

ГЕОФИЗИКА

УДК 621.371.3/205.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ
ПОРОД В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 0.05—16 ГГц

М.И. Эпов, В.Л. Миронов*, П.П. Бобров**, И.В. Савин*, А.В. Репин**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

** Институт физики СО РАН, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38, Россия*

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

Изучены диэлектрические свойства смесей песок—нефть—солевой раствор и бентонит—нефть—солевой раствор в диапазоне частот от 50 МГц до 16 ГГц при температуре 22 °С. Проведены сравнения экспериментальных данных с данными, рассчитанными с помощью рефракционной модели. Найдена погрешность оценки с помощью рефракционной модели диэлектрической проницаемости и проводимости исследуемых образцов. Результаты исследований могут быть применены при разработке методов широкополосного электромагнитного каротажа нефтегазовых скважин.

Комплексная диэлектрическая проницаемость, нефтесодержащие породы, рефракционная модель.

DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF OIL-BEARING ROCKS AT 0.05—16 GHz

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

We have measured the dielectric spectra of sand and bentonite mixtures with oil and saline water (NaCl solution) in the frequency range from 50 MHz to 16 GHz at 22 °C. The measured spectra were compared with predictions in terms of the generalized refractive mixing dielectric model (GRMDM), and the respective error was estimated as a check of the model applicability to describe oil-bearing formations. The results may be useful in developing new methods of electromagnetic logging.

Dielectric constant, oil-bearing rocks, generalized refractive mixing dielectric model (GRMDM)

ВВЕДЕНИЕ

Без системного комплексного анализа петрофизических свойств нефтегазовых резервуаров, процессов диссипации электромагнитной энергии в индукционном и волновом частотных диапазонах, создания реалистичных моделей электрофизических характеристик невозможно построить теоретические основы и развить методы достоверной оценки структуры, фильтрационно-емкостных свойств пластов-коллекторов и создавать принципиально новые методы геонавигации при бурении нефтяных скважин. При проведении исследований в этой области [Эпов и др., 2007] использовалась рефракционная диэлектрическая модель смеси песка, солевого раствора и нефти. Однако прямое экспериментальное обоснование такой модели в настоящее время отсутствует, так как диэлектрические свойства пород нефтегазовых коллекторов изучены недостаточно [Бобров и др., 2005; Савин и др., 2007].

В данной работе исследовано влияние состава нефтесодержащих пород на относительную комплексную диэлектрическую проницаемость (далее КДП). Основными факторами, оказывающими влияние на величину диэлектрической проницаемости породы, являются ее минеральный состав и наличие водных растворов и жидких углеводородов. Исследования проводились для предельных случаев, а именно — для смеси песок—нефть—солевой раствор и бентонит—нефть—солевой раствор. Процентное содержание компонентов смеси было следующим: твердые частицы — 85, нефть — 9, раствор — 6. Концентрация раствора составляла 17%. Именно такие значения или близкие к ним существуют в природе вблизи нефтяных пластов. Кроме того, были изучены характеристики смесей песок—нефть, песок—раствор, бентонит—нефть, бентонит—раствор (твердые частицы — 85 %, жидкость — 15 %) и характеристики каждого компонента смесей в отдельности.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение КДП образцов производилось как по методике, изложенной в работе [Комаров и др., 2006], так и по методике, изложенной ниже. Измерения производились с помощью векторного анализатора цепей ZVK фирмы Rohde-Schwarz в диапазоне частот от 50 МГц до 16 ГГц при температуре 22 °С. Образцы помещали в ячейки, представляющие собой отрезки коаксиальной линии передачи сечением 7/3 и 16/7 мм, ограниченные с двух сторон диэлектрическими шайбами из фторопласта (диэлектрическая проницаемость фторопласта равна $\epsilon = 2.05 \pm 0.05 - j \cdot 6 \cdot 10^{-4}$). Применялись ячейки длиной от 2 до 38.5 см. Короткие ячейки использовались в высокочастотной части диапазона (выше 1 ГГц) и при высоких значениях действительной и мнимой частей КДП, длинные — в низкочастотной (ниже 2 ГГц) и при малых значениях КДП. Значения, полученные при измерениях в ячейках разной длины в перекрывающейся частотной области, отличались друг от друга на величину, не превышающую погрешности измерений. Существование одномодового режима контролировалось визуально по виду частотной зависимости параметров матрицы рассеяния S_{11} и S_{12} .

Для стабилизации температуры в процессе измерений использовалась температурная камера SU-240 фирмы TAVAI ESPEC, которая обеспечивает стабилизацию температуры в диапазоне от -40 °С до 140 °С с погрешностью 0.5 °С. Образцы взвешивались на электронных весах ВЛ-210 производства ФНПЦ Санкт-Петербургского завода Госметр.

С использованием полученных экспериментальных результатов исследовалась применимость рефракционной спектроскопической модели диэлектрической проницаемости для нефтесодержащих смесей. Согласно [Комаров, Миронов, 2000; Mironov et al., 2004], действительная ϵ'_s и мнимая ϵ''_s части КДП для смесей твердой и жидких фракций могут быть представлены в форме рефракционной диэлектрической модели смеси (РДМС):

$$\epsilon'_s = n_s^2 - \kappa_s^2, \quad \epsilon''_s = 2n_s \kappa_s, \quad (1)$$

$$n_s = n_d + (n_{sw} - 1)W_{sw} + (n_o - 1)W_o, \quad (2)$$

$$\kappa_s = \kappa_d + \kappa_{sw} \cdot W_{sw} + \kappa_o \cdot W_o, \quad (3)$$

где n_s, n_d, n_{sw}, n_o — действительные части комплексных показателей преломления (КПП), $\kappa_s, \kappa_d, \kappa_{sw}, \kappa_o$ — мнимые части КПП; W_{sw}, W_o — объемные содержания раствора и нефти соответственно. Индексы s, d, sw и o в (2) и далее относятся к смеси, твердой сухой фракции, солевому раствору и нефти соответственно. Значения действительной и мнимой частей КПП, относящиеся к сухой смеси, солевому раствору и нефти, могут быть выражены через действительные и мнимые части КДП с использованием следующих формул:

$$n_p \sqrt{2} = \sqrt{\sqrt{(\epsilon'_p)^2 + (\epsilon''_p)^2} + \epsilon'_p}, \quad (4)$$

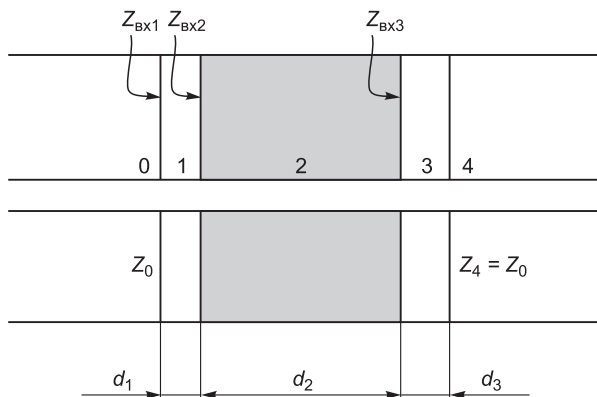
$$\kappa_p \sqrt{2} = \sqrt{\sqrt{(\epsilon'_p)^2 + (\epsilon''_p)^2} - \epsilon'_p}, \quad (5)$$

где p — индекс компонента смеси (d, sw или o).

КДП солевого раствора и нефти представлены в виде релаксационных формул Дебая:

$$\epsilon'_p = \epsilon_{\infty p} + \frac{\epsilon_{0p} - \epsilon_{\infty p}}{1 + (2\pi f \tau_p)^2},$$

$$\epsilon''_p = \frac{\epsilon_{0p} - \epsilon_{\infty p}}{1 + (2\pi f \tau_p)^2} 2\pi f \tau_p + \frac{\sigma_p}{2\pi \epsilon_r f}. \quad (6)$$



Здесь f — частота электромагнитного поля; $\sigma_p, \tau_p, \epsilon_{0p}$ и ϵ_{∞} — параметры модели Дебая (проводимости, времена релаксации и статические и высокочастотные диэлектрические константы соответственно); p — индекс для солевого раствора (sw) или нефти (o); $\epsilon_r = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная свободного пространства.

Рис. 1. Структура измерительной ячейки.

Пояснения см. в тексте.

Значения параметров сухого сложения n_d , k_d для бентонита, используемые в формулах (1) и (2), получены в работе [Комаров, Миронов, 2000]. Аналогичные параметры для песка, а также параметры модели Дебая для нефти и солевого раствора были найдены из экспериментальных измерений КДП.

Вид измерительной ячейки показан на рис. 1. Исследуемый обр. 2 помещали в коаксиальную ячейку между двумя шайбами из фторопласта 1 и 3, среды 0 и 4 — воздух ($\epsilon = 1 - j \cdot 0$).

Параметры матрицы рассеяния данной слоистой структуры выражаются в виде [Бреховских, 1973]:

$$S_{11} = \frac{Z_{\text{вх}1} - Z_0}{Z_{\text{вх}1} + Z_0}, \quad (7)$$

$$\frac{1}{S_{12}} = \prod_{i=0}^{i=3} \frac{Z_i + Z_{\text{вх}(i+1)}}{Z_{(i+1)} + Z_{\text{вх}(i+1)}} e^{-jk_i d_i}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{вх}1} = \frac{Z_{\text{вх}2} + Z_1 \text{th}(jk_1 d_1)}{Z_1 + Z_{\text{вх}2} \text{th}(jk_1 d_1)} Z_1$ — входной импеданс структуры, расположенной справа от границы между средами 0 и 1 (см. рис. 1). Импедансы $Z_{\text{вх}2}$ и $Z_{\text{вх}3}$ вычисляются по аналогичным формулам:

$$Z_{\text{вх}i} = \frac{Z_{\text{вх}(i+1)} + Z_i \text{th}(jk_i d_i)}{Z_i + Z_{\text{вх}(i+1)} \text{th}(jk_i d_i)} Z_i,$$

в которых индекс слоя $i = 2, 3$, а $Z_{\text{вх}4} = Z_4 = Z_0$ (Z_0 — волновое сопротивление линии); $k_i = k_0 \sqrt{\epsilon_i}$ — комплексное волновое число i -го слоя, где $\epsilon_i = \epsilon' - j\epsilon''$ — комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) i -го слоя, $k_0 = 2\pi f/c$ — волновое число в вакууме (c — скорость света); d_i — толщина i -го слоя, кроме $d_0 = 0$; $Z_i = Z_0 / \sqrt{\epsilon_i}$.

Действительную и мнимую части КДП образца можно определять как из (7), так и из (8). Кроме того, возможно использование только модулей параметров матрицы рассеяния S_{11} и S_{12} . Использование формулы (8) позволяет достичь более высокой точности, так как погрешность экспериментального измерения коэффициента прохождения обычно меньше, чем погрешность коэффициента отражения.

Поскольку диэлектрическая проницаемость не выражается этими формулами в явном виде, для ее нахождения нужно применить математические методы поиска минимума целевой функции (разности между измеренными и рассчитанными значениями). Поскольку зависимость S_{11} и S_{12} от диэлектрической проницаемости носит периодический характер, поиск может дать неверное решение. Поэтому перед началом процедуры минимизации целевой функции нужно выбирать начальное приближение для диэлектрической проницаемости, близкое к истинному. При невысоких частотах, когда на длине образца укладывается менее четверти длины волны, для получения правильного решения можно принимать за начальное приближение минимальное значение диэлектрической проницаемости (как у воздуха или сухого песка).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительно производилось измерение КДП отдельных компонентов смеси. Длину ячеек выбирали с учетом обеспечения необходимой точности. Для более точного определения параметров модели Дебая ϵ_0 и σ измерения проводили на частотах, начиная от 10 МГц и выше. При вычислении погрешностей использовались паспортные значения погрешности определения S_{12} (0.05 дБ по модулю и 0.4° по фазе) и погрешность измерения длины образца, равная 0.05 мм. Проведенная оценка приборной погрешности показала, что приемлемая точность при низких значениях КДП (песок, нефть) может быть достигнута при длине образца более 10 см, а при высоких значениях КДП (солевой раствор) длина образца должна быть равной примерно 2 см.

На рис. 2 приведены значения действительной и мнимой частей КДП песка в воздушно-сухом состоянии, установленные в ячейке максимальной длины. Наблюдается небольшое увеличение мнимой части КДП при уменьшении частоты, которое можно объяснить наличием

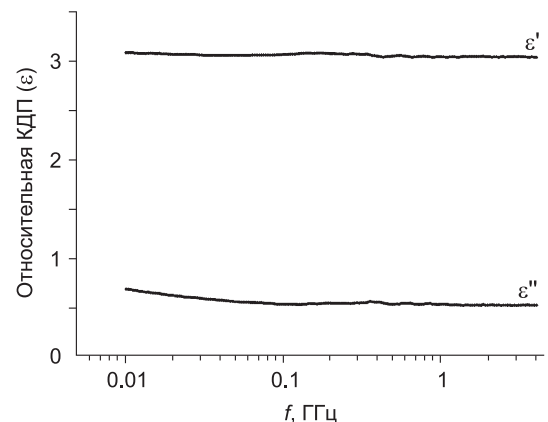


Рис. 2. Значения КДП воздушно-сухого песка, измеренные при длине образца 38.5 см.

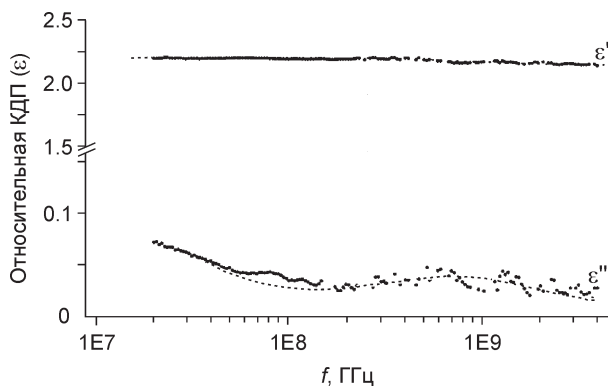


Рис. 3. Значения действительной и мнимой частей КДП нефти, измеренные при длине образца 11.8 см (точки) и рассчитанные по модели Дебая (штриховая линия).

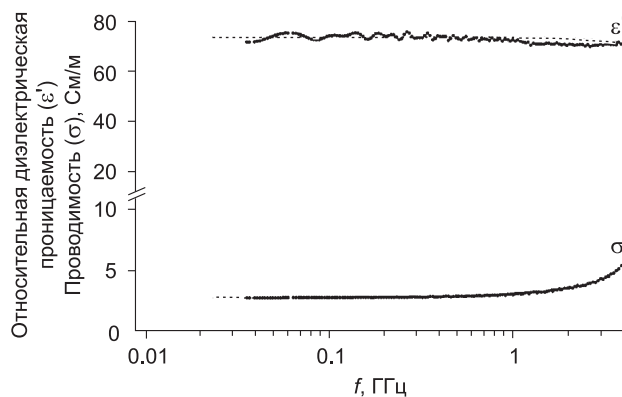


Рис. 4. Значения действительной части КДП и эквивалентная проводимость солевого раствора, измеренные при длине образца 2 см (точки) и рассчитанные по модели Дебая (штриховая линия).

в песке небольшого количества влаги. Тем не менее можно считать, что в диапазоне частот выше 50 МГц действительная и мнимая части КДП песка остаются неизменными. Средние значения в этом диапазоне составили $\epsilon' = 2.58 \pm 0.02$ и $\epsilon'' = 0.025 \pm 0.011$ для образца длиной 38.5 см, $\epsilon' = 2.65 \pm 0.03$ и $\epsilon'' = 0.01 \pm 0.02$ для образца длиной 3.6 см.

На рис. 3 приведены результаты измерения КДП нефти. По этим значениям подобраны параметры модели Дебая, приведенные в таблице. Эти параметры лишь незначительно отличаются от приведенных в [Folgero, 1998]. Расчетные значения погрешностей измерения возрастают при уменьшении частоты. Так, на частоте 2 ГГц погрешность измерения ϵ' составляет $\pm 0.2\%$, а на частоте 50 МГц — $\pm 5\%$. Однако гладкий вид графиков и удовлетворительное соответствие модели (среднее отклонение экспериментальных данных от расчетных в диапазоне частот 50 МГц — 2 ГГц составляет $\pm 0.4\%$) позволяет сделать вывод, что погрешности на низких частотах не намного выше, чем на частоте 2 ГГц.

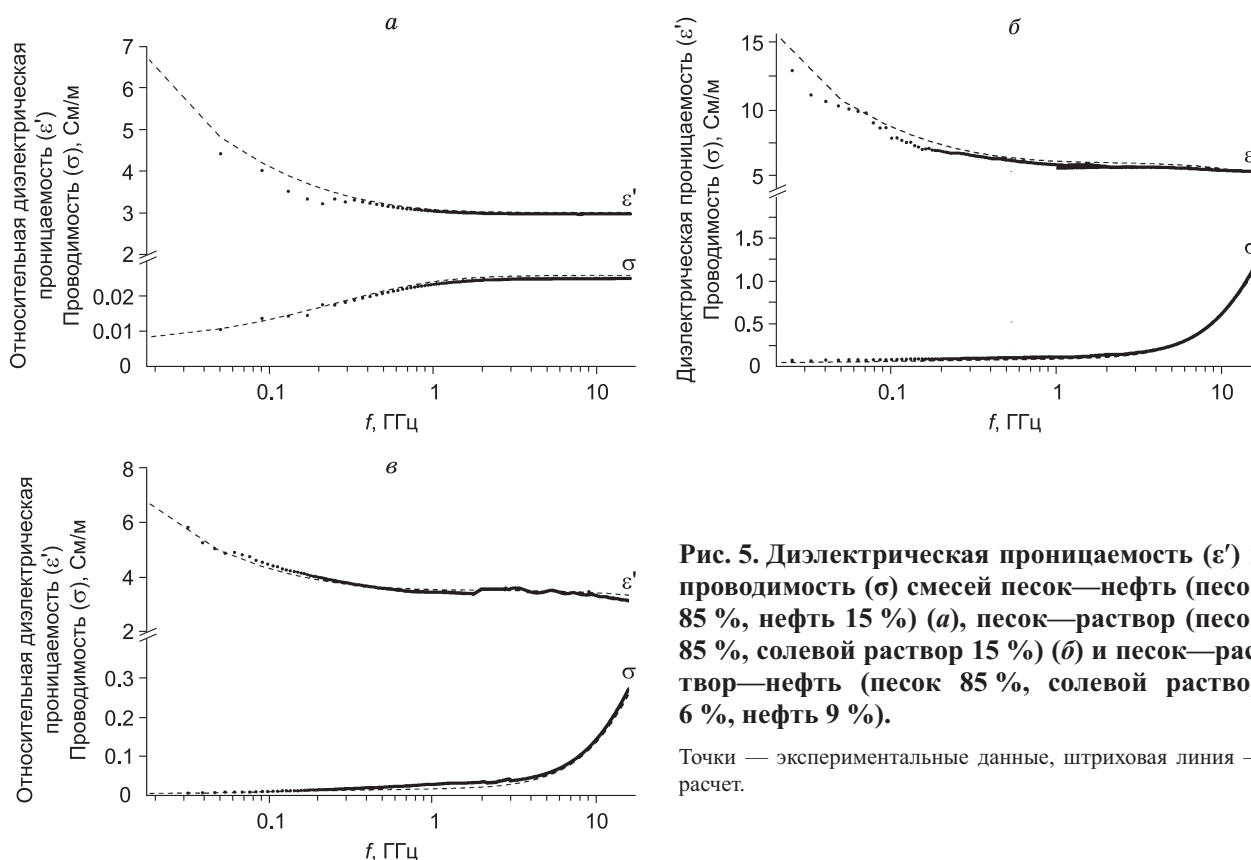


Рис. 5. Диэлектрическая проницаемость (ϵ') и проводимость (σ) смесей песок—нефть (песок 85 %, нефть 15 %) (а), песок—раствор (песок 85 %, солевой раствор 15 %) (б) и песок—раствор—нефть (песок 85 %, солевой раствор 6 %, нефть 9 %).

Точки — экспериментальные данные, штриховая линия — расчет.

Параметры рефракционной диэлектрической модели смеси

Компонент смеси	n_d	k_d	σ_p , См/м	τ_p , пс	ε_{0p}	$\varepsilon_{\infty p}$
Сухой песок	1.63	0.012	—	—	—	—
Сухой бентонит	1.5	0.01	—	—	—	—
Солевой раствор	—	—	2.75	8.77	74.32	4.9
Нефть	—	—	0.0001	209	2.2	2.13

На рис. 4 приведены результаты измерения КДП солевого раствора концентрацией 17 г/л и подобраны параметры модели Дебая, которые также приведены в таблице. Вместо мнимой части КДП ε'' , значения которой очень большие (на частоте 50 МГц $\varepsilon'' = 720$), приведены значения эквивалентной проводимости $\sigma = \omega \varepsilon'' \varepsilon_r$, где ω — циклическая частота, $\varepsilon_r = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная. Высокое затухание приводит к тому, что погрешность определения действительной части КДП возрастает. Расчетное значение относительной погрешности измерения ε' на частоте 100 МГц составляет $\pm 5\%$, тогда как отклонение от модели Дебая в диапазоне частот от 50 МГц до 4 ГГц составляет около $\pm 4\%$. Расчетная погрешность проводимости составляет $\pm 4\%$, а отклонение от модели — $\pm 3\%$.

На рис. 5, 6 изображены измеренные и рассчитанные с помощью рефракционной модели частотные спектры действительной части КДП ε' и эквивалентной удельной проводимости $\sigma = 2\pi f \varepsilon'' \varepsilon_r$ для смесей на основе песка (рис. 5) и бентонитовой глины (рис. 6).

Как видно из графиков, для случаев песок—нефть—раствор, песок—нефть и песок—раствор (рис. 5) экспериментальные и расчетные данные совпадают в пределах ошибок измерения (погрешность ε' не превышает 6%, σ — 11%), следовательно, взаимодействия между компонентами смеси не происходит и применение рефракционной модели для данной смеси возможно во всем исследуемом диапазоне частот.

В случае же бентонит—нефть—раствор, как и бентонит—нефть, бентонит—раствор (см. рис. 6), наблюдается существенное отличие измеренных значений диэлектрической проницаемости от расчетных, что можно отнести за счет взаимодействия компонентов смеси между собой. Физическая природа этого взаимодействия в настоящее время изучается.

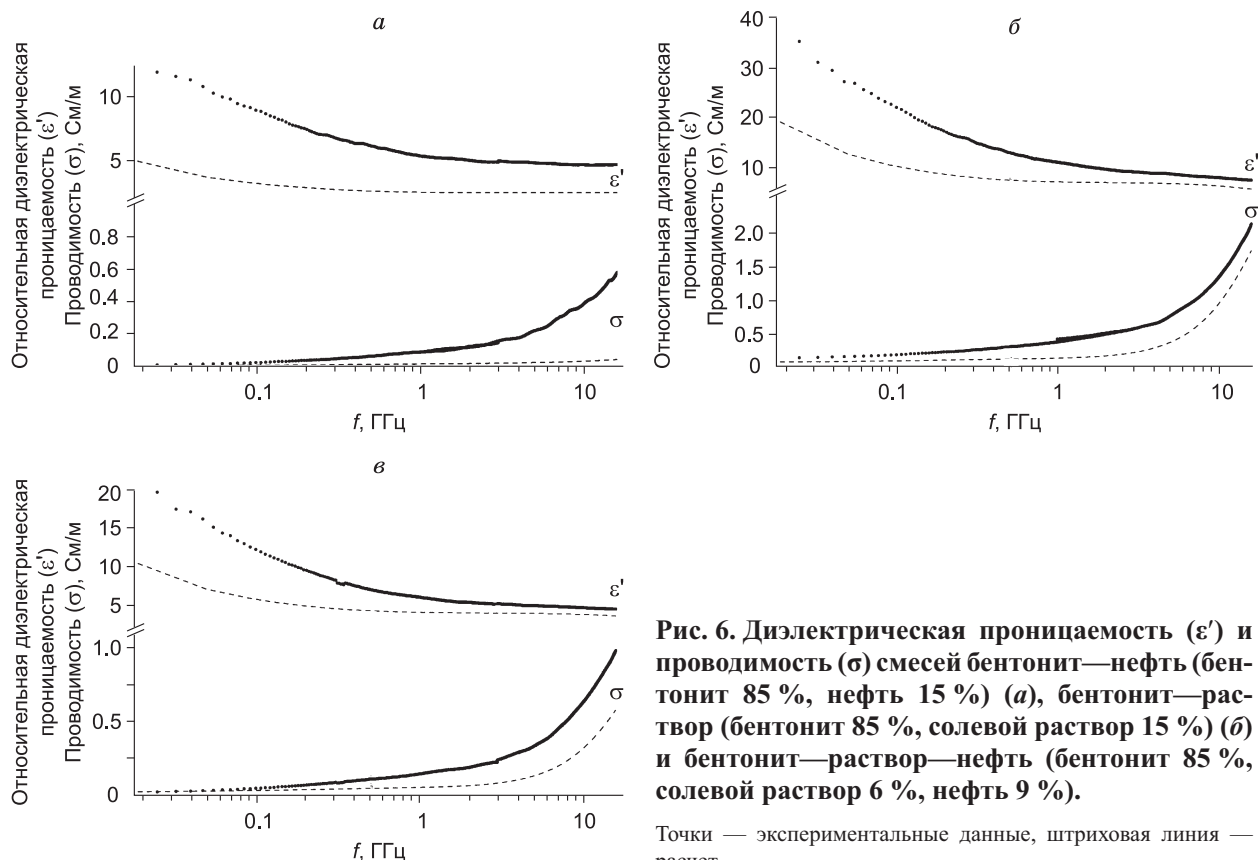


Рис. 6. Диэлектрическая проницаемость (ε') и проводимость (σ) смесей бентонит—нефть (бентонит 85 %, нефть 15 %) (а), бентонит—раствор (бентонит 85 %, солевой раствор 15 %) (б) и бентонит—раствор—нефть (бентонит 85 %, солевой раствор 6 %, нефть 9 %).

Точки — экспериментальные данные, штриховая линия — расчет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были получены экспериментальные диэлектрические спектры песка и бентонитовой глины, насыщенных нефтью и солевым раствором в диапазоне частот от 50 МГц до 16 ГГц. Проведен расчет спектров исследуемых смесей с помощью рефракционной модели в том же диапазоне частот. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных спектров с целью определения возможности применения рефракционной модели для моделирования подобных сред. В случае смеси песок—солевой раствор—нефть максимальные отклонения моделируемых данных от экспериментальных не превышают погрешности измерений. В случае смеси бентонитовая глина—солевой раствор—нефть были выявлены существенные отклонения оценок, даваемых рефракционной моделью, от эксперимента, что требует дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

Бобров П.П., Жиров П.В., Ивченко О.А., Кривальцевич С.В., Мандрыгина В.Н., Стасюк В.Д. Изменение диэлектрических и излучательных характеристик почв в СВЧ диапазоне при загрязнении нефтепродуктами и зольными выбросами ТЭЦ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Т. II. М., «GRANP polygraph», 2005, с. 243—249.

Бреховских В.Л. Волны в слоистых средах. М., Наука, 1973, 343 с.

Комаров С.А., Миронов В.Л. Микроволновое зондирование почв. Новосибирск, Наука, 2000, 350 с.

Комаров С.А., Миронов В.Л., Лукин Ю.И. Исследование диэлектрического спектра комплексной диэлектрической проницаемости влажных почвогрунтов // Изв. вузов. Физика, 2006, т. 49, № 9, с. 29—34.

Савин И.В., Репин А.В., Бобров П.П., Миронов В.Л. Исследование влияния загрязнений нефтью на диэлектрические параметры почвенного покрова // Материалы XI Международной научной конференции «Решетневские чтения» (Красноярск, 7—10 ноября 2007 г.). Красноярск, 2007, с. 96—97.

Эпов М.И., Миронов 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.

Folgero K. Broad-band dielectric spectroscopy of low-permittivity fluids using one measurement cell // IEEE Trans. Instrument. Measurement., 1998, v. 47, № 4, p. 881—885.

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 27 августа 2008 г.

В.С. Селезневым

Поступила в редакцию

10 апреля 2008 г.