

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ГЛИНИСТЫХ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ПОРОДАХ

М.И. Эпов¹, П.П. Бобров², В.Л. Миронов^{3,4}, А.В. Репин²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптога, 3, Россия

² Омский государственный педагогический университет, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14, Россия

³ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38, Россия

⁴ Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнева, 660014, Красноярск, просп. Красноярский Рабочий, 31, Россия

Экспериментально изучены диэлектрические свойства смесей бентонит—нефть—солевой раствор с различной водо- и нефтенасыщенностью в диапазоне частот от 10 кГц до 4 ГГц при температурах 25—60°C. Установлено, что в этом диапазоне частот кроме области дебаевской релаксации воды существуют еще две области релаксации, обусловленные межповерхностным взаимодействием компонентов смеси. Для описания диэлектрической проницаемости и эквивалентной проводимости смесей предложена спектроскопическая модель, учитывающая многочастотную релаксацию. Найдена зависимость параметров модели от водонасыщенности и температуры образцов. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами модельных расчетов и оценена погрешность прогнозирования диэлектрической проницаемости и проводимости смесей с помощью предложенной модели.

Нефтеносные образования, глинистые породы, диэлектрическая проницаемость, многочастотная релаксация.

DIELECTRIC RELAXATION IN OIL-BEARING CLAYEY ROCKS

M.I. Epov, P.P. Bobrov, V.L. Mironov, and A.V. Repin

The dielectric properties of the bentonite–oil–salt solution mixtures with different water and oil saturation were experimentally studied in the frequency range of 10 kHz to 4 GHz at 25–60°C. It has been established that besides the region of the Debye water relaxation, there are two more relaxation regions resulting from the interfacial interaction of the mixture components in this frequency range. To describe the dielectric permittivity and equivalent conductivity of the mixture, a spectroscopic model taking into account the multifrequency relaxation is proposed. The dependence of the model parameters on the water saturation and temperatures of the samples has been determined. The experimental data are compared with the modeling results, and the error of prediction for the dielectric permittivity and conductivity of mixture is estimated using the proposed model.

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

ВВЕДЕНИЕ

В статье [Эпов и др., 2009] приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости и проводимости смесей песок—нефть—солевой раствор и бентонит—нефть—солевой раствор в диапазоне частот 0.05—16 ГГц при температуре 22 °С. Показано, что предложенная в работах [Mironov et al., 2004; Миронов и др., 2007] обобщенная рефракционная диэлектрическая модель смеси (ОРДМС) хорошо описывает спектры в диапазоне частот 0.05—16 ГГц для диэлектрической проницаемости и эквивалентной проводимости смесей, составленных на основе песка, и дает значительное расхождение с экспериментальными данными для смесей на основе бентонитовой глины для тех же частот. При этом относительная ошибка прогнозирования диэлектрической проницаемости возрастает до 120 % при уменьшении частоты до 0.05 ГГц. Между тем в настоящее время в практике электромагнитного каротажа скважин широко используются приборы [Технология..., 2000; Эпов, Глинских, 2005], работающие в нижнем мегагерцовом диапазоне частот (от 1 до 12). Данные приборы зондируют зону проникновения глинистого бурового раствора, в которой содержится значительная доля глинистой фракции. В этой связи для целей теоретического моделирования процессов электромагнитного каротажа и инверсии проводимости в зоне проникновения [Технология..., 2000] необходимо располагать спектроскопическими моделями водо- и нефтенасыщенных горных пород, содержащих глинистую фракцию.

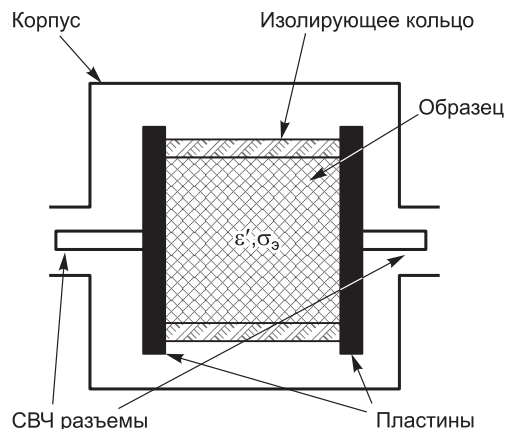
Ниже приведены результаты экспериментальных исследований диэлектрической проницаемости и эквивалентной проводимости нефте- и водосодержащих смесей на основе бентонитовой глины в диа-

Рис. 1. Измерительный конденсатор.

ε' — действительная часть КДП, σ_3 — эквивалентная удельная проводимость.

пазоне частот от 10 кГц до 4 ГГц. Предложена модель диэлектрической проницаемости, удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными.

В статье обоснована методика измерений с помощью конденсаторной измерительной ячейки и дана оценка погрешностей; проведен анализ экспериментальных спектров при различных долях содержания водного солевого раствора и нефти для температур 25 и 60°C; при моделировании спектров использована формула многочастотной диэлектрической релаксации [Ахадов, 1972] флюидов, содержащихся в зоне проникновения бурового раствора в скважину.



МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения комплексной относительной диэлектрической проницаемости (КДП) образцов в диапазоне частот 50 кГц — 4 ГГц производились с помощью векторного анализатора цепей ZVRE фирмы Rohde-Schwarz. Для измерений в верхней части диапазона (500 кГц — 4 ГГц) образец помещался в коаксиальную ячейку и определялся комплексный коэффициент передачи (параметр матрицы рассеяния S_{12}). Расчет КДП производился по методике, описанной М.И. Эповым с соавторами [2009]. Для измерения в нижней части частотного диапазона образец помещался в конденсаторную ячейку, включающую в разрыв центрального проводника коаксиальной линии (рис. 1). Эквивалентная схема подключения измерительного конденсатора к ZVRE показана на рис. 2, А. Емкости пластин относительно корпуса учитываются конденсаторами C_1 и C_2 , а отрезки коаксиальной линии от разъемов до пластин — индуктивностями L_1 и L_2 , R_0 — волновое сопротивление входов измерителя (50 Ом), E_g — ЭДС генератора. Через Z_{AB} обозначен эквивалентный импеданс внутренней части конденсатора. Его эквивалентная схема показана на рис. 2, Б, где C_0 — емкость рабочей части конденсатора (содержащей образец), а диэлектрические потери представлены эквивалентной проводимостью G . Емкость C_k равна сумме краевой емкости и емкости изолирующего кольца.

Эквивалентный комплексный импеданс Z_{AB} вычисляется по формуле

$$Z_{AB} = \frac{1}{G_{AB}}, \quad (1)$$

где $G_{AB} = j\omega C_0 + j\omega C_k + G$ (j — мнимая единица, ω — круговая частота).

Параметры паразитных элементов C_1 , L_1 , C_2 , L_2 и C_k можно определить, помещая между пластинами конденсатора твердые диэлектрики с известной диэлектрической проницаемостью и измеряя частотные зависимости комплексного коэффициента передачи и коэффициента отражения.

Эквивалентный импеданс Z_{AB} измерительного конденсатора, содержащего исследуемый образец, можно определить экспериментально либо через комплексные коэффициенты отражения (S_{11} или S_{22}), либо через комплексные коэффициенты передачи S_{12} или S_{21} .

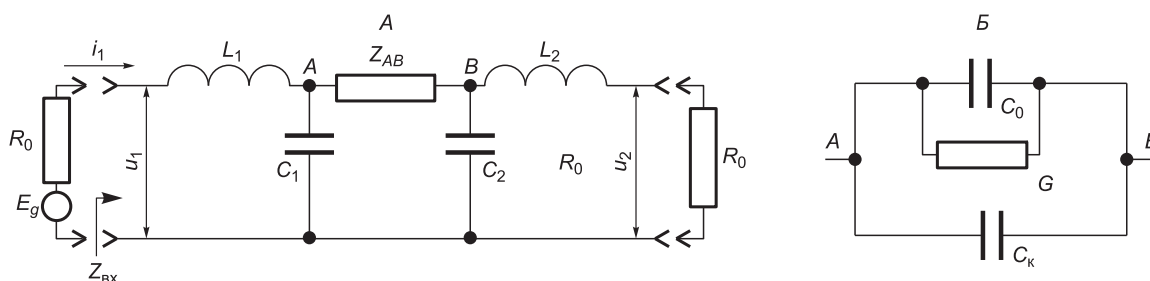


Рис. 2. Эквивалентная схема подключения измерительного конденсатора к входам ZVRE (А) и схема его внутренней части (Б).

Коэффициент отражения равен: $S_{11} = \frac{Z_{\text{вх}} - R_0}{Z_{\text{вх}} + R_0}$, откуда

$$Z_{\text{вх}} = R_0 \left(\frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \right), \quad (2)$$

где $Z_{\text{вх}}$ — комплексный входной импеданс цепи, подключенной ко входу измерителя (см. рис. 2). Его можно выразить цепной дробью

$$Z_{\text{вх}} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{Z_{AB} + \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{Z_{OK}}}}}, \quad (3)$$

в которой значение выходного импеданса Z_{OK} зависит от величины нагрузки, подключаемой к правому разъему: $Z_{OK} = \infty$ при режиме холостого хода, $Z_{OK} = j\omega L_2$ при режиме короткого замыкания и $Z_{OK} = j\omega L_2 + R_0$ при подключении согласованной нагрузки. Выразив из (3) Z_{AB} , получаем:

$$Z_{AB} = \frac{(j\omega L_1 - Z_{\text{вх}})(j\omega C_1 Z_C + 1) + Z_C}{j\omega C_1 Z_{\text{вх}} - \omega^2 L_1 C_1 - 1}, \quad (4)$$

где

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{Z_{OK}}}.$$

Подставив в (4) значение входного импеданса (2), найденное путем измерения параметра S_{11} , найдем экспериментальное значение Z_{AB} , а затем, используя (1), найдем емкость и проводимость конденсатора с образцом.

Из соотношений $C_0 = \epsilon' \frac{\epsilon_0 \pi R^2}{d}$, $G = \sigma_s \frac{\pi R^2}{d}$, где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, R — радиус рабочей части пластин конденсатора (внутри изоляционного кольца), нетрудно найти действительную часть КДП ϵ' и эквивалентную удельную проводимость $\sigma_s = \omega \epsilon'' \epsilon_0$, где ϵ'' — мнимая часть КДП.

Найдем формулы для определения электрических параметров образца путем измерения S_{12} . Комплексный коэффициент передачи равен [Магтей и др., 1971] $S_{12} = 2 \frac{u_2}{E_g} = 2 \frac{u_2}{u_1 + i_1 R_0}$ (см. рис. 2, А). Используя правило узловых токов Кирхгофа, найдем выражение для комплексного импеданса Z_{AB} :

$$Z_{AB} = \frac{2R_0}{k^2 S_{12}} - \frac{2Z_{OK}}{k}, \quad (5)$$

где $k = 1 + j\omega C Z_{OK}$.

Поскольку при измерении S_{12} правая часть схемы (см. рис. 2, А) присоединяется ко второму входу анализатора цепей, выходной импеданс может принимать только одно значение $Z_{OK} = j\omega L + R_0$. Формула (5) получена в предположении, что схема (см. рис. 2) является симметричной и $L_1 = L_2 = L$ и $C_1 = C_2 = C$. Измерения показали, что в такой структуре, когда конденсатор включен в разрыв центрального проводника коаксиальной линии, вследствие наличия близкорасположенного наружного проводника коаксиальной линии, краевая емкость между пластинами конденсатора мала и ею можно пренебречь.

Действительная часть КДП ϵ' и эквивалентная удельная проводимость σ_s находятся также с помощью выражения (1).

Измерения импеданса этой же конденсаторной ячейки в диапазоне частот 10 кГц — 1 МГц производились с помощью LCR-измерителя Е7-20 по трехзажимной схеме. При этом к измерительному прибору непосредственно подключались выводы измерительного конденсатора (центральные проводники СВЧ разъемов), а корпус конденсатора, служащий экраном, подключался к корпусному выводу прибора Е7-20. В этом случае эквивалентная схема ячейки упрощается, так как емкости C_1 и C_2 подключены к экрану и на результат измерения не влияют. Измеряемый импеданс равен $Z = Z_{AB} + j\omega L$, где L — паразитная индуктивность выводов.

Измерения показали, что значения, получаемые в конденсаторной ячейке с помощью двух приборов (ZVRE и E7-20) в перекрывающейся частотной области 300 кГц — 1 МГц, а также с помощью ZVRE в конденсаторной и коаксиальной ячейках в перекрывающейся частотной области 30—80 МГц, отличаются друг от друга на величину, не превышающую погрешности измерений.

Погрешность определялась следующим образом. Экспериментально полученные значения модуля и фазы коэффициента передачи, а также измеренные размеры ячеек последовательно изменялись на величину паспортной погрешности. По этим новым измеренным величинам каждый раз вычислялось отклонение ϵ' и σ_3 . Полная погрешность определялась как корень квадратный из суммы квадратов отклонений, вызываемых изменением каждой из измеряемых величин в отдельности.

Погрешность измерений зависит от частоты, емкости и проводимости конденсатора, заполненного образцом. Для данных образцов расчетная погрешность определения с помощью ZVRE увеличивалась от 3 % на высокочастотном краю диапазона до 6 % на частоте 5 МГц. Для образца с большой водонасыщенностью (66.7 %) из-за высокой проводимости погрешность на частотах 1—50 МГц возрастала до 25—30 %. Погрешность определения ϵ' с помощью E7-20 составляла 1 %, возрастая на частотах выше 100 кГц до 3 %. Погрешность измерения удельной эквивалентной проводимости с помощью E7-20 не превышала 1 %, а с помощью ZVRE — 5 % за исключением частотного диапазона 1—50 МГц, где она изменялась от 10 до 40 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подготовка образцов осуществлялась следующим образом. Сначала делалась навеска заданной массы бентонита, просушенного в течение суток при температуре 105 °С. Затем по известной плотности сухого сложения, равной 2.3 г/см³, вычислялся объем бентонита. Далее отмеряли нужные объемы жидкостей (нефти и солевого раствора). После этого в бентонит последовательно добавляли нефть и солевой раствор. Смесь тщательно перемешивали до образования однородной массы. Перед помещением образца в измерительную ячейку он выдерживался в герметичной посуде в течение 4—5 ч. Постоянство плотности образца контролировалось взвешиванием заполненной ячейки.

На рис. 3, *A* приведены результаты измерений диэлектрической проницаемости и эквивалентной удельной проводимости образца с объемным содержанием компонентов смеси: бентонит — 85 %, нефть — 9 %, солевой раствор с концентрацией 17 г/л — 6 %. Эти результаты хорошо стыкуются в перекрывающихся частотных диапазонах, в том числе и с результатами измерений, произведенных с помощью векторного измерителя ZVK в диапазоне частот 10 МГц — 16 ГГц и опубликованных в [Эпов и др., 2009].

Наблюдается значительное возрастание ϵ' на частотах менее 1 ГГц. Это увеличение характерно для влажных смесей, содержащих мелкие глинистые частицы [Нирр, 1974]. Изменяющиеся наклоны частотной зависимости ϵ' свидетельствуют о наличии нескольких частот релаксации. При возрастании температуры на частотах выше 1 ГГц ϵ' и эквивалентная удельная проводимость σ_3 уменьшаются, а на частотах менее 1 ГГц наблюдается возрастание ϵ' и σ_3 .

На рис. 3, *B, B* приведены частотные зависимости ϵ' и σ_3 для смесей, содержащих 80 % бентонита и 20 % флюида, содержащего нефть и солевой раствор концентрацией 17 г/л при различных значениях водонасыщенности (объемной доли солевого раствора во флюиде, содержащемся в образце).

Измерения производились при температурах 25, 35, 45 и 60 °С, но данные приведены лишь для крайних значений температуры. На этих же рисунках приведены результаты расчетов по модели, описанной в следующем разделе. Значения ϵ' и σ_3 при промежуточных температурах находятся между значениями, соответствующими этим крайним значениям температуры.

Из сравнения данных (см. рис. 3, *B, B*) следует, что температурные зависимости ϵ' наиболее сильно выражены при водонасыщенности 33.3 %.

Тангенс угла диэлектрических потерь при водонасыщенности 10 % имеет максимум на частоте около 10 кГц. При повышении водонасыщенности тангенс угла потерь возрастает, а частота максимума сдвигается вверх до 0.5—1 МГц. При возрастании температуры частота максимума практически не изменяется.

Диэлектрическая проницаемость наиболее резко возрастает при увеличении водонасыщенности от 10 до 30 % (рис. 4) и на низких частотах.

В известной нам литературе отсутствуют данные диэлектрических измерений нефтенасыщенных глинистых пород. В работе [Levitskaya, Sternberg, 1996] показаны результаты измерения КДП нефтенасыщенного песчаника с пористостью 7.61 %. Значения ϵ' практически совпадают с нашими данными для нулевой водонасыщенности в диапазоне частот 10—100 МГц. При уменьшении частоты различия резко нарастают, и уже на частоте 1 МГц значения ϵ' , приведенные в этой статье, в три раза превышают полученные нами значения.

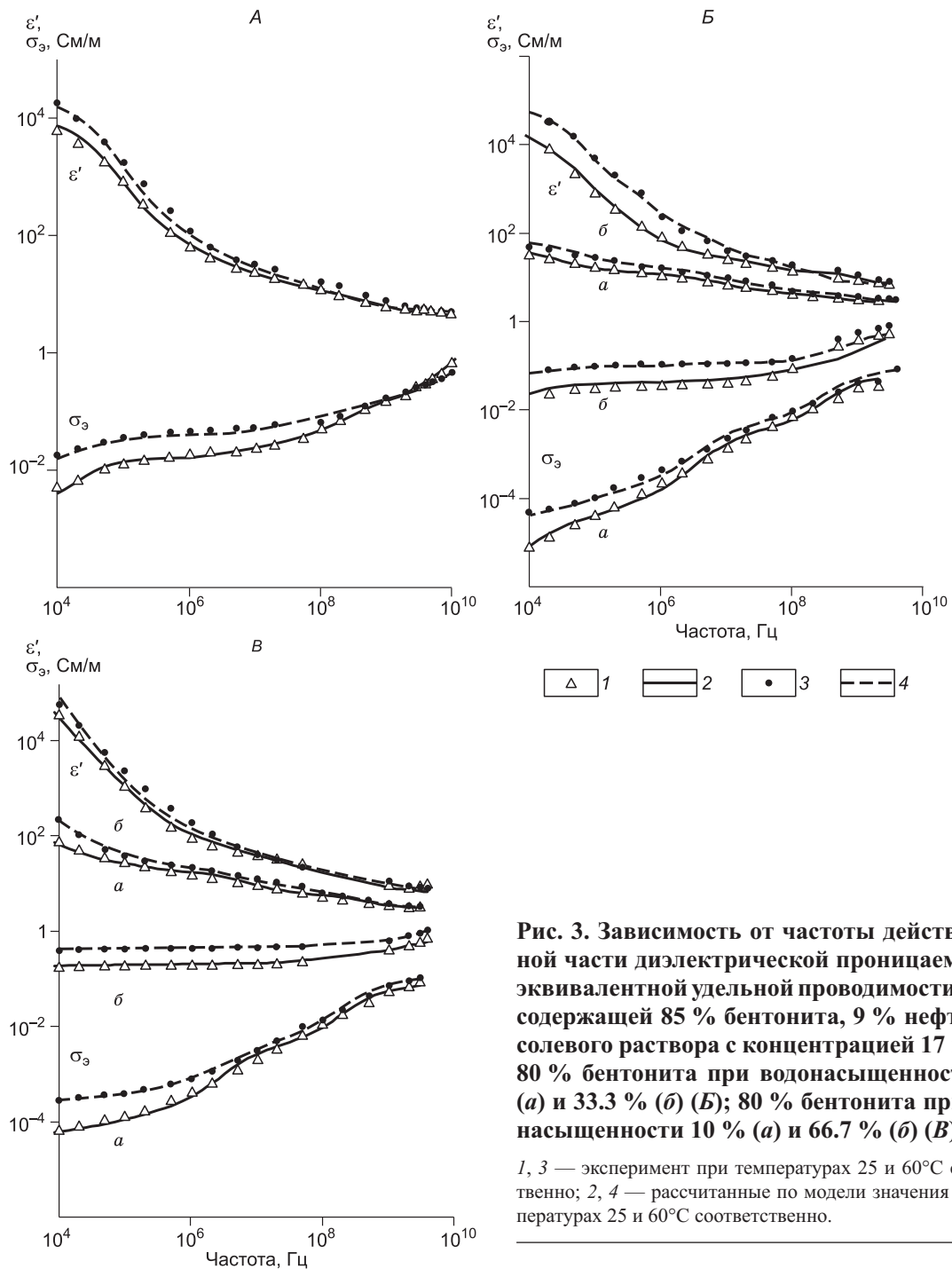


Рис. 3. Зависимость от частоты действительной части диэлектрической проницаемости и эквивалентной удельной проводимости смеси, содержащей 85 % бентонита, 9 % нефти, 6 % солевого раствора с концентрацией 17 г/л (А); 80 % бентонита при водонасыщенности 0 % (а) и 33.3 % (б) (В); 80 % бентонита при водонасыщенности 10 % (а) и 66.7 % (б) (В).

1, 3 — эксперимент при температурах 25 и 60°C соответственно; 2, 4 — рассчитанные по модели значения при температурах 25 и 60°C соответственно.

А.Д. Талалов, Д.С. Даев [1996] привели данные о КДП водонасыщенных образцов песка, суглинков с разной глинистостью и глины. Результаты, полученные для суглинка с наибольшим содержанием глины, в диапазоне частот 1—100 МГц совпадают с данными наших измерений образцов с минимальным содержанием нефти (водонасыщенность 66.7 %). Это вполне объяснимо, так как уменьшение доли глины в образце приводит к уменьшению значений ϵ' в этом диапазоне частот так же, как и увеличение доли нефти. Отметим, что в этих, как и во многих других работах, посвященных диэлектрическим измерениям, данные о погрешности измерений отсутствуют.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕЙ

Комплексная диэлектрическая проницаемость гетерогенной смеси $\dot{\epsilon}_m$ может описываться формулой, впервые предложенной в [Birchak et al., 1974]. Эта модель называется рефракционной, так как в ней складываются относительные доли компонентов, умноженные на их показатели преломления ($n = \sqrt{\epsilon}$):

$$\sqrt{\dot{\epsilon}_m} = \sum_p V_p \sqrt{\dot{\epsilon}_p}, \quad (6)$$

где V_p — объемная доля p -го компонента смеси, $\dot{\epsilon}_p$ — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость (КДП) p -го компонента. Смесь в рассматриваемом случае включает бентонит, воздух, нефть и солевой раствор. КДП бентонита и воздуха не зависит от частоты, а частотные зависимости КДП как нефти, так и солевого раствора могут быть найдены по обобщенной на случай проводящих жидкостей релаксационной модели Дебая [Ахадов, 1972]:

$$\dot{\epsilon}_p = \epsilon_{\infty p} + \frac{\epsilon_{Sp} - \epsilon_{\infty p}}{1 + j\omega\tau_p} + j \frac{\sigma_p}{\omega\epsilon_0}.$$

Здесь $\dot{\epsilon}_p$ — комплексная диэлектрическая проницаемость нефти или солевого раствора, ϵ_{Sp} , $\epsilon_{\infty p}$, τ_p , σ_p — параметры модели Дебая (статическая и высокочастотная диэлектрические константы, время релаксации и проводимость соответственно). Эти параметры были найдены в работе [Эпов и др., 2009]. Там же показано, что измеренные значения действительной части КДП смеси на основе бентонита заметно выше рассчитываемых по модели, особенно в низкочастотной части диапазона.

Возрастание измеренной диэлектрической проницаемости на низких частотах, а также вид частотной зависимости ϵ' и σ (см. рис. 3) свидетельствуют о наличии двух дополнительных релаксационных процессов, обусловленных межслойной поляризацией, с перекрывающимися частотными областями их проявления. Можно предположить [Ахадов, 1972], что КДП смеси складывается из КДП, соответствующих каждому низкочастотному релаксационному процессу, и КДП гетерогенной смеси, которая хорошо описывается формулой (6).

Описание низкочастотных процессов релаксации производилось нами по эмпирической формуле Коула—Коула, учитывающей распределение времен релаксации [Ахадов, 1972]:

$$\dot{\epsilon}_i = \epsilon_{\infty i} + \frac{\Delta\epsilon_{Si}}{1 + (j\omega\tau_i)^{\beta_i}}, \quad (7)$$

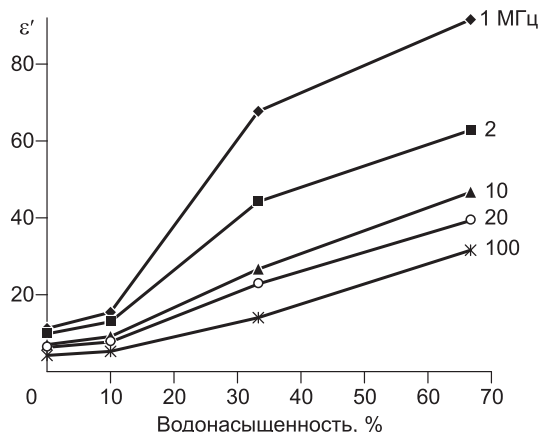
где β_i — коэффициенты распределения времен релаксации, $0 \leq \beta \leq 1$; индексом i ($i = 1, 2$) обозначены параметры модели, описывающие отдельные процессы релаксации. На частотах выше 4 ГГц низкочастотная релаксация практически не проявляется, поэтому в качестве высокочастотной диэлектрической константы принималась диэлектрическая проницаемость, определяемая по формуле (6).

Таким образом, итоговая формула для расчета КДП смеси имеет вид:

$$\dot{\epsilon} = \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\Delta\epsilon_{Si}}{1 + (j\omega\tau_i)^{\beta_i}} \right) + \left(\sum_p V_p \sqrt{\epsilon_p} \right)^2 + j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}, \quad (8)$$

в которой суммируются два члена, описывающие низкочастотную релаксацию (параметры, описывающие эти области, обозначены индексом i), и КДП смеси, определяемая по формуле (6), параметры которой были взяты из работы [Эпов и др., 2009]. Объемные доли компонент смеси рассчитывались с учетом содержания воздуха в образце. При этом ионная проводимость нефти и солевого раствора при определении КДП по формуле (6) не учитывалась, а ионная проводимость образца в целом описывалась третьим членом в (8), где σ представляет удельную ионную проводимость образца.

Рис. 4. Зависимость действительной части диэлектрической проницаемости от водонасыщенности при температуре 25°C на разных частотах.



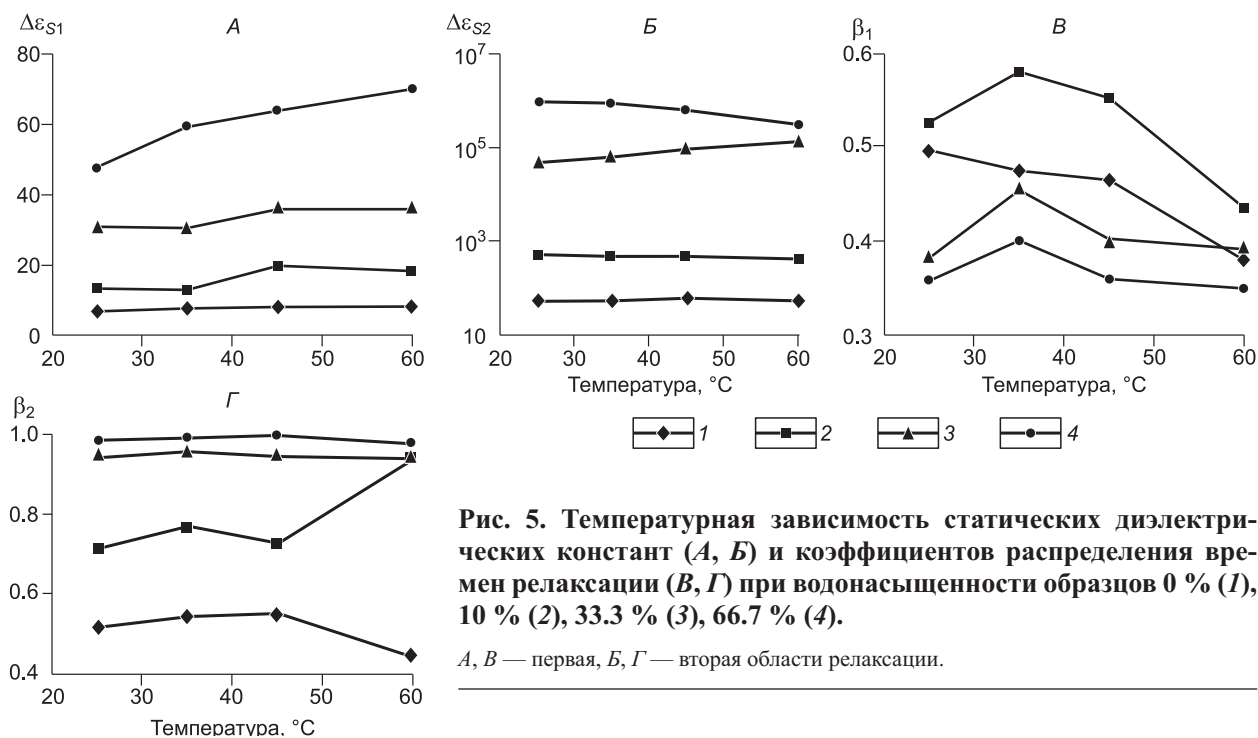


Рис. 5. Температурная зависимость статических диэлектрических констант (А, Б) и коэффициентов распределения времен релаксации (В, Г) при водонасыщенности образцов 0 % (1), 10 % (2), 33.3 % (3), 66.7 % (4).

А, В — первая, Б, Г — вторая области релаксации.

Константы формулы Коула—Коула подбирались путем минимизации невязки с экспериментальными данными вначале методом наименьших квадратов и окончательно минимаксным методом. Задача минимизации решалась многократно при различающихся начальных значениях параметров. После определения параметров модели смеси для разных значений температуры составлялись регрессионные уравнения зависимости параметров модели от температуры, затем вновь решалась задача минимизации невязки с начальными значениями параметров, найденными из регрессионных уравнений. За счет этого удавалось снизить отклонение расчетных данных от экспериментальных, которое составило в среднем по ϵ' 10—12 % и 5—8 % по σ_s . Максимальные отклонения по ϵ' наблюдались у образца с водонасыщенностью 66.7 % и достигали в отдельных точках 20—22 %.

Найденное значение времени релаксации в первой (начиная с верхних частот) области релаксации составило $(1—3) \cdot 10^{-8}$ с. Время релаксации возрастает в 1.5—2 раза при повышении температуры от 25 до 60°C и примерно в 1.5 раза при увеличении водонасыщенности от 0 до 66.7 %. Вторая область релаксации характеризуется временем релаксации $10^{-4}—10^{-5}$ с. При возрастании температуры от 25 до 60°C время релаксации уменьшается в 1.5—2 раза и увеличивается в 3—4 раза при увеличении водонасыщенности в тех же пределах.

Значения параметров модели ϵ_{si} и β_i приведены на рис. 5. Статические диэлектрические константы образцов с разной водонасыщенностью в первой области релаксации возрастают с температурой примерно в 1.5 раза (см. рис. 5, А), а во второй области возрастают для всех образцов, кроме образца с высокой водонасыщенностью (см. рис. 5, Б). Коэффициенты распределения времен релаксации в первой области имеют значения от 0.3 до 0.6 (см. рис. 5, В), во второй области — от 0.4 до 1 (см. рис. 5, Г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы в диапазоне частот 10 кГц — 4 ГГц при температурах 25—60°C были получены экспериментальные спектры диэлектрической проницаемости и проводимости глинистых пород с пористостью 20 %, насыщенных нефтью и соевым раствором в разных пропорциях.

Создана модель комплексной диэлектрической проницаемости, учитывающая процессы низкочастотной релаксации. Найдены параметры модели, позволяющие получить удовлетворительное согласование с экспериментом во всей частотной области и их зависимость от температуры и водонасыщенности. Оценена погрешность прогнозирования диэлектрической проницаемости и проводимости смесей с помощью предложенной модели.

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 2.5.1.1 «Диэлектрическая спектроскопия природных сред в радиоволновом диапазоне частот» и междисциплинарного проекта № 6 СО РАН «Теоретические основы принципиально новой технологии зондирования в нефтегазовых скважинах с использованием субнаносекундных электромагнитных импульсов».

ЛИТЕРАТУРА

- Ахадов Я.Ю.** Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М., Изд-во стандартов, 1972, 412 с.
- Комаров С.А., Миронов В.Л.** Микроволновое зондирование почв. Новосибирск, Наука, 2000, 350 с.
- Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.** Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М., Связь, 1971, 440 с.
- Миронов В.Л., Косолапова Л.Г., Фомин С.В.** Метод создания спектроскопической базы данных диэлектрических свойств влажных почв в СВЧ-диапазоне // Изв. вузов. Радиофизика, 2007, т. 50, № 4, с. 339—349.
- Талалов А.Д., Даев Д.С.** О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород // Физика Земли, 1996, № 8, с. 56—66.
- Технология** исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 2000, 121 с.
- Эпов М.И., Глинских В.Н.** Электромагнитный каротаж: моделирование и инверсия. Новосибирск, Акад. изд-во «Гео», 2005, 100 с.
- Эпов М.И., Миронов 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.
- Birchak J.R., Gardner G.G., Hipp J.E., Victor J.M.** High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // Proc. IEEE, 1974, v. 62, № 1, p. 93—98.
- Hipp J.E.** Soil electromagnetic parameters as function of frequency, soil density, and soil moisture // Proc. IEEE, 1974, v. 62, № 1, p. 98—103.
- Levitskaya T.M., Sternberg B.K.** Polarization processes in rocks // Radio Science, 1996, v. 3, № 4, p. 755—759.
- 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 Sensing, 2004, v. 42, № 4, p. 773—785.

*Рекомендована к печати 7 декабря 2010 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию 20 апреля 2010 г.,
после доработки — 1 декабря 2010 г.*