

**Сергеев С.А., Михайлов А.И., Короневский Н.В.,  
Сергеев Р.С., Зыков К.А., Сергеева Б.В.**  
Саратовский национальный исследовательский  
государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

## Определение диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта

*По экспериментальным частотным зависимостям коэффициентов отражения и передачи электромагнитных волн волноводных секций, заполненных водными растворами спирта, в диапазоне частот 7,8 ГГц ÷ 10,2 ГГц рассчитаны значения диэлектрической проницаемости. Проведен сравнительный анализ значений диэлектрической проницаемости водных растворов спирта, рассчитанных с использованием различных моделей эффективных сред и полученных экспериментально. Показано, что растворы спирта и воды хорошо описываются моделью Оделевского.*

**Ключевые слова:** растворы, СВЧ излучение, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН).

В работах [1,2] были получены зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), а также зависимости коэффициента ослабления водных растворов этилового спирта в диапазоне частот 7,8 ÷ 10,2 ГГц. В эксперименте использовались волноводные секции, представляющие собой отрезки прямоугольного волновода стандартного сечения длиной 5, 29, 52 и 114 мм с тонкими слабопоглощающими пробками на фланцах из материала, прозрачного для СВЧ излучения, пространство между которыми полностью заполнялось исследуемыми жидкостями [3-9].

Исследовались образцы растворов, состоящих из деионизованной воды и этилового спирта различных концентраций (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 %).

На рис. 1-2 представлены графики зависимостей КСВН и ослабления от частоты спирта 95 %, растворов спирта с различной концентрацией воды, а также деионизованной воды в диапазоне частот 7,8 ÷ 10,2 ГГц для волноводной секции длиной 5 мм.

В данной работе по экспериментальным зависимостям были рассчитаны значения мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта. Также проведено теоретическое определение диэлектрической проницаемости растворов с использованием нескольких моделей эффективных сред.

Теоретические коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $T$  рассчитывались по следующим формулам [7,8]:

$$R = \frac{(\gamma_0^2 - \gamma^2) \cdot i \cdot \sin(\gamma \cdot L)}{2 \cdot \gamma_0 \cdot \gamma \cdot \cos(\gamma \cdot L) + (\gamma_0^2 + \gamma^2) \cdot i \cdot \sin(\gamma \cdot L)}, \quad T = \frac{2\gamma_0\gamma}{2\gamma_0\gamma \cdot \cos(\gamma L) + (\gamma_0^2 + \gamma^2) \cdot i \sin(\gamma L)}, \quad \text{где}$$

$$\gamma_0 = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}, \quad \gamma = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} - \text{коэффициенты распространения волны в пустом и}$$

заполненном волноводе,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $f$  – частота,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума,  $\varepsilon = \varepsilon' + j\varepsilon''$  – комплексная диэлектрическая постоянная исследуемого вещества, помещенного в волновод,  $a$  – ширина кюветы,  $\mu_0$  – магнитная постоянная

вакуума,  $\mu$  – магнитная постоянная исследуемого вещества,  $L$  – длина заполненной части волновода. Приведенные выше соотношения получены решением уравнений Максвелла для части волновода, полностью заполненной веществом.

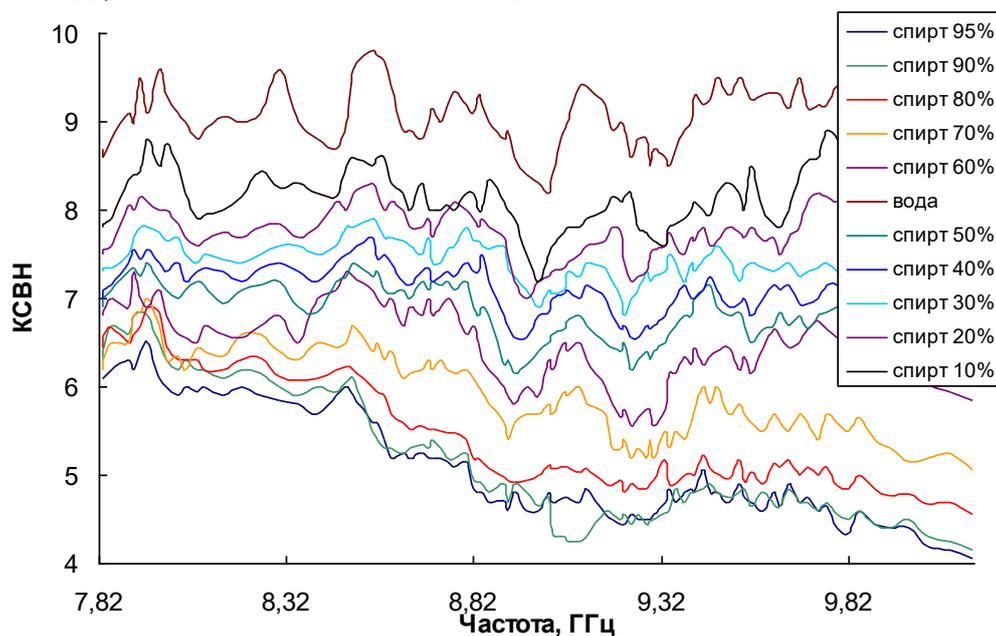


Рис. 1

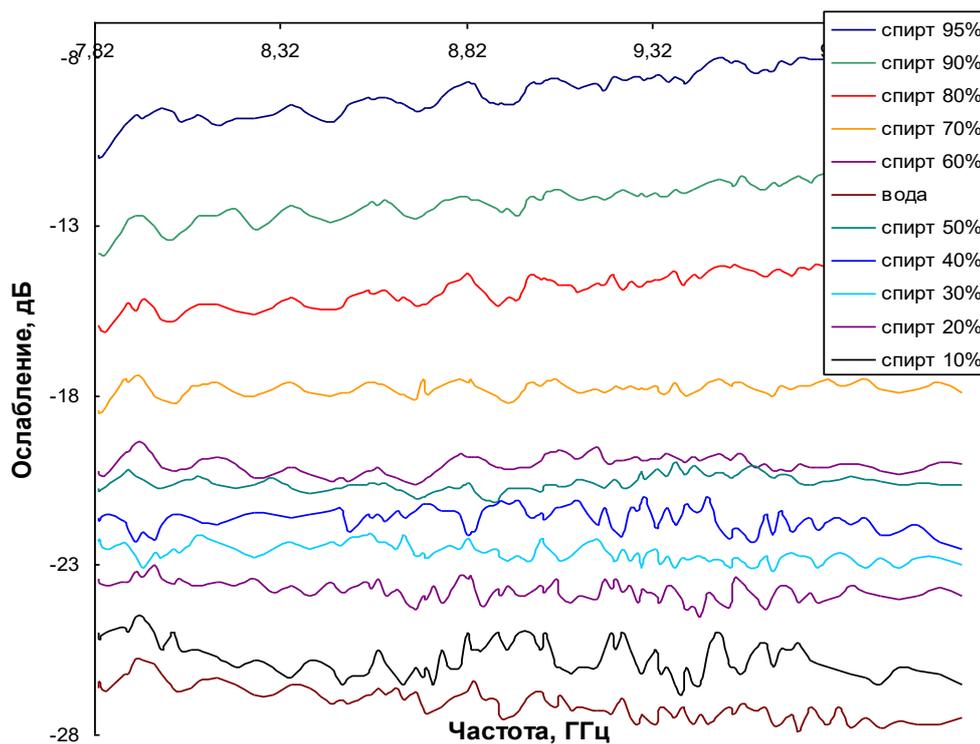


Рис. 2

Диэлектрическая проницаемость определялась следующим образом: варьировалась действительная и мнимая компоненты диэлектрической проницаемости, вычислялись коэффициенты отражения и пропускания на частотах, на которых проводилось их экспериментальное определение. Наиболее удачным считалось приближение ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ), при котором сумма квадратов разностей теоретического и экспериментального коэффициентов отражения и пропускания минимальна.

Значения диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта были рассчитаны для разных длин волноводных трактов (5 мм, 29 мм, 52 мм, 114 мм). Далее были определены средние значения диэлектрической проницаемости ( $\Delta$ ). Результаты расчета диэлектрической проницаемости приведены в таблице 1.

Таблица 1

	Объемная доля этилового спирта в водном растворе, %										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
5 мм	24	30	35	43	48	50	53	58	62	69	81
29 мм	24	29	37	41	45	48	52	56	65	71	82
52 мм	23	30	35	44	48	49	51	55	59	67	80
114 мм	23	32	37	45	50	54	59	63	67	72	79
$\Delta$	23,5	30,2	36	43,2	47,4	50,2	53,7	58	63,2	69,7	80,5
$\epsilon_z$	24	29,1	36,2	42,5	46,2	50,3	51,3	57,6	62,1	70,3	81

Проведя анализ полученных данных можно сделать следующий вывод: для всех растворов увеличение объемной доли компонента в воде приводит к уменьшению значения диэлектрической проницаемости всей системы в целом, что хорошо согласуется с известными литературными данными [9-12].

Для теоретического расчета диэлектрической проницаемости растворов использовались модели Максвелла-Гарнетта, Оделевского и К. Лихтенеккера. Для расчета диэлектрической проницаемости необходимо знать объемную долю включенного в среду вещества, значения диэлектрических проницаемостей среды и включенного вещества. Были использованы следующие значения диэлектрической проницаемости: для воды  $\epsilon = 81$  и этилового спирта  $\epsilon = 24$ .

Минимальные расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами были получены при использовании модели Оделевского. Эффективная диэлектрическая проницаемость рассчитывалась следующим образом:

$$\epsilon_z = a \sqrt{a^2 + \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{2}}, \text{ где } a = \frac{(3y_1 - 1)\epsilon_1 + (3y_2 - 1)\epsilon_2}{4}, \epsilon_1, \epsilon_2 - \text{значения диэлектрической}$$

проницаемости первого и второго компонента раствора,  $y_1, y_2$  – объемные концентрации первого и второго компонента раствора,  $\epsilon_z$  – эффективное значение диэлектрической проницаемости раствора. Полученные с помощью данной модели значения  $\epsilon_z$  представлены в нижней строке таблицы 1.

Таким образом, в данной работе показана возможность определения концентрации спирта в растворе с помощью волноводного метода. Для вычисления диэлектрической проницаемости водных растворов этилового спирта использовалась модель Оделевского, дающая хорошее согласие с экспериментом.

Технологиям получения и исследованиям свойств нано- и микрочастиц различной природы [13-19], коллоидам на их основе [20-23], а также новым композитным материалам [24-29] уделяется внимание при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского в процессе изучения следующих дисциплин: Основы молекулярной электроники, Физика и химия границ раздела фаз и коллоидных систем, Физико-химические основы технологии электроники и наноэлектроники, Компьютер в физической лаборатории, Физические основы твердотельной электроники (направление подготовки 11.03.04); Физика и химия коллоидов и границ раздела фаз (11.04.04); Физика и химия поверхности и коллоидов, Материаловедение и технологии современных и перспективных материалов; Интеллектуальные материалы для капсулирования и доставки лекарств, Физико-химические основы капсулирования и создания нанокомпозитов, Полимерные материалы и композиты на их основе, Методы моделирования и оптимизации свойств

нетканых материалов (22.04.01) [30-41]. Данной тематикой студенты активно занимаются в рамках подготовки курсовых работ и дипломных проектов. На кафедре физики полупроводников несколько лет работает научный кружок студентов и аспирантов «Коллоиды наноразмерных объектов: синтез, исследование свойств, перспективы применения» (научный руководитель доцент Сергеев С.А.).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-07-00185*

#### Библиографический список

1. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств водных растворов этилового спирта на сверхвысоких частотах // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2015. Т. 1. № 1. С. 332-334.
2. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств водных растворов этилового спирта в СВЧ диапазоне // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. конф. Саратов: «Техно-Декор», 2015. С. 144-145.
3. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на СВЧ. М: Физматгиз, 1963. 404 с.
4. Effect of microwave radiation on polymer microcapsules containing inorganic nanoparticles / D.A. Gorin, D.G. Shchukin, A.I. Mikhailov, K. Köhler, S.A. Sergeev et al. // *Technical Physics Letters*. 2006. Т. 32, № 1. С. 70-72.
5. Investigation of absorption and reflection spectra of aqueous suspensions of nanoparticles in the X band of microwave bandwidth / S.A. Sergeev, S.A. Portnov, D.A. Gorin et al. // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. Saratov, 2007. Т. 653606.
6. Влияние микроволнового излучения на полимерные микрокапсулы с неорганическими наночастицами / Д.А. Горин, Д.Г. Щукин, А.И. Михайлов, С.А. Сергеев и др. // *Письма в ЖТФ*. 2006. Т. 32, вып. 2. С. 45-50.
7. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Теоретическое и экспериментальное исследование спектров отражения и поглощения волноводных секций, заполненных жидким диэлектриком // *В мире научных открытий*. 2015. № 8.1 (68). С. 494-506.
8. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Теоретическое исследование спектров отражения волноводных секций, заполненных жидким диэлектриком // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. конф. Саратов: «Техно-Декор», 2015. С. 146-147.
9. Суляев В.И., Кочеткова Т.Д. Микроволновые спектры диэлектрической проницаемости водных смесей метилового спирта в области диэлектрической релаксации для температур 220-320 К // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2003. № 9. С. 72-75
10. Bertolini D., Cassttari M., Salvetti G.J. The dielectric properties of alcohols – water solutions. I. The alcohol rich region // *Chem. Phys*. 1983. Vol. 78. № 10. P. 365-372.
11. Satoru Mashimo, Shinichi Kuwabara Dielektric relaxation of mixtures of water and primary alcohol // *J. Chem. Phys*. 1989. Vol. 90. № 6. P. 3292-3294.
12. Kaatze U., Schafer M., Pottel R. The complex dielektric spektrum of aqueous methanol and isopraponol solution // *Z. Phys. Chem*. 1989. Vol. 165. P. 3292-3294.
13. Composite Magnetite and Protein Containing CaCO<sub>3</sub> Crystals. External Manipulation and Vaterite→Calcite Recrystallization-Mediated Release Performance / A. Sergeeva, R. Sergeev, E. Lengert et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7, Is. 38. P. 21315-25.
14. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, обладающих магнитными свойствами / Р.С. Сергеев, А.С. Сергеева, Е.В. Ленгерт, С.А. Сергеев // *Наноматериалы и нанотехнологии: проблемы и перспективы: сборник материалов науч. конф. М.: Прондо*. 2014. С. 275-283.
15. Формирование и исследование сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами / Р.С. Сергеев, А.С. Сергеева, Е.В. Ленгерт, С.А. Сергеев // *Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: сборник материалов Всерос. науч. конф. Саратов: ИЦ «Наука», 2014. С. 244-249.*
16. Сергеева А.С., Сергеев Р.С., Сергеев С.А. Синтез пористых микрочастиц, обладающих магнитными свойствами // *Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Материалы конф. Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С. 139-141.*
17. Сергеева А.С., Сергеев Р.С., Сергеев С.А. Исследование процесса перекристаллизации магнитных микрочастиц // *Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов: Материалы конф. Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С. 142-144.*
18. Синтез и исследование свойств сферических пористых микрочастиц карбоната кальция, функционализированных магнитными наночастицами / А.С. Сергеева, Р.С. Сергеев, Е.В. Ленгерт, С.А. Сергеев // «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. Всерос. конф. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. С. 156-157.

19. Vaterite→calcite recrystallization of magnetic calcium carbonate microparticles / A. Sergeeva, R. Sergeev, E. Lengert et al. // The nanoparticles and nanostructured coatings microcontainers: technology, properties and applications. Mater. 6th Int. Conf. Saratov: Saratov State University, 2015. P. 72.
20. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств водотопливных эмульсий с наночастицами магнетита на сверхвысоких частотах // В мире научных открытий. 2014. № 4 (52). С. 148-160.
21. Коллоиды магнетита: получение и исследование свойств в СВЧ диапазоне / С.А. Сергеев, А.И. Михайлов, Д.А. Горин и др. // Полупроводниковая электроника и молекулярные нанотехнологии: Сб. статей. Саратов: ИЦ «Наука», 2013. С. 214-228.
22. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств натрий-фосфатного буфера на сверхвысоких частотах // «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика»: тез. докл. Всерос. конф. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2014. С. 154-155.
23. Сергеев С.А., Гулманов Э.Э., Сергеев Р.С. Исследование свойств водных растворов родамина на сверхвысоких частотах // «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика»: тез. докл. Всерос. конф. Саратов: «Техно-Декор», 2015 С. 141-143.
24. Исследование свойств неорганических нановолокон с микрочастицами  $\text{CaCO}_3$  на сверхвысоких частотах / С.А. Сергеев, Н.В. Короневский, Э.Э. Гулманов, Р.С. Сергеев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сб. ст. Всеросс. конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 155-159.
25. Синтез и исследование свойств неорганических нановолокон с микрочастицами  $\text{CaCO}_3$  / С.А. Сергеев, Н.В. Короневский, В.С. Аткин, Р.С. Сергеев // «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика»: тез. докл. Всерос. конф. Саратов: «Техно-Декор», 2017. С. 249-251.
26. Короневский Н.В., Сергеев Р.С., Сергеев С.А. Материаловедение наноструктурированных материалов. Синтез и исследование свойств микрочастиц карбоната кальция с наночастицами магнетита на неорганических волокнах. Germany. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 120 с.
27. Синтез и исследование свойств микрочастиц  $\text{CaCO}_3$ , выращенных на неорганических волокнах и модифицированных наночастицами  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  / Н.В. Короневский, Р.С. Сергеев, М.С. Савельева, С.А. Сергеев // «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине - 2017»: Материалы Всерос. школы-семинара. Саратов: Саратовский источник, 2017. С. 120-123.
28. Формирование и исследование свойств микрочастиц карбоната кальция с наночастицами магнетита на неорганических нановолокнах / Н.В. Короневский, Р.С. Сергеев, М.С. Савельева, С.А. Сергеев // Всеросс. конф. «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии». Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2018. С. 38-42.
29. Влияние освещения на газочувствительность тонких пленок диоксида олова к парам этанола при комнатной температуре / В.В. Симаков, И.В. Синёв, А.В. Смирнов, И.Д. Осыко, А.И. Гребенников, С.А. Сергеев // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 1. С. 34-40.
30. Михайлов А.И., Сергеев С.А. Физические основы твердотельной электроники: Учеб. пособие. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2007. 164 с.
31. Михайлов А.И., Сергеев С.А., Глуховской Е.Г. Физические основы твердотельной электроники и микроэлектроники: Планы семинарских занятий: уч.пос. Саратов: «Промышленность Поволжья», 2008. 116с
32. Сергеев С.А., Михайлов А.И., Сергеева Б.В. Современные компьютерные технологии. Персональный компьютер в инженерной практике. Germany. Saarbrücken: ИД: LAP LAMBERT, 2011. 240 с.
33. Сергеев С.А. Компьютер в физической лаборатории: Учеб.- метод. пособие. Саратов: ООО «Редакция журнала «Промышленность Поволжья», 2008. 368 с.
34. Сергеев С.А., Ерохина Е.И., Сергеева Б.В. Инженерная графика. Основы построения чертежей: Учеб.- метод. пособие. Саратов: ООО «Редакция журнала «Промышленность Поволжья», 2009. 84 с.
35. Сергеев С.А., Сысоев И.В. Компьютер в физической лаборатории: учеб.-метод. пособие. Саратов: «Саратовский источник», 2013. 304 с.
36. Физика и химия границ раздела фаз: учеб. пособие / С.А. Портнов, С.А. Сергеев, О.А. Иноземцева и др. Саратов: Саратовский источник, 2015. 132 с.
37. Физика и химия коллоидных систем: учеб. пособие / С.А. Сергеев, О.А. Иноземцева, Д.Н. Браташов и др. Саратов: Саратовский источник, 2016. 168 с.
38. Сергеев С.А., Сысоев И.В., Горин Д.А. Основы программирования и анализа данных для задач материаловедения, биофизики и физической химии: уч. пособ. Саратов: Саратовский источник, 2016. 304 с.
39. Сергеев С.А., Синёв И.В., Горин Д.А. Основы программирования для задач биофизики и материаловедения: учеб. пособие. Саратов: «Амирит», 2017. 308 с.
40. Методы биофотоники для исследования сложных систем: уч. пособ. / С.А. Сергеев, В.А. Панарин, А.А. Козырев, М. С. Савельева, Д. А. Горин. Саратов: «Амирит», 2017. 104 с.
41. Измерение параметров и характеристик микроструктурных волноводов и твердотельных инжекционных лазеров: учеб. пос. / Ю.С. Скибина, А.А. Занишевская, А.А. Шувалов и др. Саратов: «Амирит», 2018. 52 с.