемыми характеристиками компонент.

Зависимость условий определения истинного значения ЭДП от количества ячеек в модели отражает физический аспект нелокальности взаимодействия электромагнитных волн с дисперсными средами, и его необходимо учитывать при трактовке результатов эксперимента с тонкими и сверхтонкими объектами. Для них понятие ЭДП теряет обычный смысл.

В макрообъектах, размеры которых отвечают условию $N > N_{\text{нас}}$, с помощью этого метода возможно исследовать влияние малых и сверхмалых слоев (частиц).

Нам представляется, что разработанный подход позволит осуществлять теоретическую градуировку СВЧ средств контроля состава сред, включая их влагосодержание. В последнем случае необходимы дополнительные сведения о характере дислокации входящей воды (влаги) и влиянии его на ϵ этой влаги.

Литература

1. Бензарь В. К. Техника СВЧ влагометрии. – Минск: Высшая школа, 1974. – 350 с.
2. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Под ред. Е. С. Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 240 с.
3. Kraszewski A. Microwave aquametry: A review // J. Microwave Power. – 1980. – Vol. 15, No. 4. – P. 209-220.
4. Лещанский Ю. И., Ульянычев Н. В. Расчет диэлектрических характеристик кирпича и цементного камня при переменной влажности // Дефектоскопия. – 1980. – №7. – С. 34-39.
5. Боярский Д. А., Тихонов В. В. Модель эффективной диэлектрической проницаемости влажных и мерзлых почв в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т.40, №6. – С. 914-917.
6. Боярский Д. А., Тихонов В. В. Учет диэлектрических свойств связанной воды при моделировании эффективной диэлектрической проницаемости влажных почв в СВЧ диапазоне // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, №4. – С. 446-454.
7. Берлинер М. А. Измерения влажности // Метрология и измерительная техника. Т. 4. Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ, 1979. – С. 187-252.
8. Потапов А. А. Измерение влажности на основе диэлектрических методов // Измерительная техника. – 1985. – №6. – С. 48-50.
9. Браун В. Б. Диэлектрики. – М.: Иностранная Литература, 1961. – 326 с.
10. Гордиенко Ю. Е. Резонаторные измерительные преобразователи в диагностике микрослоистых структур // Радиотехника. – 1996. – Вып. 100. – С. 253-260.
11. Gordienko Yu. E., Gud Yu. I., Sukhorukov I. V. Progress in Semiconductor Resistivity Measurement Using Noncontact Microwave Testequipment // RadioTeknika. – 1997. – No. 104. – P. 56-61.
12. Trabelsi S., Kraszewski A. W., Nelson S. O. Simultaneous Determination of Density and Water

- Content of Particulate Materials by Microwave Sensors // *Electron. Lett.* – 1997. – Vol. 33, No. 10. – P. 874-876.
13. Trabelsi S., Nelson S. O. Density-Independent Functions for on-Line Microwave Moisture Meters: A General Discussion // *Meas. Sci. Technol.* – 1998. – Vol. 9. – P. 570-578.
14. Trabelsi S., Kraszewski A. W., Nelson S. O. A Microwave Method for on-Line Determination of Bulk Density and Moisture Content of Particulate Materials // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1998. – Vol. 47, No. 1. – P. 127-132.
15. Trabelsi S., Kraszewski A. W., Nelson S. O. New Density – Independent Calibration Function for Microwave Sensing of Moisture Content in Particulate Materials // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1998. – Vol. 47, No. 3. – P. 622.
16. Meyer W., Schilz W. M. Feasibility Study of Density-Independent Moisture Measurement with Microwaves // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1981. – Vol. MTT-29. – P. 732-739.
17. Menke F., Knochel R. New Density-Independent Moisture Measurement Methods Using Frequency-Swept Microwave Transmission // *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* – 1996. – Vol. 3. – P. 1415-1418.

НВЧ діелектрична проникність дисперсних вологомістких середовищ

**Ф. М. Хаммуд, В. П. Герасимов,
Ю. О. Гордієнко**

Обґрунтовано чисельно-аналітичний алгоритм моделювання ефективної діелектричної проникності (ЕДП) дисперсних вологомістких середовищ, що базується на уявленні про особливості взаємодії неоднорідного N -шаруватого середовища з електромагнітним полем порожнистого одномодового регулярного резонатора на E -типі коливань за умови повного заповнення його поперечного

перерізу таким середовищем. Показано, що зі значеннями N , вищими за установлені в роботі, ЕДП шаруватого середовища відповідає значенню ЕДП дисперсного середовища з параметрами часток і прошарків, ідентичними параметрам шарів. Відповідність встановлена за експериментальними даними та результатами оцінок ЕДП вологомістких середовищ іншими підходами. Алгоритм є ефективним у дослідженні ЕДП багатокомпонентних середовищ з широкими межами варіацій гетерогенності.

Microwave Dielectric Permeability of Disperse Water Content Environments

**F. M. Hammoud, V. P. Gerasimov,
and Yu. E. Gordienko**

The numerical-analytical simulation algorithm for the effective dielectric permeability (EDP) of disperse water content environments, based on the notion of interaction features of a nonuniform N -layer environment with the electromagnetic field of a hollow single-mode regular cavity on the E -mode oscillations, is proved for the cavity cross section totally filled with such an environment. For N exceeding the values set in operation, the EDP layered environment in such a field is shown to correspond to its value for the disperse environment with the parameters of particles and interlayers identical to those of layers. The correspondence is established through the experimental data and the estimates of EDP water content disperse environments obtained with alternative methods. The algorithm is effective for the research of EDP of multicomponent environments with the wide range of heterogeneity variations.