

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СВЯЗАННОЙ ВОДЫ В ГРУНТАХ

Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Мандрыгина В.Н.

*Омский государственный педагогический университет
644099, Омск, наб.Тухачевского, 14,
E-mail: bobrov@omgpu.omsk.edu,*

Приведены результаты сопоставления результатов расчетов по некоторым диэлектрическим моделям смесей с результатами экспериментальных измерений диэлектрической проницаемости сухих и влажных смесей с известными диэлектрическими проницаемостями веществ, являющихся компонентами смеси. Показано, что сухие смеси удовлетворительно описываются моделью Бруггемана и емкостной моделью. Показано также, что все исследуемые модели для описания смесей, содержащих свободную воду, требуют изменения условий применения, что затрудняет их применение для определения диэлектрической проницаемости связанной воды.

Связанная вода отличается рядом специфических свойств, в том числе температурой замерзания и диэлектрической проницаемостью. Поскольку связанная вода существует только на поверхности минерала, ее диэлектрическая проницаемость может быть измерена только в составе смеси. Проблема состоит в том, что не существует диэлектрической модели, позволяющей точно определить диэлектрическую проницаемость смеси воздуха, жидкости и твердой фракции, даже если известны диэлектрические проницаемости компонент. В разных моделях смесей, неплохо описывающих диэлектрические зависимости почв, диэлектрическая проницаемость связанной воды может изменяться от 20-25 единиц до 35-50. В таких моделях диэлектрические проницаемости твердой фазы ϵ_{ms} и связанной воды ϵ_c можно рассматривать как параметры той или иной модели [1]. Такой подход приемлем для целей дистанционного микроволнового зондирования, поскольку позволяет моделировать влажностные и частотные зависимости диэлектрической проницаемости почв, если найдены ϵ_{ms} и ϵ_c для почв данного минералогического состава. Предполагается, что параметры еще двух компонент почвенной смеси: воздуха ϵ_a и свободной воды ϵ_s – известны.

В задачах изучения взаимодействия молекул воды с поверхностью твердой фазы необходимо знать "истинные" характеристики связанной воды.

Проверить те и иные модели смесей и определить границы их применимости возможно лишь путем достаточно точных измерений диэлектрической проницаемости смесей с известными параметрами компонент. Ниже приведены результаты диэлектрических измерений смесей воздуха с порошками диэлектриков с известными значениями ϵ_{ms} и таких же увлажненных дистиллированной водой порошков. Исследовались порошки материалов СТ-5, СТ-7 и СТ-10 с диэлектрической проницаемостью (ДП) твердой фазы равной 5, 7 и 10, и размерами гранул от 0,01 мм до 0,25 мм в диапазоне частот 0,3-12 ГГц. Диэлектрическая проницаемость свободной воды определялась по модели Дебая. Влияние связанной воды из-за ее малого количества, обусловленного малой удельной поверхностью частиц, не учитывалось.

Косвенным свидетельством отсутствия в порошках частиц малого диаметра являются данные о диапазоне значений твердой фазы. Различное содержание твердой фазы достигалось различной степенью уплотнения при заполнении измерительной ячейки.

При плотной упаковке сферических частиц доля твердой фазы равна $V_{ms} = \frac{\rho}{\rho_{ms}} = \frac{\pi}{6} \approx 0.52$, при неплотной упаковке часть кубических ячеек остаётся свободной, поэтому доля твердых частиц меньше 0,52. Более плотная упаковка возможна, когда в среде присутствуют частицы с существенно меньшим диаметром. Очевидно, что существует минимальное значение доли твердой фазы, при которых сыпучая среда сохраняет свой объём. Оценки, проведенные для сферических частиц, показывают, что доля твердой фазы может изменяться в пределах от 0,4 до 0,6. В исследованных нами порошках удавалось экспериментально получить значения доли твердой фазы от 0,35 до 0,5, что свидетельствует об отсутствии частиц малого диаметра.

Другим подтверждением отсутствия связанной воды в порошках является практически нулевая влажность в воздушно сухом состоянии. В почвах, находящихся в таких условиях всегда имеется адсорбированная влага в количестве 2-8% от объема.

В измерениях ДП использовался экспериментальный метод определения, основанный на измерении модулей коэффициента отражения и прохождения образца, размещенного в коаксиальной линии. В коаксиальной линии с размером внешнего проводника 7 мм при воздушном заполнении высшие типы волн не

возникают до частоты 18 ГГц. При диэлектрической проницаемости образца до 4 ед. можно проводить измерения, не опасаясь возникновения высших типов, до частоты 9 ГГц. Поэтому большая часть измерения ДП влажных образцов производилась до частоты 8 ГГц с применением панорамных измерителей Р2-103 (2-8 ГГц), Р2-125/1 (0,3-1,5 ГГц), часть измерений порошков с малой влажностью проводилась с помощью Р2-52/4 (8-12 ГГц).

Метод обладает высокой производительностью, а при небольшой длине образца, не превышающей 2-3 четвертей длин волн в среде, и потерях в образце менее 10-15 дБ обеспечивает точность, сопоставимую с точностью фазовых методов.

В результате погрешность измерений действительной части ДП составила не более 5% для сухих смесей и не более 10 % для влажных образцов. Причиной повышения погрешности измерения влажных образцов является более высокая неоднородность плотности образцов во влажном состоянии.

Измерения диэлектрической проницаемости монолитных материалов показали, что действительная часть ДП с точностью около 5% совпадает со справочными данными. Мнимая часть ДП этих диэлектриков очень мала, например для СТ-10 $\epsilon'' = 0,001$, и потери в измерительном тракте превышают потери в диэлектрике. Измеренная плотность монолита практически совпадала с верхними значениями этой величины, приведенными в справочниках.

Измерения показали, что порошки не обладают дисперсией во всем исследованном диапазоне 0,3-12 ГГц. На рис. 1 приведены результаты измерения ДП сухой смеси диэлектрика СТ-10 с воздухом в зависимости от доли твердой фазы, усредненные в диапазоне 2-8 ГГц. Эти результаты сопоставлены с расчетами по некоторым из моделей. Диэлектрическая проницаемость любой смеси имеет значение, не выходящее за пределы диапазона, задаваемого граничными условиями Винера:

$$\epsilon_{\max} = \sum_i V_i \epsilon_i ; \quad (1)$$

$$\epsilon_{\min}^{-1} = \sum_i V_i \epsilon_i^{-1} . \quad (2)$$

Здесь V_i и ϵ_i - объемная доля i -го компонента смеси и его диэлектрическая проницаемость, соответственно. Формулы (1) и (2) справедливы для простейших моделей смесей. В первом случае смесь представлена плоскостройной средой с вектором \mathbf{E} электрического поля, направленным параллельно границам раздела слоев, во втором случае вектор \mathbf{E} направлен перпендикулярно границам слоев.

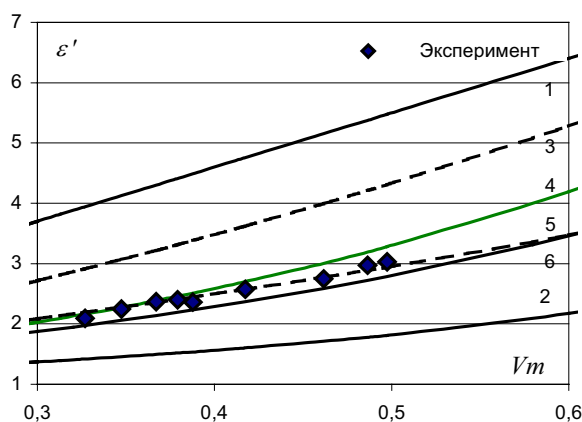


Рис. 1 . Сопоставление результатов измерения действительной части диэлектрической проницаемости сухого порошка материала СТ-10 в зависимости от доли твердой фазы с некоторыми моделями (диэлектрическая проницаемость твердой фазы $\epsilon'_{ms} = 10$).

1,2 – граничные условия Винера; 3 – рефракционная модель; 4 – модель Бруггемана; 5 – емкостная модель; 6 – модель Максвелла-Гарнетта.

Как показано в [2-5], значения, наиболее близкие к реальным, дают модели Бруггемана и Максвелла-Гарнетта. Для двухфазной смеси в приближении сферических частиц соответствующие формулы имеют вид:

$$(1 - V_{ms}) \frac{\epsilon_{ms} - \epsilon_a}{\epsilon_{ms} - \epsilon} = \left(\frac{\epsilon_a}{\epsilon} \right)^{1/3} ; \quad (3)$$

$$\epsilon = (\epsilon_a V_a + \beta_{ms} \epsilon_{ms} V_{ms}) / (V_a + \beta_{ms} V_{ms}), \quad \beta = 1 / \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\epsilon_{ms}}{\epsilon_a} \right) \right). \quad (4)$$

Здесь $V_{ms} = \rho / \rho_{ms}$ - объемная доля твердой фазы, равная отношению плотности образца к плотности твердой фазы, ϵ - ДП смеси, V_a и ϵ_a - объемная доля воздуха и его диэлектрическая проницаемость.

Как следует из данных, приведенных на рис.1, модель Бруггемана дает практически совпадающие с экспериментом результаты при низкой (около 0,35) доле твердых частиц и отличающиеся примерно на 10 % – при доле около 0,5. В отличие от модели Бруггемана модель Максвелла-Гарнетта дает заниженные по сравнению с экспериментом значения, причем имеется тенденция уменьшения этого различия при возрастании доли твердых частиц.

Дисперсная среда с хаотической или частично упорядоченной структурой может быть представлена в виде диэлектрических слоев, ориентированных как параллельно, так и перпендикулярно вектору электрического поля. В квазистатическом приближении, когда размеры частиц много меньше длины волны, диэлектрическая проницаемость такой структуры может быть определена по формуле, являющейся комбинацией (1) и (2) ("емкостная" модель):

$$\varepsilon = a \sum_i V_i \varepsilon_i + \frac{(1-a)}{\sum_i V_i / \varepsilon_i}, \quad (5)$$

где a – параметр, подбираемый для согласования получаемых данных с экспериментом.

Кривая 6 на рис.1 построена при значении параметра $a = 0,308$. Этот параметр немного уменьшается с уменьшением ДП твердой фазы. Так, для СТ-5 оптимальное значение $a = 0,283$.

На рис.1 приведены также данные, полученные с помощью рефракционной модели

$$\sqrt{\varepsilon} = \sum_i V_i \sqrt{\varepsilon_i}. \quad (6)$$

Видно, что для сухих смесей эта модель непригодна.

Рассмотрим матричную модель, в которой учитывается влияние формы частиц смеси на её диэлектрическую проницаемость. В такой модели компоненту, содержащуюся в образце в большем количестве, выбирают в качестве матричной среды, а компоненту, представленную в меньшем количестве, – в виде дисперсной среды. Для сухого порошка, который можно представить в виде смеси воздуха (дисперсная среда) и твердых частиц (матричная среда), диэлектрическая проницаемость можно определить по формуле, полученной из соображений, описанных в [6,7]:

$$\varepsilon(0) = \varepsilon_{ms} + V_a \varepsilon_{a.c.}, \quad (7)$$

где ε_{ac} – диэлектрическая проницаемость структурированной воздушной фазы (воздушные сферы в твёрдой среде-матрице):

$$\varepsilon_{a.c.} = \frac{3\varepsilon_{ms}(\varepsilon_a - \varepsilon_{ms})}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_{ms}} \quad (8)$$

Если матричной средой считать воздух, а дисперсной - твёрдую фазу, то в формулах (7) и (8) нужно сделать соответствующие замены.

Экспериментальная проверка этой модели на двухкомпонентной смеси воздуха и порошка СТ-5, даёт неплохой результат, приведённый на рис. 2. Наилучшее соответствие диэлектрической проницаемости, рассчитанной по такой модели, наблюдается при долях твёрдых частиц в диэлектрике приблизительно от 0,40 до 0,45.

Экспериментальные данные хорошо совпадают с данными модельных расчетов и для порошка СТ-7, а для порошка с более высокой ДП имеется расхождение результатов порядка 10 %. Расчёт диэлектрической проницаемости по такой модели сравнительно прост и не требует специального подбора полуэмпирических коэффициентов.

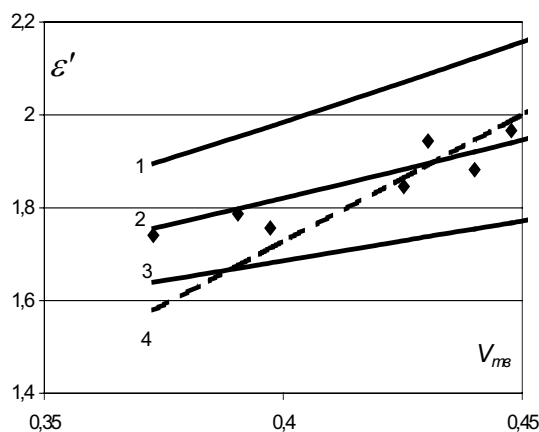


Рис. 2. Сопоставление результатов измерения действительной части диэлектрической проницаемости сухого порошка СТ-5 в зависимости от доли твердой фазы с некоторыми моделями (диэлектрическая проницаемость твердой фазы $\varepsilon'_{тв} = 5$).

1 – модель Бруггемана; 2– емкостная модель; 3– матричная модель (матр. среда - воздух); 4 – матричная модель (матр. среда - твердая фаза).

Исследование порошков, содержащих воду, показало, что ни одна из вышеописанных моделей напрямую не может быть применена к таким смесям. Для того чтобы приблизить результаты расчетов к экспериментальным данным, необходимо произвести некоторую модификацию.

В рефракционной модели нужно выбирать значения ДП твердой фракции меньшие, чем реальные. Для смеси с порошком СТ-10 оптимальное значение $\varepsilon_{ms} = 6,30 - j 0,018$, для смеси с СТ-5 – $\varepsilon_{ms} = 3,90 - j 0,007$. На разных частотах эти оптимальные значения различаются на величину около одного процента, то есть с учетом погрешности экспериментальных измерений эта величина от частоты не зависит. Хороших результатов можно достичь, если скомбинировать рефракционную модель с емкостной, применив ее для двухфазной смеси:

$$\sqrt{\varepsilon} = \sqrt{\varepsilon_{сyx}} + (\sqrt{\varepsilon_g} - 1)W, \quad (9)$$

в которой $\varepsilon_{сyx}$ – ДП сухой смеси, определяемая уже по емкостной модели. В (9) учтено, что $\varepsilon_a = 1$. Результаты расчетов по этим моделям и результаты эксперимента приведены на рис. 3, 4 для разных частот и разных значений ДП твердой фазы. В расчетах использовались значения ДП воды, определяемые по модели Дебая (на частоте 2,5 ГГц $\varepsilon_g = 77,22 - j 10,82$).

Применяя емкостную модель (5) для трехфазной смеси, для лучшего согласования с экспериментом необходимо вводить зависимость параметра a от влажности или от объемного содержания воздуха в смеси.

Лучшие результаты дает линейная зависимость $a = A \cdot \left(W + \frac{\rho}{\rho_{ms}} \right) = A(1 - V_a)$, где коэффициент A мало

зависит от частоты, но разный для разных значений твердой фазы. Для порошка СТ-5 $A = 0,55 \div 0,59$, для СТ-10 $A = 0,72 \div 0,76$. При нулевой влажности значения параметра a почти не отличаются от оптимального значения для сухих смесей, результаты исследования которых приведены выше. Результаты расчетов по этой модели также приведены на рис.3,4.

Поэтапное применение матричной модели для трехфазной смеси твердой фазы, воздуха и свободной воды дает хорошее согласие с экспериментом только для действительной части ДП смеси и при большой ДП твердой фазы. В большей части случаев модель дает заниженное значение действительной и мнимой частей ДП смеси при больших значениях влажности. Возможной причиной расхождения является не учет связанной воды, которой в данных образцах немного, но она образует тонкий слой на поверхности твердой фазы и должна приводить к увеличению ДП матричной среды и, в конечном счете, ДП смеси (рис.3). Предварительные расчеты, проведенные с учетом наличия связанной воды, показывают, что можно получить удовлетворительное согласие с экспериментом.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Все рассмотренные модели смесей с известными ДП компонент неплохо описывают диэлько-влажностные зависимости этих смесей, однако достигается это с помощью различных способов подгонки. Наиболее точно к данным эксперимента можно подогнать емкостную модель, однако подгоночный коэффициент зависит от ДП твердой фазы. Рефракционная модель дает хорошее согласие с экспериментом, если применять ее к двухкомпонентной среде, состоящей из сухой почвы и свободной воды. При этом для определения ДП сухой почвы как смеси воздуха и твердой фазы необходимо применять другую модель.

Таким образом, при переходе от сухой смеси к смеси, содержащей воду, все исследуемые модели требуют существенного изменения условий применения. Поскольку связанная вода по своим диэлектрическим свойствам занимает промежуточное значение между твердой фазой и свободной водой, не вполне понятно, какие условия нужно применять для смеси, содержащей связанную воду.

Возможно, что наиболее подходящей моделью является емкостная, в которой величина подгоночного коэффициента хотя и зависит от влажности, но при малых влажностях она близка к значениям для сухой смеси.

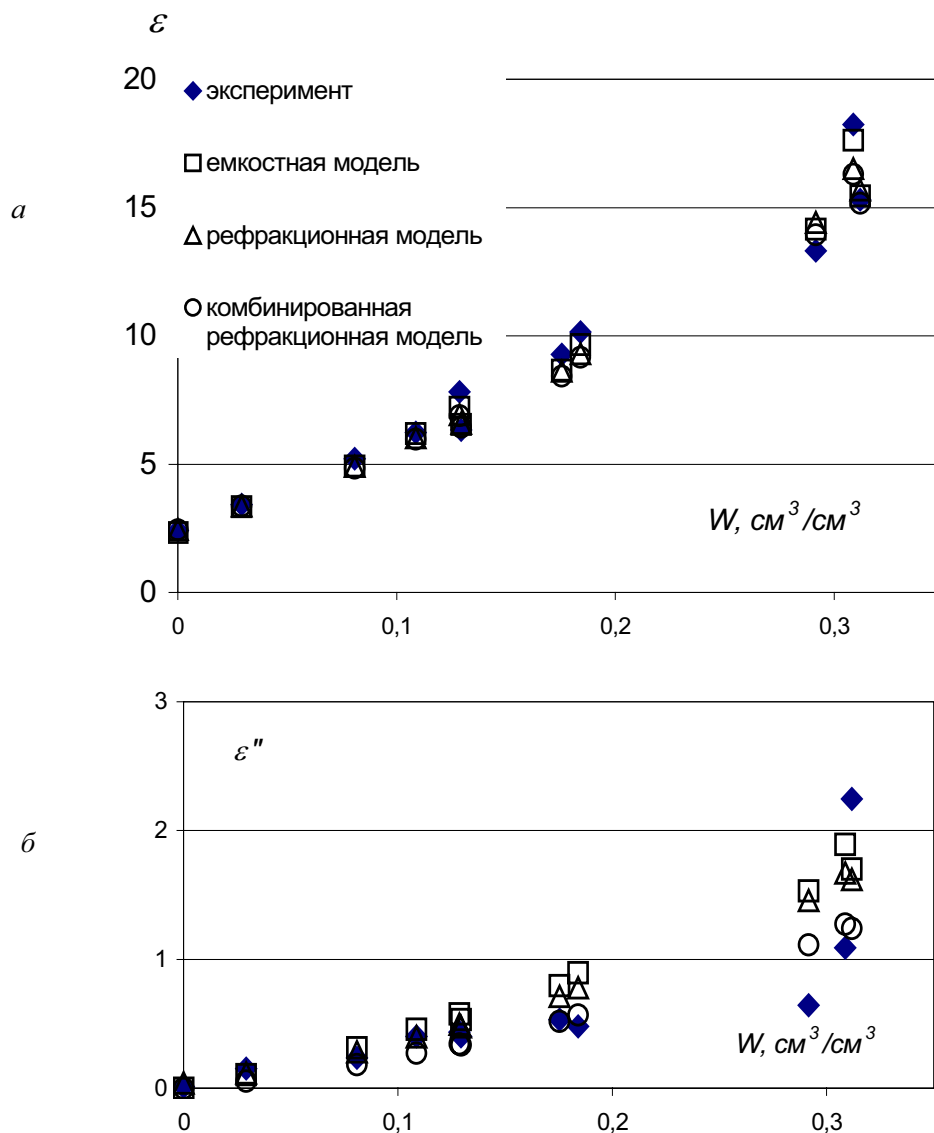


Рис. 3. Сопоставление результатов измерения действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости порошка материала СТ-10 на частоте 2,5 ГГц в зависимости от влажности с результатами расчетов по некоторым моделям.

Литература

1. *Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Галеев О.В., Мандрыгина В.Н.* Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. – С. 28-34.
2. *Sihvola A.H.* Self-consistency aspects of dielectric mixing theories // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1989. V.GE-27. N.4. P.403-415.
3. *Дручинин С.В.* Исследование применимости формул смеси для описания диэлектрической проницаемости сред с большим содержанием включений // Радиотехника и электроника. 2000. Т.45. № 2. С. 230-239.
4. *Kärkkäinen K., Sihvola A., Nikoskinen K.* Analysis of a Three-Dimensional Dielectric Mixture with Finite Difference Method // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, 2001, V. 39, № 5, P. 1013-1018.
5. *Sihvola A.* How Strict are Theoretical Bounds for Dielectric Properties of Mixtures? // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, 2002, V.40, №4, P.880-886.
6. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т.8. Электродинамика сплошных сред. М. ФИЗМАЛИТ. 2001. 856 с.
7. *Боярский Д.А., Тихонов В.В.* Учёт диэлектрических свойств связанной воды при моделировании эффективной диэлектрической проницаемости влажных почв в СВЧ-диапазоне // Радиотехника и электроника. 1998, Т. 41. № 4. С. 446-454.

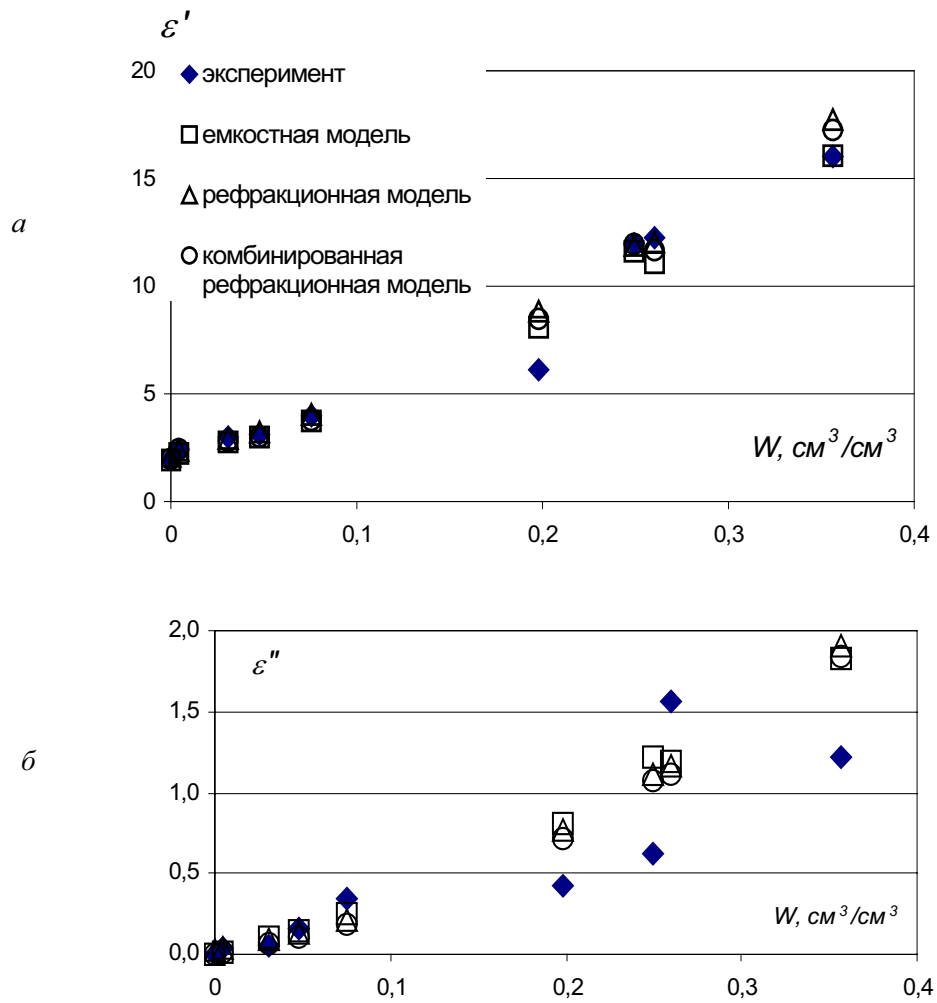


Рис. 4. Сопоставление результатов измерения действительной (а) и мнимой (б) частей комплексной диэлектрической проницаемости порошка материала СТ-5 на частоте 2,5 ГГц в зависимости от влажности с результатами расчетов по некоторым моделям.