

**СПЕКТРЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕФТЕВОДОНАСЫЩЕННЫХ
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА
И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ В ЭТИХ ПОРОДАХ**

П.П. Бобров¹, В.Л. Миронов^{2,3}, А.В. Репин¹

¹ Омский государственный педагогический университет, 644099, Омск, набережная им. Тухачевского, 14, Россия

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38, Россия

³ Сибирский аэрокосмический государственный университет им. М.Ф. Решетнева,
660014, Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31 Россия

Приведены результаты экспериментальных измерений в диапазоне частот 10 кГц — 1 ГГц при температурах 25—65 °С диэлектрической проницаемости и эквивалентной удельной проводимости песчано-глинистых образцов, состоящих из смеси речного песка с бентонитом или каолином, насыщаемых эмульсиями солевой раствор—дизтопливо. Показано, что при содержании солевого раствора в насыщающем флюиде не выше 10 % диэлектрическая проницаемость в диапазоне частот 1 МГц — 1 ГГц мало зависит от минерального состава образца и концентрации насыщающего раствора. При доле воды 33.3 % и выше увеличение концентрации солевого раствора приводит к увеличению как эквивалентной удельной проводимости, так и действительной части КДП. С помощью рефракционной модели КДП определены диэлектрические свойства связанной воды, которые зависят от температуры и вида глины (бентонита или каолина) в составе песчано-глинистой смеси, но не зависят от водонасыщенности и количества глины в образце.

Нефтеносные образования, песчано-глинистые породы, диэлектрическая проницаемость, удельная электропроводность, многочастотная диэлектрическая релаксация.

**DIELECTRIC-PERMITTIVITY SPECTRA OF OIL-WATER-SATURATED SAND-CLAYEY ROCKS
OF DIFFERENT MINERALOGICAL COMPOSITIONS AND RELAXATION PROPERTIES
OF WATER IN THESE ROCKS**

P.P. Bobrov, V.L. Mironov, and A.V. Repin

Experimental measurements of dielectric permittivity and equivalent conductivity of sand-clayey samples (a mixture of river sand with bentonite or kaolin) saturated with salt-solution–diesel-fuel emulsions were performed in the frequency range from 10 kHz to 1 GHz at temperatures of 25–65 °C. It is shown that when the content of the salt solution in the saturating fluid does not exceed 10 %, the dielectric permittivity in the frequency range from 1 MHz to 1 GHz depends little on the mineral composition of the sample and on the concentration of the saturating solution. When the portion of water is 33.3 % or higher, an increase in the concentration of the salt solution leads to an increase in the equivalent conductivity and the real part of the complex dielectric permittivity. Using the refractive model of the complex dielectric permittivity, we have estimated the dielectric properties of bound water, which depend on temperature and the type of clay (bentonite or kaolin) in the sand-clay mixture but are independent of the water saturation and the amount of clay in the sample.

Oil-bearing deposits, sand-clayey rocks, dielectric permittivity, conductivity, multifrequency dielectric relaxation

ВВЕДЕНИЕ

Знание диэлектрических характеристик пород в диапазоне частот от сотен килогерц до единиц гигагерц требуется для разработки электромагнитных методов георазведки, в том числе с использованием сверхширокополосных импульсов, для подповерхностного зондирования, для точной геонавигации при бурении горизонтальных стволов скважин, при разработке методов диэлектрического каротажа [Аксельрод, 2007; Эпов и др., 2007, 2014; Ельцов и др., 2014].

© П.П. Бобров, В.Л. Миронов, А.В. Репин, 2015

DOI: 10.15372/GiG20150707

В работах [Эпов и др., 2009, 2011] приведены результаты измерений в широком частотном диапазоне диэлектрической проницаемости и проводимости песка и глины, насыщенных флюидом нефть—солевой раствор. В первой из них для моделирования частотных спектров комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon' - i\varepsilon''$ (КДП) использовалась рефракционная модель [Mironov et al., 2004], которая хорошо описывала спектры КДП смесей, составленных на основе песка, и давала значительное расхождение с экспериментальными данными для смесей, составленных на основе бентонитовой глины. Причина заключалась в сильном влиянии на частотах ниже 1 ГГц межслойной поляризации на границе вода—твердая поверхность, приводящей к значительному возрастанию действительной и мнимой частей КДП в глинистых породах с большой удельной поверхностью. Во второй работе при моделировании КДП образцов межслойная поляризация в образце учитывалась двумя областями диэлектрической релаксации, описываемой моделью Коула—Коула.

В работе [Эпов и др., 2012] на основе результатов измерений спектров частично водонасыщенных измельченных горных пород с содержанием глинистых минералов меньше 16 % создана диэлектрическая модель, входными параметрами которой являются содержание воды, температура и термодинамические характеристики воды. Если приписать релаксационные явления, связанные с наличием межфазной границы, диэлектрическим свойствам связанной воды, то удастся создать диэлектрическую рефракционную модель, в которой возрастание КДП породы на низких частотах объясняется в основном возрастанием КДП связанной воды [Mironov et al., 2013; Миронов и др., 2013].

В работе [Бобров и др., 2013а] приведены результаты измерения частотной и температурной зависимостей КДП нефтеводонасыщенных образцов на основе смеси бентонит—речной песок в равных массовых долях, насыщаемых флюидами пластовая вода—дизтопливо, а в работе [Репин и др., 2013] результаты исследования дополнены образцами смеси бентонит—речной песок в соотношении 70/30, насыщаемой эмульсией солевой раствор—дизтопливо при разных концентрациях солевого раствора. Показано, что релаксационные свойства связанной воды в смесях, где глинистая фракция представлена бентонитом, в диапазоне частот 1—1000 МГц практически не зависят от содержания бентонита и солиности раствора, а КДП образцов зависит от содержания связанной воды, т.е. от величины удельной поверхности.

В настоящей работе приведены результаты измерения КДП образцов, содержащих песок, бентонит и каолин. С использованием рефракционной модели показано, что КДП связанной воды в этих образцах зависит от минералогического состава. Исследованы также образцы с высокой водонасыщенностью, в которых часть воды не была связана на поверхности минеральных частиц. Для этой объемной воды также найдены параметры релаксационной модели.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения КДП образцов в диапазоне частот 10 МГц — 1 ГГц производились с помощью векторных анализаторов цепей ZVRE и ZNB8 фирмы Rohde-Schwarz. Измерительные ячейки представляли собой отрезки коаксиальной линии сечением 7/3 мм или 16/7 мм длиной от 2 до 10 см. На частотах выше 50 МГц измерялся комплексный коэффициент передачи ячейки, подключенной к векторному анализатору цепей (рис. 1). Расчет КДП производился по методике, описанной в [Эпов и др., 2011]. Для измерения в диапазоне 0.3—100 МГц эта же коаксиальная ячейка включалась в разрыв центрального проводника отрезка коаксиальной линии большего сечения, и измерялся комплексный коэффициент передачи этого отрезка. Методика измерений описана в [Бобров и др., 2012; Bobrov et al., 2015]. На час-

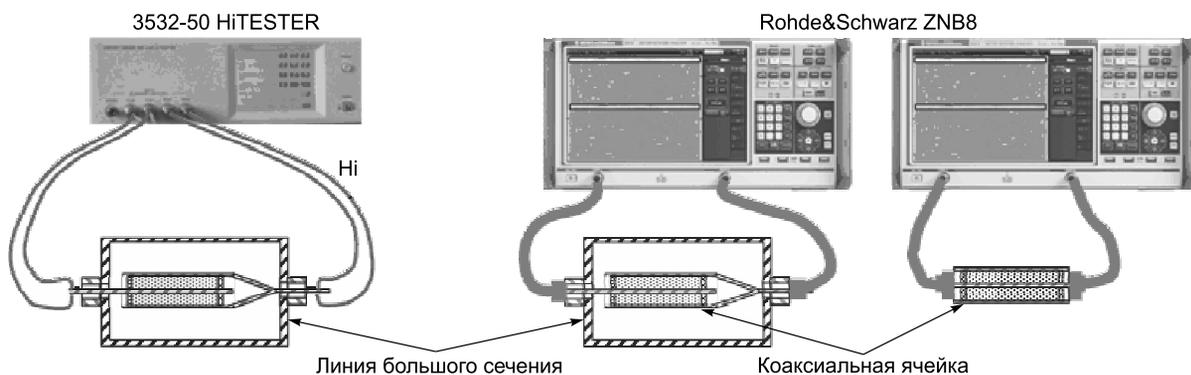


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения КДП в одной ячейке в широкой полосе частот.

тогах ниже 5 МГц отрезок линии с ячейкой присоединялся к измерителю импедансов 3532-50 HiTESTER производства фирмы НЮКИ. КДП исследуемого образца рассчитывалась по методике, описанной в [Эпов и др., 2011]. Для измерений температурной зависимости КДП использовалась климатическая камера ТН-МЕ-25 (Южная Корея) с точностью установки температуры 0.3 К.

В перекрывающихся частотных диапазонах 50—100 МГц и 0.3—5 МГц результаты измерений разными методами различались на величину, меньшую погрешности измерений, которая для действительной части КДП ϵ' в диапазоне частот 10 кГц — 1 ГГц для образцов низкочастотной удельной эквивалентной проводимостью $\sigma_3 \leq 0.1$ См/м составляла 0.7—5 %, повышаясь на частотах около 1 МГц и 1 ГГц до 6—7 %. Более высокая погрешность наблюдалась при измерении пород с проводимостью 0.5—1.0 См/м в диапазоне частот 5—10 МГц и достигала 12 %. Погрешность измерений мнимой части КДП ϵ'' не превышала 3 % во всем диапазоне частот.

Частотный диапазон ограничивается снизу влиянием приэлектродной поляризации. Граничную частоту, на которой этим влиянием можно пренебречь, мы определяли путем измерения импеданса ячейки на низких частотах при разных значениях напряжения сигнала от 0.1 до 1.0 В. Поскольку приэлектродная поляризация зависит от напряжения, отсутствие зависимости измеряемого импеданса от напряжения свидетельствует об отсутствии влияния приэлектродной поляризации. Эксперимент показал, что при эквивалентной удельной проводимости образца на частоте 20 кГц $\sigma_3 = 0.1$ См/м, отклонение измеренных значений действительной части КДП ϵ' от среднего значения изменяется от 10 % на частоте 100 Гц до 1.2 % на частоте 10 кГц, до 0.6 % на частоте 20 кГц и до 0.3 % на частоте 50 кГц. Максимальная приборная погрешность измерения прибором 3532-50 HiTESTER на этих частотах составляет 1.3—1.5 %. Таким образом, уже на частоте 10 кГц влияние приэлектродной поляризации незначительно и сопоставимо с погрешностью измерений прибором 3532-50 HiTESTER, а на частоте 50 кГц отсутствует. При эквивалентной удельной проводимости образца $\sigma_3 = 0.01$ См/м влияние приэлектродной поляризации отсутствует на частотах выше 20 кГц.

Подготовка образцов осуществлялась следующим образом. Сначала готовилась смесь предварительно высушенных речного песка и глины (бентонита или каолина) в нужном соотношении. Затем с применением небольшого количества эмульгатора «домультал» приготавливалась эмульсия пластовая вода—дизтопливо в разных соотношениях. Предварительные измерения показали, что по диэлектрическим свойствам во всем диапазоне частот дизтопливо практически не отличается от нефти. Пластовая вода с Даненбергского месторождения имела удельную проводимость 3.25 См/м, эквивалентную проводимости солевого раствора NaCl с концентрацией около 20 г/л.

Для уменьшения пористости и удаления воздуха образцы под давлением до 10 МПа уплотнялись в специальной форме, повторяющей форму измерительной коаксиальной ячейки. После помещения в измерительную ячейку образец дополнительно уплотнялся под прессом для создания хорошего контакта с электродами.

По окончании диэлектрических измерений образец высушивали в течение двух суток при 105 °С для определения плотности сухого сложения и объемной доли насыщающего флюида. Масса до и после высушивания измерялась с помощью электронных весов ВЛ-210 завода Госметр. По известным значениям плотности минералов и соотношения дизтопливо—раствор определялись объемные доли компонентов смеси. Характеристики исследованных образцов приведены в табл. 1, включая значения максимально возможного количества связанной воды (объемные доли) V_t , а также объемные доли твердой фазы V_r , воды V_B и нефти V_H , а также значения пористости K_p , коэффициентов водонасыщенности K_B и нефтенасыщенности K_H . Образцы содержали небольшую долю V_A заземленного воздуха, в большинстве образцов не превышающую 0.1. В табл. 1 для сравнения приведены также параметры образцов 5.1—5.4, результаты исследования которых приведены в [Бобров и др., 2013а].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 приведена частотная зависимость действительной части КДП ϵ' и эквивалентной удельной проводимости σ_3 , определяемой через мнимую часть КДП как $\sigma_3 = \omega \epsilon_0 \epsilon''$, образцов разного минералогического состава, насыщенных одним и тем же флюидом дизтопливо—пластовая вода в отношении 2/1. Поскольку при изготовлении образцов не удалось выдержать пористость одинаковой, доля воды изменяется от 0.101 в образце 1.3 до 0.132 в образце 5.3, а действительная часть КДП ϵ' на частоте 10 МГц изменяется от 42 в образце 1.3 до 79 в образце 4.3, где доля воды составляет 0.104. В этом образце соленость раствора оказалась выше из-за присутствия растворимых солей в разрушенном керне еще до насыщения его флюидом. При насыщении этого образца дистиллированной водой удельная эквивалентная проводимость σ_3 на частоте 100 кГц составила 1.3 См/м.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные, полученные для смеси песок—бентонит 50/50, насыщаемые флюидом с концентрацией солевого раствора 4 г/л (образцы 2.1—2.3) и пластовой водой

Таблица 1.

Параметры исследуемых образцов

№ образца	Отношение дизтопливо/вода	V_t	V_r	V_B	V_H	V_A	K_{II}	K_B	K_H
<i>Смесь песок-бентонит 70/30, насыщенная эмульсией пластовая вода—дизтопливо</i>									
1.1	Дизтопливо	0.07	0.581	0.000	0.268	0.151	0.419	0.000	0.640
1.2	9/1		0.663	0.039	0.210	0.089	0.337	0.115	0.622
1.3	2/1		0.652	0.101	0.203	0.043	0.348	0.292	0.583
1.4	1/2		0.569	0.269	0.135	0.028	0.431	0.624	0.312
<i>Смесь песок-бентонит 50/50, насыщенная эмульсией раствор (4 г/л) — дизтопливо</i>									
2.1	9/1	0.1	0.635	0.044	0.243	0.078	0.365	0.074	0.667
2.2	2/1		0.531	0.139	0.278	0.052	0.469	0.296	0.593
2.3	1/2		0.531	0.275	0.138	0.056	0.469	0.587	0.294
<i>Смесь песок-каолин 50/50, насыщенная эмульсией пластовая вода—дизтопливо</i>									
3.1	9/1	0.06	0.592	0.033	0.293	0.083	0.408	0.080	0.717
3.2	2/1		0.617	0.117	0.233	0.033	0.383	0.305	0.610
3.3	1/2		0.623	0.220	0.110	0.048	0.377	0.582	0.291
<i>Разрушенный керн (49.6 % глины), насыщенный эмульсией пластовая вода—дизтопливо</i>									
4.1	Дизтопливо	0.08	0.658	0.000	0.171	0.171	0.342	0.000	0.500
4.2	9/1		0.663	0.023	0.210	0.104	0.337	0.069	0.623
4.3	2/1		0.650	0.104	0.209	0.037	0.350	0.298	0.596
4.4	1/2		0.651	0.205	0.102	0.042	0.349	0.586	0.293
<i>Смесь песок-бентонит 50/50, насыщенная эмульсией пластовая вода—дизтопливо</i>									
5.1	Дизтопливо	0.12	0.650	0.002	0.266	0.082	0.350	0.006	0.760
5.2	9/1		0.572	0.085	0.314	0.018	0.428	0.200	0.495
5.3	2/1		0.620	0.132	0.188	0.060	0.380	0.347	0.596
5.4	1/2		0.628	0.235	0.095	0.042	0.372	0.632	0.255

концентрацией около 20 г/л (образцы 5.2—5.4). В образцах 5.3, 5.4 общая доля воды немного меньше, чем в соответствующих образцах 2.2 и 2.3, однако действительная часть КДП в обр. 5.3 ϵ' примерно в 1.5 раза выше, чем в обр. 2.2, а в обр. 5.4 выше, чем в обр. 2.3 более чем в 2 раза. Таким образом, повышение солёности раствора в эмульсии приводит к возрастанию не только σ_3 , но и действительной части КДП ϵ' . Такое возрастание значений ϵ' при повышении концентрации насыщающего раствора характерно и для пород, насыщенных только водой [Lasne и др., 2008].

При возрастании объемной доли воды в образцах значения ϵ' и σ_3 на всех частотах возрастают, однако это возрастание в разных образцах разное. Пока доля воды не превышает максимально возможного количества связанной воды V_t (см. табл. 1), возрастание значений ϵ' происходит почти одинаковым образом в разных образцах. При более высоких значениях водонасыщенности наиболее быстрый рост значений наблюдается в образцах группы 5 (смесь песок—бентонит 50/50, насыщаемая эмульсией пластовая вода—дизтопливо), а наименее быстрый — в образцах группы 2 (смесь песок—бентонит 50/50, насыщенная эмульсией с концентрацией раствора 4 г/л). Таким образом, на зависимость величины ϵ' от объемной доли воды влияют солёность раствора в насыщающем флюиде и доля связанной воды в образце (в образцах группы 5 она максимальна).

На рис. 4 приведены частотные зависимости температурного коэффициента действительной части КДП, определяемого как

$$K_T = \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{\epsilon'(t_2) - \epsilon'(t_1)}{\sqrt{\epsilon'(t_2) \cdot \epsilon'(t_1)}},$$

образцов, насыщенных эмульсией при соотношении дизтопливо—пластовая вода 2/1 (здесь $t_1 = 25$ °C, $t_2 = 45$ °C). Температурный коэффициент положителен, т.е. при повышении температуры действительная часть КДП на частотах ниже 1 ГГц возрастает. На частотах выше 50 МГц температурный коэффициент тем больше, чем больше в образце

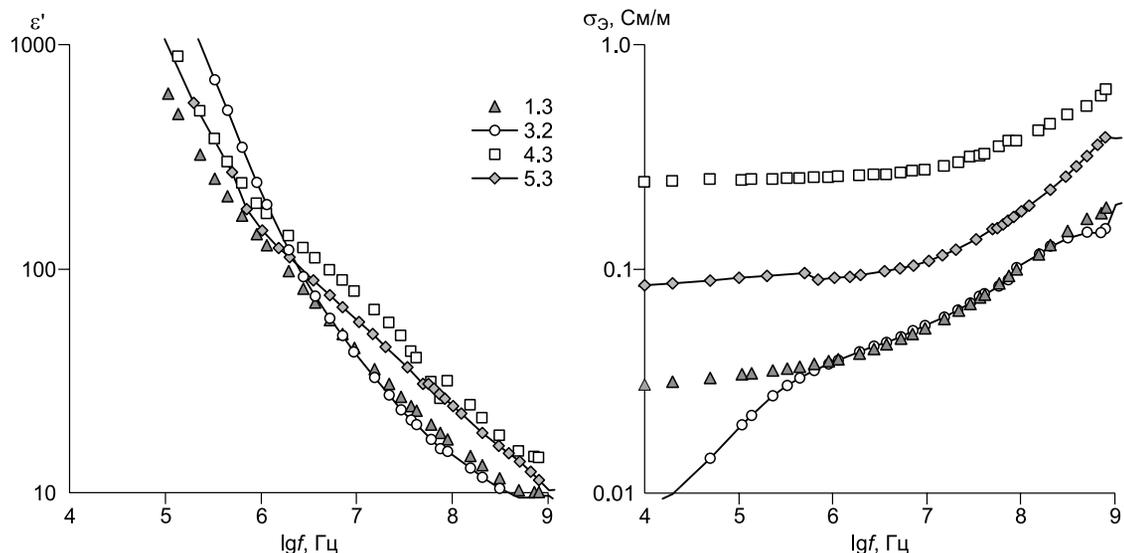


Рис. 2. Экспериментальная частотная зависимость КДП образцов, насыщенных эмульсией при соотношении дизтопливо—пластовая вода 2/1.

Здесь и далее: номера кривых соответствуют номерам образцов в табл. 1.

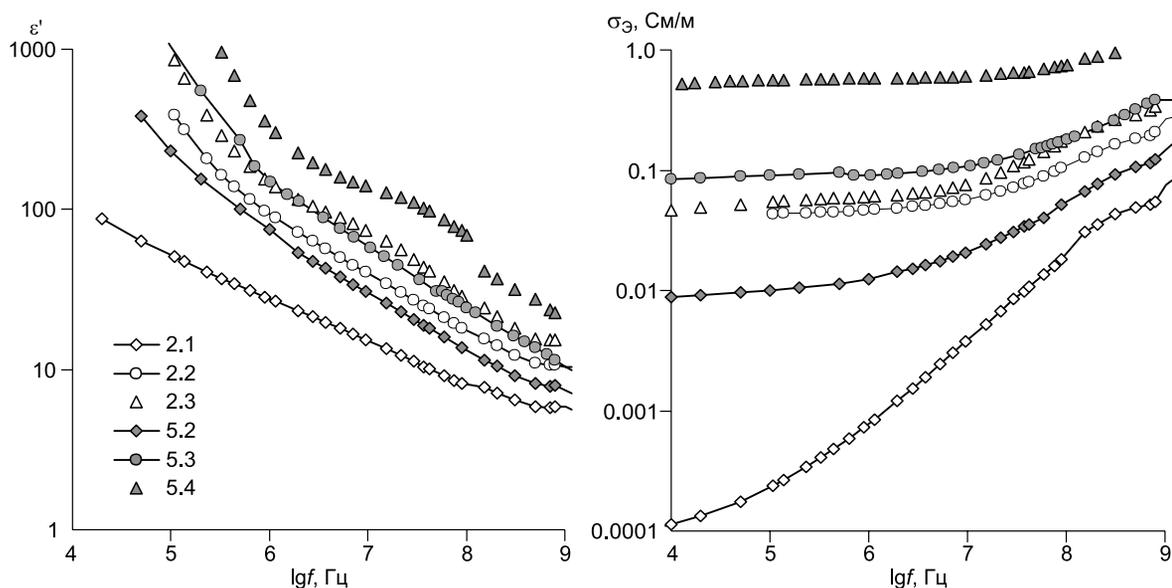


Рис. 3. Экспериментальная частотная зависимость КДП смеси песок—бентонит 50/50, насыщаемой эмульсией с концентрацией солевого раствора 4 г/л (светлые значки) и 20 г/л (темные значки).

связанной воды и выше концентрация солевого раствора, а в диапазоне частот 0.5—5.0 МГц наблюдается обратное влияние связанной воды и концентрации. Отдельные измерения показали, что на частотах выше 2—3 ГГц в образцах с невысоким содержанием связанной воды температурный коэффициент становится отрицательным. На этих частотах влияние межслойной поляризации на КДП практически отсутствует, и температурный ход КДП определяется ориентационной поляризацией молекул связанной и свободной воды.

Измерения показали, что, чем выше доля дизтоплива в насыщающем растворе, тем слабее зависимость КДП образцов от температуры, а при насыщении образцов чистым дизтопливом такая зависимость практически отсутствует.

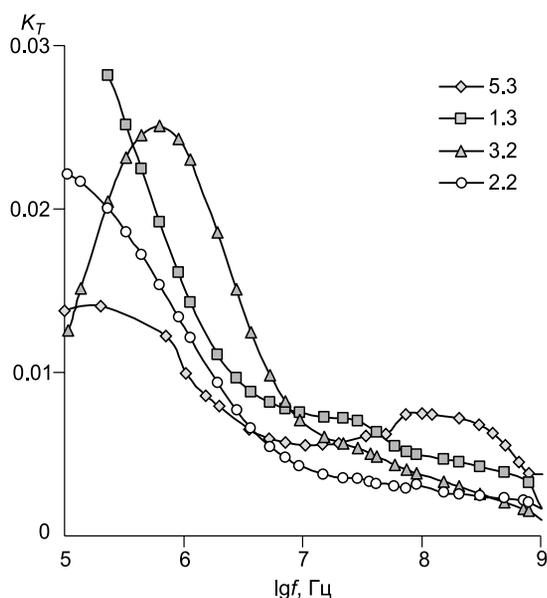


Рис. 4. Температурный коэффициент действительной части КДП образцов, насыщенных эмульсией при соотношении дизтопливо—пластовая вода 2/1.

МОДЕЛЬ КДП

Поскольку прямое сравнение КДП образцов с разными видами глины затруднительно из-за разного содержания флюида, мы провели сравнение КДП воды в разных образцах с помощью рефракционной модели [Mironov et al., 2004]. Вначале определялся комплексный показатель преломления образца $\dot{n} = n + ik = \sqrt{\epsilon' - i\epsilon''}$ как:

$$\dot{n} = \sum_p V_p \dot{n}_p, \quad (1)$$

где V_p — объемные доли компонентов, включающих минерал, дизтопливо, связанную воду, объемную воду и воздух; \dot{n}_p — комплексные показатели преломления со-

ответствующих компонентов. КДП минеральной основы принималась равной $\dot{n}_n = 4.65 - i0.1$, для дизтоплива ввиду слабой дисперсии КДП принималась одинаковой во всем диапазоне частот: $\epsilon' = 2.1$ (мнимой частью КДП дизтоплива пренебрегали). Доля объемной воды определялась как разность полной доли воды и максимально возможной доли связанной воды, если полное количество воды превышало это значение. После этого находились действительная ϵ' и мнимая ϵ'' части КДП образца, а также удельная эквивалентная проводимость σ_3 :

$$\epsilon' = \text{Re}(\dot{n})^2, \quad \epsilon'' = \text{Im}(\dot{n})^2 - i \frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0}, \quad \sigma_3 = \omega \epsilon_0 \epsilon'', \quad (2)$$

где σ_0 — параметр модели, подбираемый для согласования расчетных значений ϵ'' с экспериментальными для образцов с разным количеством и концентрацией солевого раствора, $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Значения показателей преломления связанной и объемной воды, используемые в (1), рассчитывались через диэлектрическую проницаемость, определяемую по двухрелаксационной модели (без учета ионной проводимости воды):

$$\dot{\epsilon}_b = \left(\epsilon_\infty + \frac{\epsilon_{s1} - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_1} \right) + \left(\frac{\epsilon_{s2}}{1 + (i\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} \right), \quad (3)$$

где ϵ_∞ — высокочастотная диэлектрическая проницаемость, принимаемая равной 4.9; ϵ_{s1} — статическая проницаемость в модели Дебая для ориентационной поляризации молекул связанной воды; ϵ_{s2} — интенсивность процесса релаксации, связанного с межслойной поляризацией, описываемой моделью Коула—Коула; τ_k ($k = 1, 2$) — времена релаксации соответствующих процессов; α_2 — коэффициент распределения времен релаксации в модели Коула—Коула.

Параметры модели КДП (3) подбирались путем минимизации невязки результатов расчета по модели (1), (2) с экспериментальными данными. Здесь на большем числе образцов подтвержден ранее сделанный вывод [Бобров и др., 2013а; Репин и др., 2013], о том, что во всех образцах, содержащих в качестве глинистой фракции бентонит, параметры модели (3) (кроме σ_0) являются одинаковыми. Для образца с каолином и разрушенного зерна параметры другие (табл. 2). В модели КДП образца с каолином в два раза меньше τ_1 (время релаксации ориентационной поляризации молекул), тогда как параметры второй области релаксации, описывающей межслойную поляризацию, отличаются не так сильно. В модели КДП разрушенного зерна наоборот: параметры первой области релаксации почти такие же, как в образцах с бентонитом, а параметры второй отличаются сильно. Высокое значение коэффициента распределения времен релаксации в образцах с бентонитом обусловлено, по-видимому, более широким спектром размеров частиц.

В тех случаях, когда доля воды в образце превышала максимальное количество связанной воды, избыточная часть воды описывалась диэлектрической моделью солевого раствора.

Таблица 2. Параметры релаксационной диэлектрической модели связанной воды

Образец	$t, ^\circ\text{C}$	ϵ_{S1}	$\tau_1, \text{пс}$	ϵ_{S2}	$\tau_2, \text{мкс}$	α_2
С бентонитовой глиной	25	39	21.2	$1.63 \cdot 10^4$	0.52	0.456
	45			$3.25 \cdot 10^4$	1.35	0.428
	65			$4.82 \cdot 10^4$	2.21	0.440
С каолиновой глиной	25	30	10.6	$1.91 \cdot 10^4$	0.52	0.362
	45			$3.47 \cdot 10^4$	0.79	0.310
	65			$4.30 \cdot 10^4$	1.09	0.361
Разрушенный керн	25	42	21.2	$2.61 \cdot 10^4$	0.11	0.311
	45			$4.53 \cdot 10^4$	0.31	0.347
	65			$6.39 \cdot 10^4$	0.50	0.363

Таблица 3. Параметры второй области релаксации модели объемной воды при температурах от 25° до 65 °С

Группа образцов	ϵ_{S2}			$\tau_2, \text{нс}$		
	25	45	65	25	45	65
1, 4, 5	1246	986	704	28.4	13.1	5.9
2	73.5	152	333	43.8	33.2	18.9
3	1593	1325	1220	49.7	30.3	15.4

В литературе нет достоверных данных о КДП солевого раствора в диапазоне частот 1 МГц — 1 ГГц. Найденные параметры модели Дебая для воды в зависимости от температуры и солёности основаны, как правило, на данных экспериментальных измерений, проведенных на частотах выше 1 ГГц [Stogryn, 1971; Klein et al., 1977; Somaraju et al., 2006]. Результаты, приведенные в работах [Rusiniak, 2004; Behzadi et al., 2012], нельзя считать достоверными ввиду их большого различия. Авторы этих работ не приводят сведений о погрешности, которая при измерениях КДП проводящих сред на низких частотах может быть очень высокой.

Поэтому КДП солевого раствора нами определялась по модели (3), в которой для нахождения параметров ϵ_{S1} , τ_1 и ϵ_{∞} , определяющих КДП раствора в высокочастотной части диапазона, нами использовалась работа [Stogryn, 1971], а параметры второй области релаксации ϵ_{S2} , τ_2 и α_2 определялись путем минимизации невязки между экспериментальными и расчетными значениями. Полученные значения параметров для трех значений температуры образцов приведены в табл. 3 (во всех случаях $\alpha_2 = 0$).

Меньшие значения параметра ϵ_{S2} для модели КДП воды в образцах группы 2 в сравнении с другими образцами соответствуют меньшим значениям КДП образцов из-за меньшей концентрации солевого раствора (см. рис. 3).

Параметр модели (2) σ_0 подбирался для минимизации невязки между измеренными и расчетными значениями мнимой части КДП (следовательно, и σ_j) на нижнем краю диапазона моделирования (около 1 МГц). Этот параметр не является удельной проводимостью образца на постоянном токе. Как следует из регрессионного уравнения, приведенного на рис. 5, значения σ_0 примерно пропорциональны квадрату доли воды в образце и зависят также от солёности насыщающего раствора. Высокие значения σ_0 при значительной доле воды отражают влияние еще одной (третьей) области релаксации с частотой релаксации ниже 10 кГц, которое сильнее сказывается на значениях мнимой части КДП, чем на значениях действительной части. Обратим внимание на образцы 1.4 и 5.4, которые насыщались одним и тем же флюидом. В обр. 5.4 больше доля связанной воды, поэтому сильнее влияние третьей области релаксации, описывающей межслойную поляризацию, и значение σ_0 выше, несмотря на то что общая доля воды в обр. 5.4 даже немного меньше.

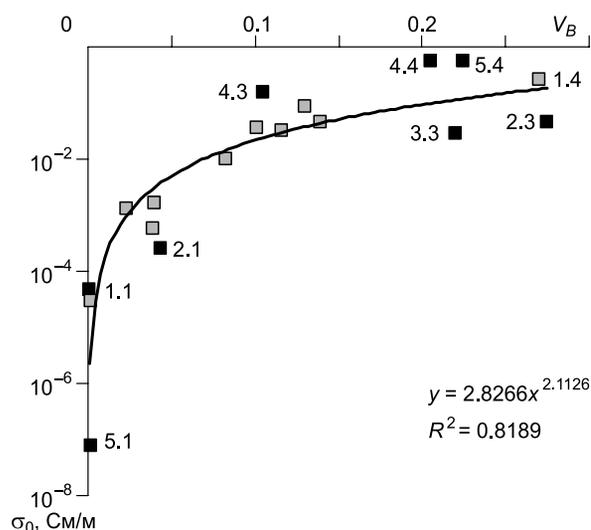


Рис. 5. Зависимость параметра модели σ_0 от доли воды в образцах.

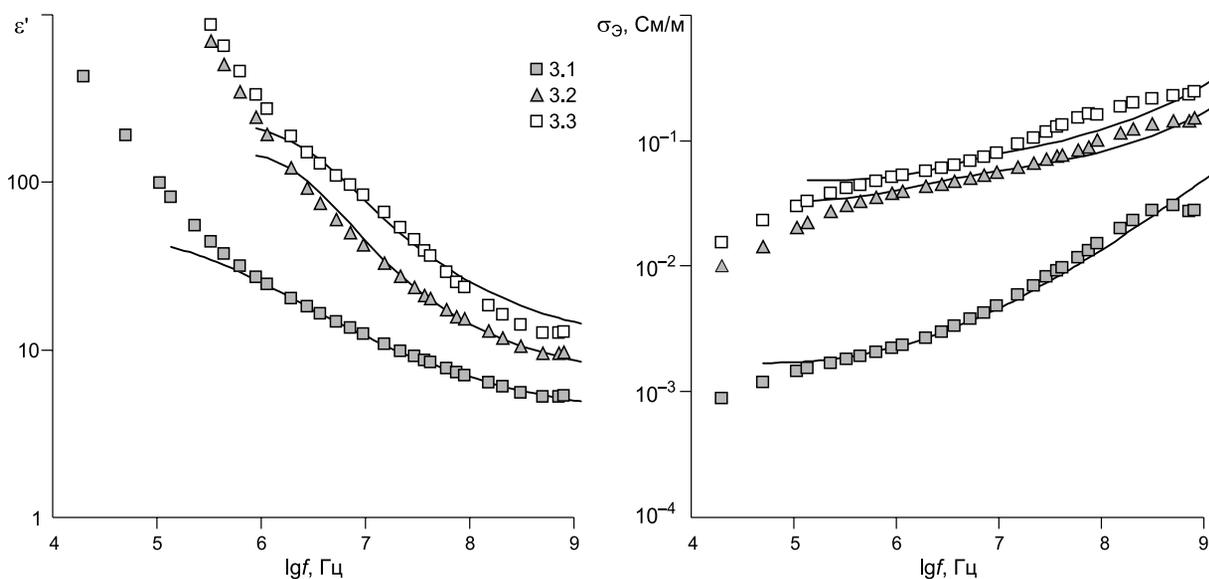


Рис. 6. Частотная зависимость КДП смеси песок—каолин 50/50, насыщенной эмульсией пластовая вода—дизтопливо. Здесь и на рис. 7, 8 значками отмечены экспериментальные данные, линиями — результаты расчетов по модели.

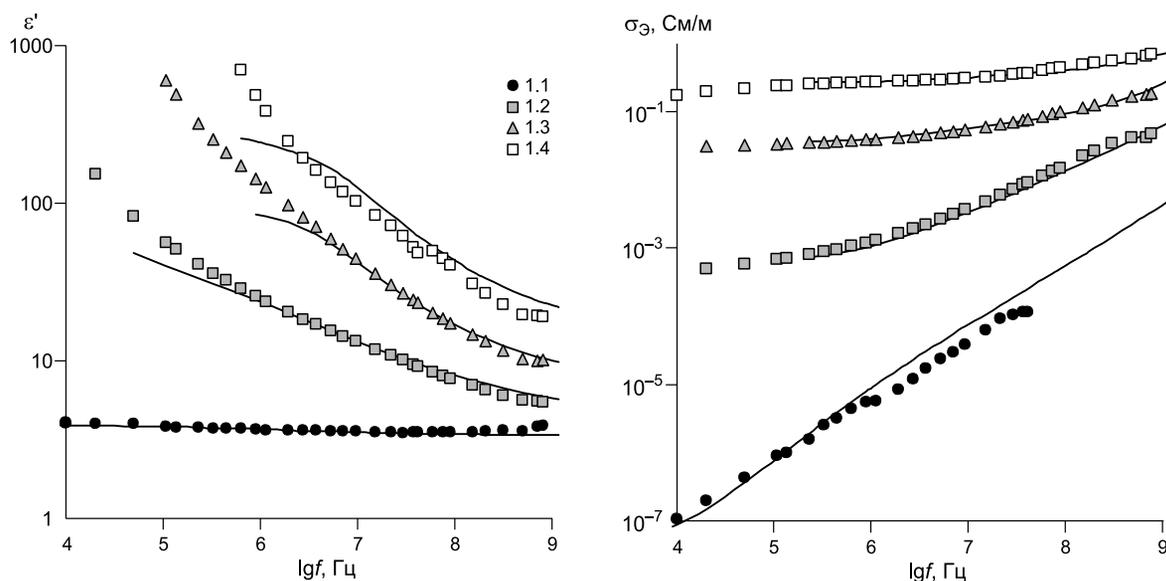


Рис. 7. Частотная зависимость КДП нефтеводонасыщенной смеси песок—бентонит в соотношении 70/30.

Как уже отмечалось в [Бобров и др., 2013а], параметры третьей области релаксации связанной воды оказываются разными для всех образцов. Если на частотах выше 1 МГц диэлектрические свойства связанной воды зависят только от вида глины, но не зависят от ее количества в образце, то на частотах ниже 1 МГц диэлектрические свойства связанной воды оказываются более сложными. Они зависят от индивидуальных характеристик образца, по-видимому, от распределения пор по размерам. Поэтому мы ограничились учетом двух областей релаксаций, позволяющим получить удовлетворительное согласие модели с экспериментом в диапазоне частот от 1 МГц до 1 ГГц.

Расхождение расчетных данных с экспериментальными при доле солевого раствора в насыщающем флюиде 33.3 % и менее не превышает 15 %. При доле раствора в 66.7 % различие составляет 20—30 %, достигая на отдельных частотах 50 %.

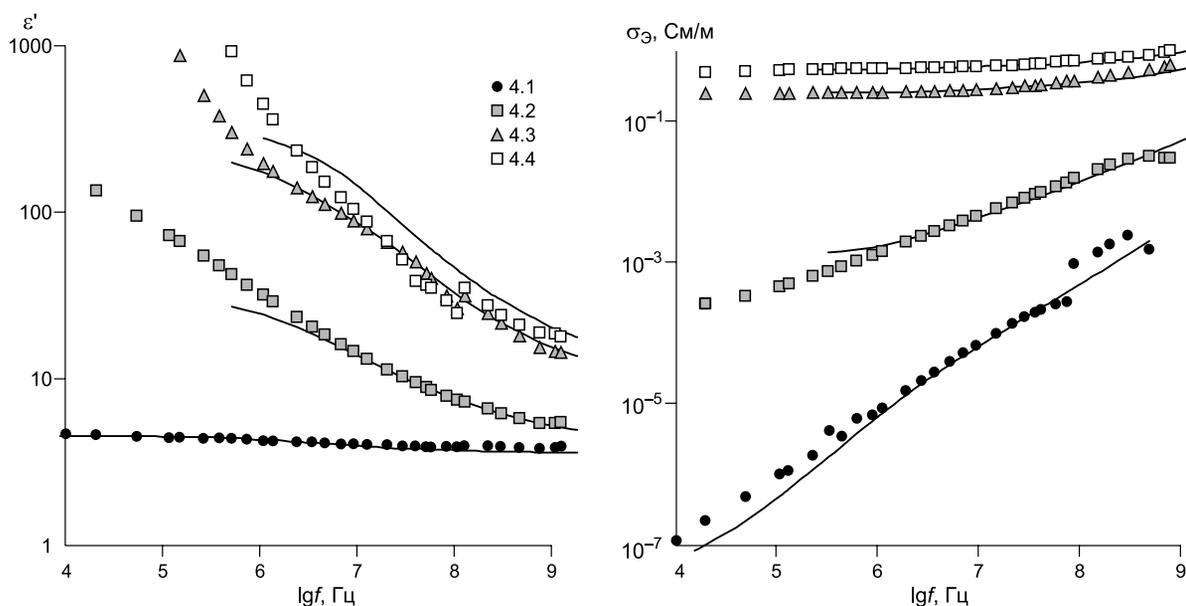


Рис. 8. Частотная зависимость КДП нефтеводонасыщенного разрушенного керна с содержанием глины около 50 %.

На рис. 6—8 представлены частотные зависимости КДП трех образцов при насыщении разными флюидами и результаты расчетов по модели. При насыщении образцов дизтопливом действительная часть КДП от частоты зависит слабо, изменяясь во всех образцах, включая образец, содержащий смесь песка с бентонитом в соотношении 50/50, в диапазоне значений 3.5—4.8. Удельная эквивалентная проводимость $\sigma_{\text{э}}$ изменяется от 10^{-7} См/м на частоте 10 кГц до 10^{-3} См/м на частоте 100 МГц.

При насыщении образцов эмульсией, в которой доля воды составляет 10 %, значения КДП в диапазоне частот 1 МГц — 1 ГГц также мало различаются у разных образцов. Действительная часть КДП изменяется от 24—26 ед. на частоте 1 МГц до 4.6—5.5 на частоте 1 ГГц. При увеличении доли воды нарастают и различия в КДП, обусловленные различиями в максимально возможной доле связанной воды, различиями минерального состава и концентрацией солевого раствора. Влияние этих различий обсуждалось выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены диэлектрические измерения нефтенасыщенных пород с разным минералогическим составом, разной водонасыщенностью и различной соленостью раствора в диапазоне частот 10 кГц — 1 ГГц. Показано, что при содержании солевого раствора в насыщающем флюиде не выше 10 % диэлектрическая проницаемость в диапазоне частот 1 МГц — 1 ГГц мало зависит от минерального состава образца и концентрации насыщающего раствора. При доле воды 33.3 % и выше увеличение концентрации солевого раствора приводит к увеличению как эквивалентной удельной проводимости, так и действительной части КДП. При возрастании температуры образцов, содержащих воду, действительная и мнимая части КДП возрастают во всем исследованном диапазоне частот. Температурный коэффициент действительной части КДП образцов тем выше, чем больше воды в насыщающем флюиде и практически равен нулю при насыщении образцов чистым дизтопливом.

Найдены параметры рефракционной модели образцов, в которой вода представлена в двух формах: связанной и объемной. Показано, что параметры релаксационной модели связанной воды в диапазоне частот 1 МГц — 1 ГГц зависят от температуры и вида глины, но не зависят от водонасыщенности и количества глины в образце.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 12-05-00502а, 14-05-00151а).

ЛИТЕРАТУРА

Аксельрод С.М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // НТВ «Каротажник». Тверь, Изд-во АИС, 2012, вып. 4, с. 78—112.

Бобров П.П., Кондратьева О.В., Репин А.В. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости образца в одной ячейке от десятков герц до единиц гигагерц // Изв. вузов. Физика, 2012, № 8/3, с. 23—26.

Бобров П.П., Лапина А.С., Репин А.В. Влияние связанной воды на комплексную диэлектрическую проницаемость нефте-водонасыщенных песчано-глинистых пород // НТВ «Каротажник». Тверь, Изд-во АИС, 2013а, № 8 (Вып. 230), с. 56—68.

Бобров П.П., Лапина А.С., Репин А.В. Диэлектрическая релаксация в частично насыщенных водой и соевым раствором песчаных породах и гистерезис диэлектрической проницаемости // Малышевские чтения: материалы Всероссийской научной конференции. (Старый Оскол, 24 апреля 2013 г.) 2013б, т. 2. с. 58—62.

Ельцов Т.Н., Доровский В.Н., Гапеев Д.Н. Низкочастотные диэлектрические спектры пород, насыщенных водонефтяной смесью // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (8), с. 1270—1281.

Мионов В.Л., Бобров П.П., Фомин С.В., Каравайский А.Ю. Обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв, учитывающая ионную релаксацию почвенной воды // Изв. вузов. Физика, 2013, т. 56, № 3, с. 75—79.

Репин А.В., Бобров П.П. Влияние гранулометрического состава и солёности насыщающего раствора на диэлектрическую проницаемость нефтеводонасыщенных пород // Трофимукские чтения-2013: материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. Новосибирск, 2013, с. 313—316.

Эпов М.И., Мионов В.Л., Комаров С.А., Музалевский К.В. Электромагнитное зондирование флюидонасыщенного слоистого коллектора наносекундными импульсами // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (12), с. 1357—1365.

Эпов М.И., Мионов В.Л., Бобров П.П., Савин И.В., Репин А.В. Исследование диэлектрической проницаемости нефтесодержащих пород в диапазоне частот 0.05—16 ГГц // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (5), с. 613—618.

Эпов М.И., Бобров П.П., Мионов В.Л., Репин А.В. Диэлектрическая релаксация в глинистых нефтесодержащих породах // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (9), с. 1302—1309.

Эпов М.И., Савин И.В., Мионов В.Л. Диэлектрическая температурная модель влажных нефтесодержащих пород в диапазоне частот от 0.5 до 15 ГГц // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (7), с. 912—919.

Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Неведрова Н.Н., Оленченко В.В., Поспеева Е.В., Напреев Д.В., Санчаа А.М., Потапов В.В., Плотников А.Е. Комплекс электромагнитных и геохимических методов для нефтепоисковых исследований в Западной Сибири // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 962—977.

Behzadi G., Fekri L. Electrical parameter and permittivity measurement of water samples using the capacitive sensor // Int. J. Water Res. Arid Environ., 2012, v. 2, № 1, p. 36—45.

Bobrov P.P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband frequency domain method of soil dielectric properties measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2015, v. 53, № 5, p. 2366—2372.

Klein L.A., Swift C.T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE J. Oceanic Eng., 1977, v. OE-2, p. 104—111.

Lasne Y., Paillou Ph., Ruffié G., Serradilla C., Demontoux F., Freeman A., Farr T., McDonald K., Chapman B. Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials: implication for soil moisture detection by means of remote sensing // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2008, v. 46, № 6, p. 1674—1688.

Mironov V.L., Dobson M.C., Kaupp V.H., Komarov S.A., Kleshchenko V.N. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 2004, v. 42, № 4, p. 773—785.

Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils // IEEE Geosci. Remote Sens. Letters, 2013, v. 10, № 3, p. 603—606.

Rusiniak L. Electric properties of water. New experimental data in the 5 Hz — 13 MHz frequency range // Acta Geophy. Polon., 2004, v. 52, № 1, p. 63—76.

Stogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of saline water // IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 1971, v. 19, p. 733—736.

Somaraju R., Trumpp J. Frequency, temperature and salinity variation of the permittivity of seawater // IEEE Trans. Antennas Propagation, 2006, v. 54, № 11, p. 3441—3448.