

УДК 621.317:541.13

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТНЫХ СИСТЕМ. IV. ЧАСТОТА 75,5 ГГц

А.А. Ашеко, С.А. Батулин

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
61077, Харьков, пл. Свободы, 4
E-mail: Asheko@pht.univer.kharkov.ua*

Received 7 September 2011, accepted 16 October 2011

Выполнены исследования комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) на частоте 75,5 ГГц в интервале температур 271-353 К ряда моно- и полиэлектролитных водных систем. Исследования проводились с помощью разработанного компьютеризированного экспериментального стенда отражательного типа. Систематические ошибки в определении значений КДП не превышают 0,5% для действительной части КДП и 0,8% для мнимой. Характер полученных температурных и концентрационных зависимостей свидетельствует о релаксационной природе взаимодействия электромагнитного излучения с исследованными системами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диэлектрическая спектроскопия, комплексная диэлектрическая проницаемость, дипольная релаксация, вода, электролит.

DIELECTRIC PROPERTIES OF WATER ELECTROLYTE SYSTEMS. IV. FREQUENCY 75.5 GHz

A.A. Asheko, S.A. Batulin

*V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody Sq. 4, 61022, Kharkiv, Ukraine*

Researches of complex permittivity on the frequency 75.5 GHz in the temperature range 271-353 K of mono- and polyelectrolyte water systems were made. The studies were conducted with the help of original computer-based experimental stand reflective type. Systematic errors in determining the values of complex permittivity do not exceed 0.5% for the real part of the complex permittivity and 0.8% for the imaginary part. Character of the obtained temperature and concentration dependence of the relaxation indicates the nature of the interaction of electromagnetic waves from these systems.

KEY WORDS: dielectric spectroscopy, the complex dielectric constant, dipole relaxation, water, electrolyte.

ДИЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДНИХ ЕЛЕКТРОЛІТНИХ СИСТЕМ. IV. ЧАСТОТА 75,5 ГГц.

А.А. Ашеко, С.А. Батулін

*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
61077, Харків, пл. Свободи, 4*

Виконано дослідження комплексної діелектричної проникності на частоті 75,5 ГГц в інтервалі температур 271-353 К ряду моно- та поліелектролітних водних систем. Дослідження проводились за допомогою розробленого комп'ютеризованого експериментального стенда відбивного типу. Систематичні похибки у визначенні комплексної діелектричної проникності не перевищують 0,5% для дійсної частини КДП та 0,8% для уявної. Характер отриманих температурних та концентраційних залежностей свідчить о релаксацийній природі взаємодії електромагнітного випромінювання з досліджуваними системами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: діелектрична спектроскопія, комплексна діелектрична проникність, дипольна релаксація, вода, електроліт.

Приведены результаты экспериментальных исследований температурной и концентрационной зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) ряда водных моно- и полиэлектролитных систем на частоте 75,4 ГГц. Работа выполнена в продолжение исследований КДП тех же объектов на частотах 9,5 ГГц, 35,5 ГГц и 47,7 ГГц [1-3]. Цель исследования – разработка многопараметрической релаксационной модели взаимодействия микроволнового излучения с водными электролитными системами. Разрабатываемая многопараметрическая аппроксимационная модель, позволяющая адекватно описать диэлектрические свойства водных электролитных систем, является фундаментальной основой решений обратных задач дистанционного зондирования Земли (земных покровов и акваторий). Повышение корректности постановки и решения обратных задач и дальнейшее развитие методов дистанционного зондирования требуют разработки высокоточной релаксационной модели диэлектрических свойств водных систем [4,8].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Блок-схема созданного экспериментального стенда отражательного типа для измерения КДП сильнопоглощающих жидкостей ($\text{tg}\delta \geq 1$) представлена на рис.1.

Стенд позволяет проводить измерения КДП в диапазоне частот 75-78 ГГц. Метод основан на исследовании вариации значений коэффициента отражения СВЧ-мощности от поверхности жидкости и подвижного поршня при изменении толщины слоя жидкости между ее отражающей поверхностью и поршнем [9].

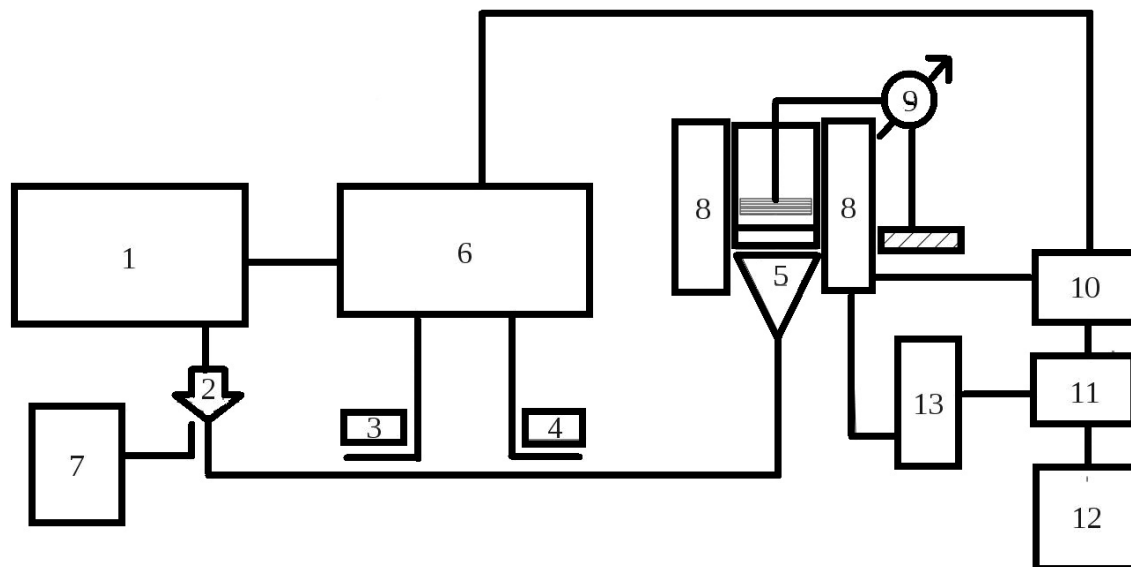


Рис.1. Блок-схема экспериментального стенда

В качестве генератора /1/ и приёмного устройства /6/ в экспериментальном стенде использован измеритель КСВН панорамный Р2-69. Структурная схема приёмного устройства построена на принципе отдельного выделения и детектирования падающего на исследуемый объект и отраженного СВЧ-сигналов. Напряжение, пропорциональное квадрату измеряемого коэффициента отражения, с приёмного устройства /6/ подаётся на АЦП интерфейсного модуля /11/ через усилитель /10/. Интерфейсный модуль преобразует значения напряжения в цифровой код и передаёт его в компьютер /12/. Частота электромагнитных колебаний контролируется с помощью электронносчетного частотомера ЧЗ-54 /7/ с блоком преобразователем частоты ЯЗЧ-87. В схеме также используется преобразователь частоты Ч5-13. Термостатирование измерительной камеры осуществляется с помощью термостата /13/, управляемого компьютером /12/ через интерфейсный модуль/11/.

Измерительная камера /14/ представляет собой секцию круглого волновода в термостатирующей рубашке /8/ с деталями крепления механизма перемещения поршня и измерителя длины /9/. Внутренний диаметр волновода выбран так, чтобы в отсутствие диэлектрика в нем могла распространяться волна типа Н₀₁. С одной стороны измерительная камера ограничена полуволновой диэлектрической втулкой, с другой – подвижным отражательным поршнем. Подвижный поршень бесконтактного типа позволяет варьировать толщину слоя исследуемой жидкости. Перемещение поршня контролируется измерителем длины /9/. Рабочая частота камеры 75,5 ГГц, длина ячейки 15 мм, диаметр 7мм.

Методика измерений сводится к следующему. Исследуемую водную систему заливаем в измерительную камеру, опускаем подвижный поршень на диэлектрическую втулку и с помощью калибровки приёмного устройства добиваемся равенства отражённой и падающей мощности. Перемещая поршень, выставляем толщину слоя жидкости, соответствующую «бесконечному слою» и отмечаем показания приемника, запустив программу «A_unlim». Программа «A_unlim» считывает значение с АЦП модуля и, создав текстовый файл, записывает в него полученное значение с маркером «A_unlim». Плавно перемещая поршень вниз (уменьшая толщину слоя жидкости), снимаем показания приемника, соответствующие максимальному и минимальному уровню принимаемого отраженного сигнала, запуская соответственно программы «A_max» и «A_min». Также отмечаем показания измерителя длины в точках, в которых мощность отраженного сигнала равна мощности отраженной при «бесконечном слое» жидкости. Программа «Calculation» считывает из текстового файла данные и с помощью соотношений (1)-(3) рассчитывает значения постоянной затухания α и фазовой постоянной β :

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_{жс}} \ln \frac{1 - \sqrt{A_{\infty} \cdot A_{\lambda_{жс}}/2}}{\sqrt{A_{\lambda_{жс}}/2} - \sqrt{A_{\infty}}} , \quad (1)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_{жс}} , \quad (2)$$

$$1 + A_{\infty} + 2A_{\infty}^{1/2} e^{2\alpha x} \cos 2\beta x = 0 , \quad (3)$$

где A – показания приемника, $\lambda_{жс}$ - длина волны в жидкости.

По данным о значениях α и β величины действительной ϵ' и мнимой ϵ'' составляющих комплексной

диэлектрической проницаемости рассчитываются по формулам (4),(5):

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 \cdot (\beta^2 - \alpha^2) , \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = 2 \left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \right)^2 \cdot (\beta \cdot \alpha) , \quad (5)$$

где λ_0 - длина волны в свободном пространстве, $\lambda_{кр}$ - критическая длина волны измерительной камеры.

Выполненный анализ возможных погрешностей показал, что относительные систематические ошибки измерений комплексной диэлектрической проницаемости сильнопоглощающих жидких систем не превышают для ε' – 0,5% и 0,8% для ε'' .

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ

С помощью созданного экспериментального стенда исследована температурная зависимость действительной и мнимой составляющих КДП дистиллированной воды и водных растворов с концентрациями:

NaCl – 2, 5, 12, 18, 36, 50, 70, 100, 140, 180, 200 ‰; MgCl₂ – 10, 20, 40, 60, 80, 100 ‰; CaSO₄ – 1 ‰

а также растворов:

вода-NaCl(30‰)-MgSO₄(5‰) [Раствор1]; вода-NaCl(30‰)-MgSO₄(5‰)-MgCl₂(10‰) [Раствор 2]; вода-NaCl(30‰)-MgSO₄(5‰)-MgCl₂(10‰)-CaSO₄(1‰) [Раствор 3].

Измерения выполнены на частоте 75,5 ГГц в интервале температур 271...353 К. Полученные значения действительной ε' и мнимой ε'' составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, а также скорректированной мнимой составляющей,

$$\varepsilon_d'' = \varepsilon'' - \sigma / (\omega \varepsilon_0), \quad (6)$$

равной мнимой составляющей КДП за вычетом потерь, связанных с ионной проводимостью, исследованных жидких электролитных систем как функции температуры и концентрации приведены на рисунках 2-13.

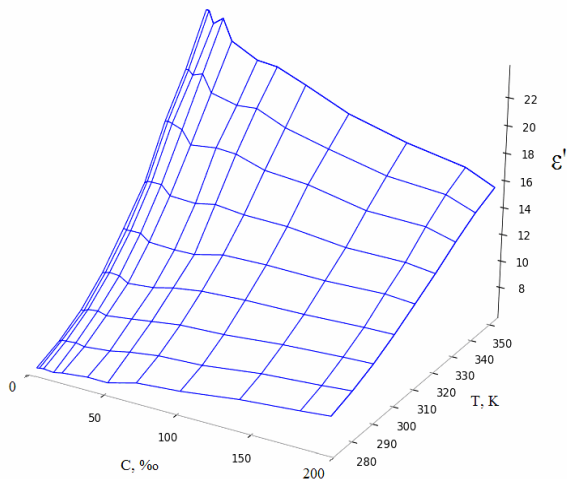


Рис.2. Зависимость ε' системы вода- NaCl от концентрации и температуры.

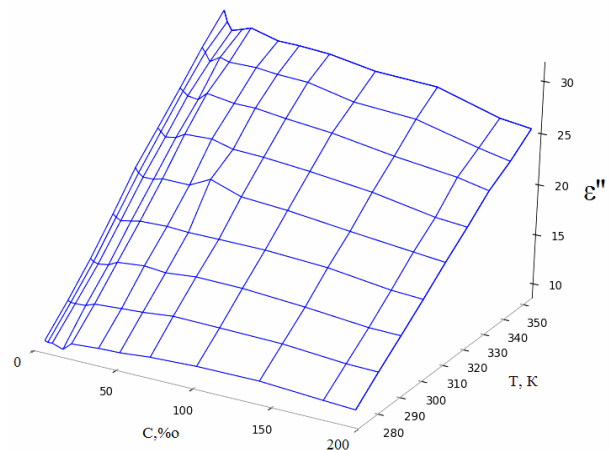


Рис.3. Зависимость ε'' системы вода-NaCl от концентрации и температуры.

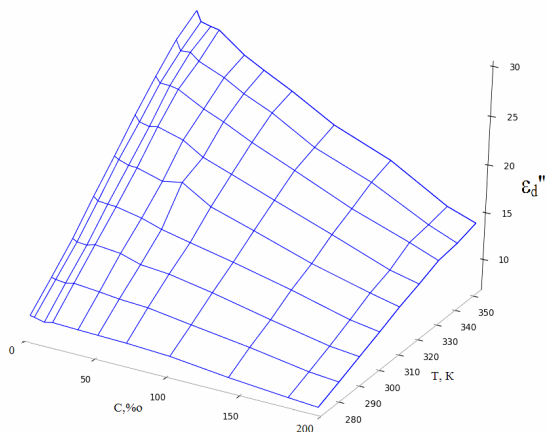


Рис.4. Зависимость ε_d'' системы вода-NaCl от концентрации и температуры.

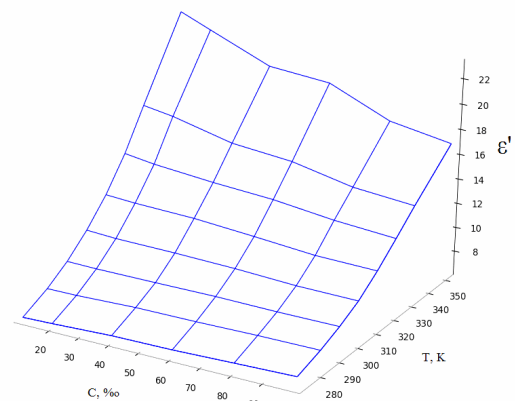


Рис.5. Зависимость ε' системы вода-MgCl₂ от концентрации и температуры.

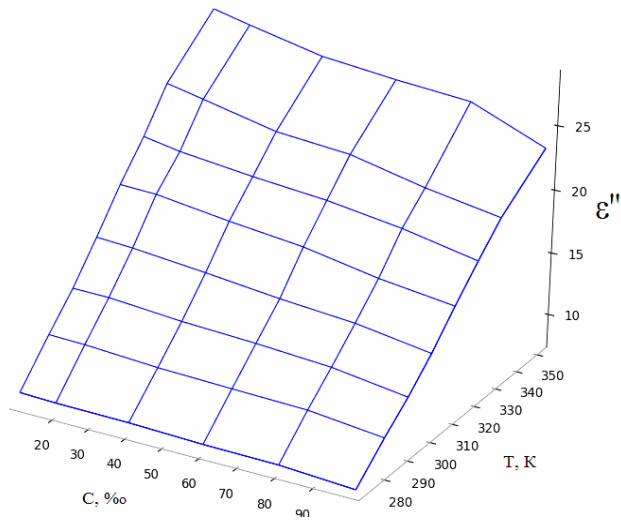


Рис.6. Зависимость ϵ'' системы вода - $MgCl_2$ от концентрации и температуры.

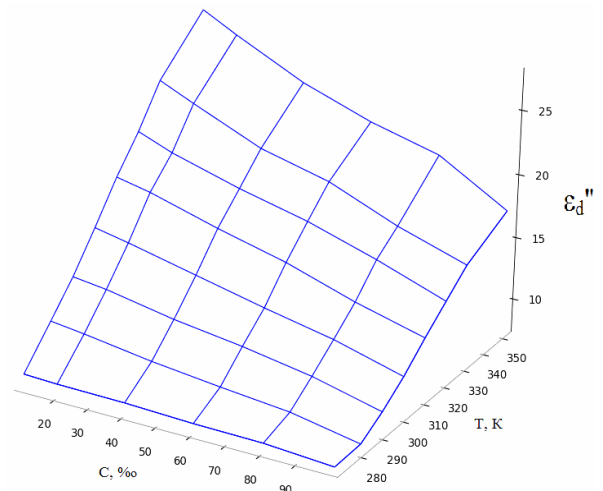


Рис.7. Зависимость ϵ_d'' системы вода - $MgCl_2$ от концентрации и температуры.

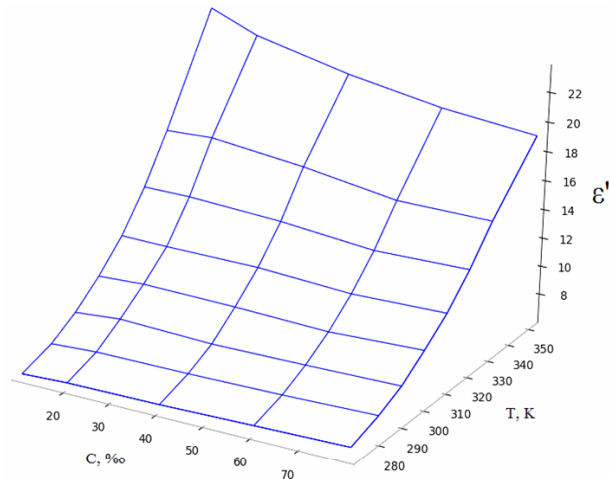


Рис.8. Зависимость ϵ' системы вода- $MgSO_4$ от концентрации и температуры.

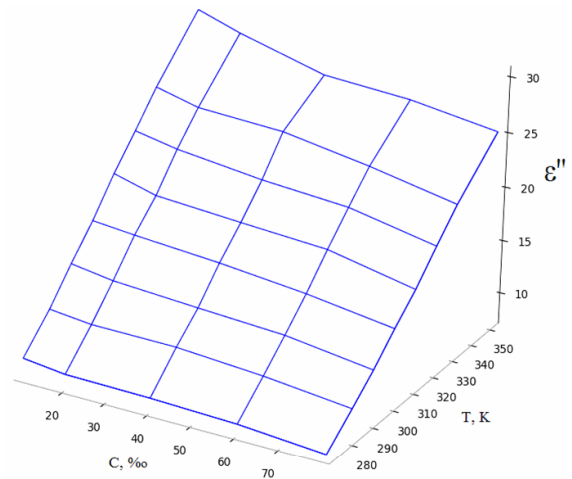


Рис.9. Зависимость ϵ'' системы вода- $MgSO_4$ от концентрации и температуры.

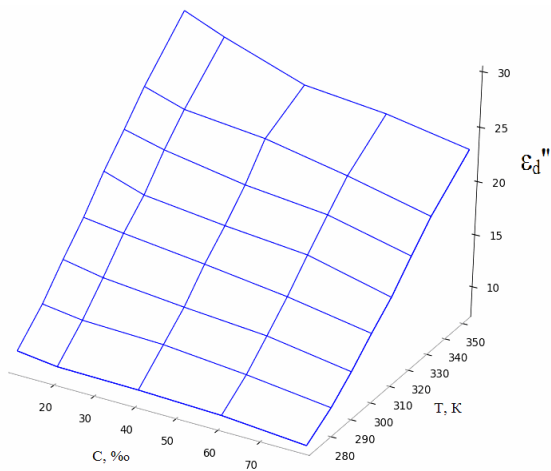


Рис.10. Зависимость ϵ_d'' системы вода- $MgSO_4$ от концентрации и температуры.

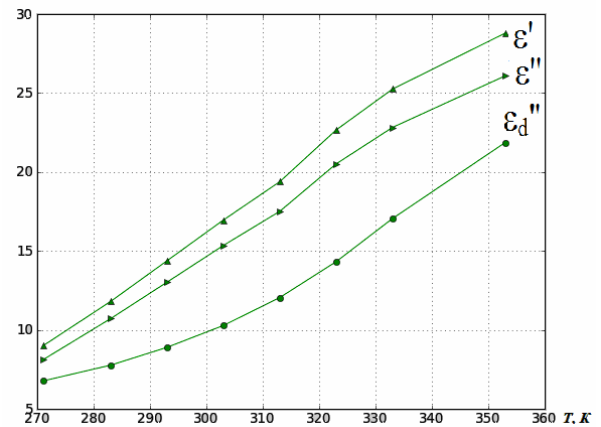
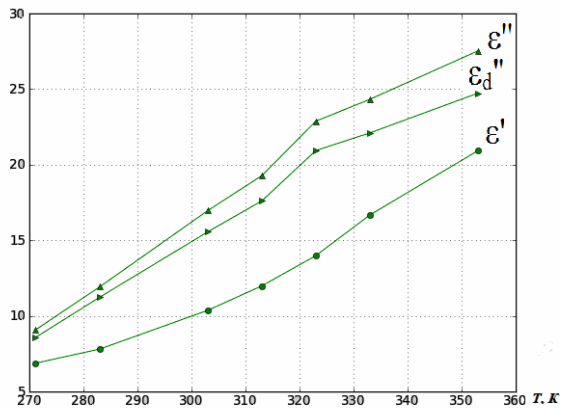
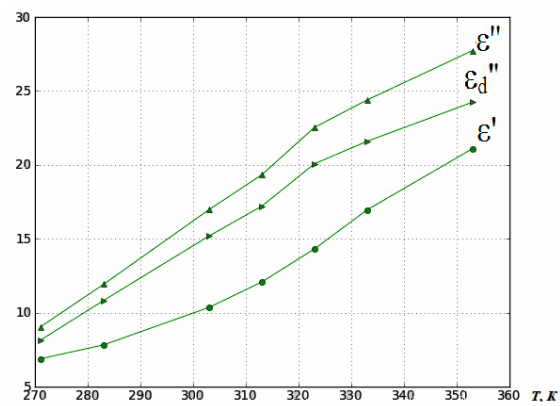


Рис.11. Зависимость ϵ' , ϵ'' и ϵ_d'' раствора 1 от температуры.

Рис.12. Зависимость ϵ' , ϵ'' и ϵ_d'' раствора 2 от температуры.Рис. 13. Зависимость ϵ' , ϵ'' и ϵ_d'' раствора 3 от температуры.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Из приведённых графических зависимостей (рис.2-13) видно, что для всех исследованных систем действительная и мнимая составляющие КДП обнаруживают концентрационную зависимость во всём исследованном интервале температур. С ростом солёности значения ϵ'' и ϵ_d'' уменьшаются. Действительная часть КДП систем вода-NaCl (рис.2), вода-MgCl₂ (рис.5), вода-MgSO₄ (рис.8) в низкотемпературной области (T~273K) с ростом концентрации растёт, а при высоких температурах (T~360K) с ростом концентрации уменьшается. Наблюдаемые инверсии концентрационных зависимостей, по-видимому, связаны с изменением знака сольватации. С ростом температуры все исследованные системы обнаруживают рост действительной и мнимой составляющих. Выраженная температурная зависимость свидетельствует о релаксационной природе взаимодействия электромагнитного излучения с исследованными системами [4-7,10]. Анализ экспериментальных данных приведенных в настоящей и в [1-3] статьях и результаты расчёта релаксационных параметров взаимодействия исследованных систем с микроволновым излучением предполагается привести в следующих публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Asheko A.A., Gordienko V.G., Sharkov E.A. Dielektricheskie svojstva vodnyh elektrolitnyh sistem v santimetrovom diapazone // Visnik HNU. Seriâ fizična Âdra, častinki, polâ. №490. - 2000. - Vyp.3(11). - S.90-96.
2. Asheko A.A., Gordienko V.G., Strel'cina A.K., Sharkov E.A. Dielektricheskie svojstva vodnyh elektrolitnyh sistem. II. Chastota 35,5GHz // Visnyk HNU. Seriâ fizična Âdra, častinki, polâ. №496. - 2000. - Vyp.4(12). - S.58-62.
3. Asheko A.A., Gordienko V.G., Tenishev A.E. Dielektricheskie svojstva vodnyh elektrolitnyh sistem. III. Chastota 47,7GHz // Visnyk HNU. Seriâ fizična Âdra, častinki, polâ. №522. - 2001. - Vyp.2(14). - S.81-86.
4. Meissner T., Wentz F. The dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. - 2004. - Vol. 42(9). - P. 1836 - 1849.
5. Buchner R., Heftner G.T., May P.M. Dielectric relaxation of aqueous NaCl solutions // J. Phys. Chem. A. - 1999. - Vol.103. - P.1-9.
6. Kaatze U. Hydrogen network fluctuations and the microwave dielectric properties of liquid water // Subsurface Sensing Technol. Appl. - 2000. - Vol.1. - P.377-391.
7. Nörtemann K., Hilland J., Kaatze U. Dielectric properties of aqueous NaCl solutions at microwave frequencies // J. Phys. Chem. A. - 1997. - Vol.101. - P.6864-6869.
8. Distanconnoe zondirovanie v okeanografii i gidrologii /Pod red. A.P. Krennela. - M.: Inostr. Lit., 1989. - 400s.
9. Asheko A.A., Gordienko V.G., Moroz V.V. Otrazhatel'nyj metod issledovanij dielektricheskih svojstv zhidkostey v millimetrovom diapazone dlin voln // Visnyk HNU. Seriâ fizična Âdra, častinki, polâ. - №443. - 1999. - Vyp.2(6). - S.59-64.
10. Frjolith G. Teorija dielektrikov -M.: Inostr. Lit., 1960. - 240s.