

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 550.372

А.Д. ТАЛАЛОВ, Д.С. ДАЕВ

ВЗАИМОСВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОНИЦАЕМОСТИ
С КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ ГОРНЫХ ПОРОД
В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ $10^4 - 5 \cdot 10^8$ Гц

Приведены результаты экспериментального исследования взаимосвязи коэффициента проницаемости и комплексной электропроводности водонасыщенных песчаников и известняков в частотном диапазоне $10^4 - 5 \cdot 10^8$ Гц. Установлена связь между коэффициентом проницаемости, относительным удельным сопротивлением и типом зависимости диэлектрической проницаемости и частотой поля. Рассмотрены физические основы взаимосвязи частотной дисперсии с фильтрационными характеристиками пород и предложена методика определения коэффициента проницаемости по результатам многочастотных измерений комплексной электропроводности.

Определение фильтрационных характеристик горных пород в естественных условиях электрическими методами представляет значительный интерес. В отличие от лабораторных методов, изучающих отдельные образцы, взятые из толщи пород, электрические измерения позволяют получать интегральные характеристики значительных объемов породы в условиях естественного залегания. Основа связи фильтрационных характеристик и электропроводности горных пород — общность основных законов и уравнений, описывающих процессы протекания жидкости и электрического тока в некоторых простых структурах. Поэтому можно полагать, что из двух образцов горных пород с одинаковой влажностью меньший коэффициент проницаемости будет у образца с большим значением отношения удельного электрического сопротивления образца ρ к удельному электрическому сопротивлению насыщающего этот образец раствора ρ_1 . Таким образом, задача определения коэффициента проницаемости породы при полном водонасыщении сводится к определению ее объемной влажности и удельных электрических сопротивлений ρ и ρ_1 и поиску соответствующих корреляционных зависимостей.

Сказанное справедливо лишь для грубодисперсных пород с относительно простым строением порового пространства. Горные породы, как правило, являются, сложными гетерогенными системами, поэтому связь фильтрационных и электрических характеристик осложняется влиянием ряда дополнительных факторов.

В первую очередь это относится к тонкодисперсным и глинистым породам, где прямо пропорциональная связь между электропроводностью породы и поровой жидкости нарушается вследствие влияния эффекта поверхностной проводимости. При этом значения удельного электрического сопротивления породы могут быть ниже, чем удельное сопротивление насыщающей породу жидкости¹. Кроме того, значения удельного сопротивления поровой жидкости в естественных условиях взаимодействия с минеральным скелетом породы, как правило, неизвестны. К числу факторов, осложняющих взаимосвязь электрических и фильтрационных характеристик также следует отнести присутствие в породе вкрапленности минералов с электронным типом проводимости и зависимость электрических свойств пород от частоты электромагнитного поля (частотная дисперсия). Минералы с электронным типом проводимости обычно совсем не пропускают жидкости и газы, но практически не оказывают сопротивления протеканию электрического тока, вызывая при этом сильную низкочастотную дисперсию электрических параметров. Зависимость электрических свойств пород от частоты поля осложняет характер взаимосвязи между петрофизическими и электрическими характеристиками. Однако, как показали проведенные исследования, изучение закономерностей частотной дисперсии электрических свойств позволяет получать ценную информацию об особенностях микроструктуры и состава пород [4]. Данное обстоятельство

¹ Значения удельного сопротивления ρ_1 , определяемые по водным вытяжкам.

ство использовано нами для разработки методики определения коэффициента проницаемости пород по результатам широкополосных измерений комплексной электропроводности (диэлектрической проницаемости ϵ и удельного электрического сопротивления ρ).

Известно несколько основных механизмов, обуславливающих появление частотной дисперсии. Каждый из этих механизмов связан с различными физическими процессами, отличающимися инерционностью, что находит отражение в характере и форме частотных зависимостей диэлектрической проницаемости (ϵ) и удельного электрического сопротивления (ρ) пород. В диапазоне частот $10^3 - 10^9$ Гц наиболее существенный вклад в зависимость ϵ и ρ от частоты поля вносят процессы структурной поляризации (эффект Максвелла-Вагнера) и частично обратимые электрохимические реакции, возникающие на границе раздела поровой жидкости и минералов с электронным типом проводимости. Оба указанных механизма приводят к весьма существенному возрастанию диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления на низких частотах. При этом форма частотных зависимостей ϵ и ρ (дисперсионных кривых) различается, что позволяет судить о наличии в породе электропроводящих вкраплений и особенностях строения порового пространства [4]. Наличие в породе тонкослойных структур или частично изолированных пор с относительно тонкими стенками приводит к увеличению низкочастотных значений ϵ и ρ , обусловленному эффектом Максвелла-Вагнера. При этом форма дисперсионных кривых отражает особенности распределения порового пространства по характерным геометрическим размерам. Чем больше в породе содержится пор с тонкими и плохо проводящими электрический ток стенками, тем в большей степени проявляется частотная дисперсия электрических свойств. Аналогичное влияние на характер дисперсии оказывает и степень закрытости (изолированности) поровых каналов. Данное положение можно проиллюстрировать на примере расчета электрических характеристик одиночного порового канала рис. 1 [2].

Выражение для полной электропроводности одиночного канала, изображенного на рис. 1, имеет вид:

$$\epsilon_1^* = \frac{(S_\Delta/S) \cdot (\epsilon_1^* - \epsilon_2^*) + \epsilon_2^* \cdot \epsilon_1^*}{(S_\Delta/S) + (d/l) \cdot [1 - (S_\Delta/S)] \cdot (\epsilon_1^* - \epsilon_2^*) + \epsilon_2^*}, \quad (1)$$

где $\epsilon_1^* = (1/\rho_1 - i \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_0)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость поровой жидкости; $\epsilon_2^* = (1/\rho_2 - i \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot \epsilon_2 \cdot \epsilon_0)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость минерального скелета; ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость поровой жидкости, отн.ед; ρ_1 — удельное электрическое сопротивление поровой жидкости, Ом·м; d/l — отношение толщины стенок к длине свободной части канала; S_Δ/S — отношение площади зазора к общей площади сечения порового канала (параметр, характеризующий степень перекрытия каналов); F — частота электромагнитного поля, Гц.

Результаты численного анализа (1) иллюстрируются графиками зависимостей эффективных значений $\epsilon_{эф}$ и $\rho_{эф}$ от частоты поля, геометрических характеристик порового канала и электрических свойств заполняющей его жидкости (рис. 1, б).

Значения диэлектрической проницаемости порового канала увеличиваются либо при понижении частоты поля, либо при снижении удельного сопротивления насыщающей канал жидкости. Отношение длины свободной части порового канала, заполненной поровым флюидом, к толщине перегородки (d/l) не может превышать единицу, соответственно электрические характеристики канала имеют два крайних значения: при $d/l \rightarrow 0$, $\epsilon_{эф} \rightarrow \epsilon_1$, $\rho_{эф} \rightarrow \rho_1$; при $d/l \rightarrow 1$, $\epsilon_{эф} \rightarrow \epsilon_2$, $\rho_{эф} \rightarrow \rho_2$. Если электропроводность материала перегородки (и стенок канала) ничтожно мала ($\rho \rightarrow \infty$), промежуточные значения диэлектрической проницаемости на низких частотах могут иметь очень большие значения ($\epsilon_{эф} \rightarrow \infty$ при $d/l \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow 0$). Следует заметить, что, несмотря на кажущуюся простоту, эффективные электрические свойства рассматриваемого токового канала зависят от восьми параметров: S , S_Δ/S , d/l , ϵ_1 , ρ_1 , ϵ_2 , ρ_2 и частоты электромагнитного поля.

Частотная дисперсия электрических свойств возникает не только в поровых каналах, имеющих форму, как на рис. 1, но при любых формах порового пространства, когда в породе есть поры с относительно тонкими стенками. В данном случае основное условие возникновения сильной частотной дисперсии — более чем 10-кратное превышение объема хорошо проводящей фазы (поровый флюид с высокой электропроводностью) по отношению к объему твердой фазы (стенки пор из минералов с малой электропроводностью).

Структуры реальных пород весьма многообразны и значительно сложнее изображенной на рис. 1. Рассмотренная здесь модель лишь показывает характер частотной дисперсии, обусловленный наличием тонких перегородок и наблюдаемый в диапазоне частот от нескольких десятков герц до нескольких сотен мегагерц. Очевидно, что геометрические характеристики поровых каналов S_Δ/S и d/l , входящие в (1), влияют не только на электрические свойства поровых каналов, но также и на их пропускную способность для жидкости или газа.

Проведенные исследования показали, что резкая частотная дисперсия ϵ , вызванная эффектом Максвелла-Вагнера, свойственна всем породам, содержащим даже незначительное количество глинистых минералов. Напротив, в «чистых» и относительно грубодисперсных породах (например, песках) ϵ и ρ практически отсутствуют [3].

Для сопоставления способности пород к пропусканию жидкостей или газов с их электросопротивлением необходимы данные об удельном электрическом сопротивлении порового флюида (ρ_1). Эта задача может быть решена методом измерения обеих составляющих комплексной электропроводности (ϵ и ρ) на частотах, где плотность токов смешения соизмерима с плотностью токов проводимости ($\text{tg} \delta \approx 1$), что позволяет рассчитать содержание и удельное сопротивление порового флюида в естественных условиях его взаимодействия с минеральным скелетом породы [3].

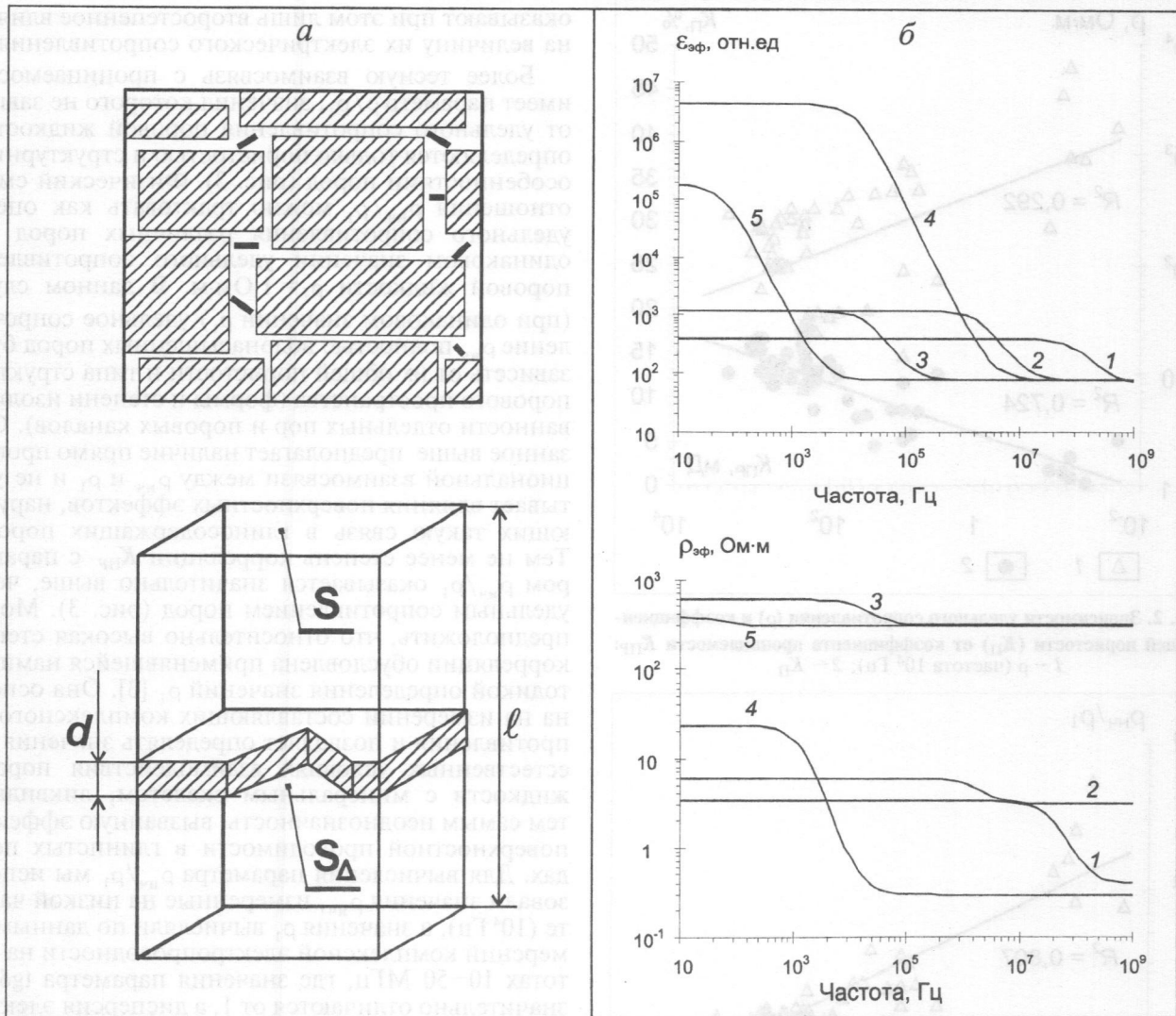


Рис. 1. Схематическое представление структуры, содержащей поровые каналы с перегородками: l — длина канала; d — толщина перегородки; S — площадь сечения канала; S_{Δ} — площадь зазора между перегородкой и стенками канала (а); частотные зависимости ϵ и ρ для одиночного порового канала: 1 — ρ 0,3 Ом·м, d/l $1 \cdot 10^{-2}$, S_{Δ}/S $1 \cdot 10^{-3}$; 2 — ρ 3,0 Ом·м, d/l $1 \cdot 10^{-3}$, S_{Δ}/S $1 \cdot 10^{-3}$; 3 — ρ 300 Ом·м, d/l $1 \cdot 10^{-3}$, S_{Δ}/S $1 \cdot 10^{-3}$; 4 — ρ 0,3 Ом·м, d/l $1 \cdot 10^{-6}$, S_{Δ}/S 10^{-8} ; 5 — ρ 300 Ом·м, d/l $1 \cdot 10^{-6}$, S_{Δ}/S $1 \cdot 10^{-6}$ (б)

Таким образом, возможность определения электрических характеристик порового флюида и тесная взаимосвязь формы дисперсионных кривых с геометрическими характеристиками порового пространства могут являться физической основой для определения фильтрационных характеристик пород по данным многочастотных измерений ϵ и ρ .

Для проверки данной гипотезы проведены измерения электрических свойств коллекции образцов керна из продуктивных пластов нефтегазовых месторождений Оренбургской и Калининградской областей (50 образцов). Глубина залегания пластов варьировала от 1630 до 2300 м. Основные физические свойства образцов: объемная плотность 2,31–2,68 г/см³, коэффициент общей пористости 0,32–17,7%, коэффициент проницаемости 0,02–1979 мД. С целью проверки гипотезы о взаимосвязи частотной дисперсии с фильтрационной способностью пород осуществлены измерения электрических свойств образцов в частотном диапазоне 10^4 – 510^8 Гц. Перед началом измерений образцы

насыщались растворами хлористого натрия с различным удельным сопротивлением от 0,7 до 25 Ом·м (в случайном порядке). Затем проводились измерения комплексной электропроводности и определение ϵ и ρ образцов с помощью высокочастотного моста проводимостей ВМ-431Е и измерителя комплексных коэффициентов передачи Р4-11 по специальной методике, исключающей влияние поляризационных эффектов в зоне контакта образца с измерительными ячейками [1]. Все измерения выполнялись при постоянной температуре ($25 \pm 0,3$ °С) и давлении на образец 2 МПа.

Результаты низкочастотных измерений удельного сопротивления (частота поля 10^4 Гц), их взаимосвязь с коэффициентами общей пористости ($K_{п}$) и проницаемости ($K_{пр}$) представлены на рис. 2. Для количественной характеристики регрессионных зависимостей между отдельными физическими параметрами и проницаемостью образцов на всех графиках (в том числе на рис. 2) приведены значения квадрата коэффициента корреляции (R^2).

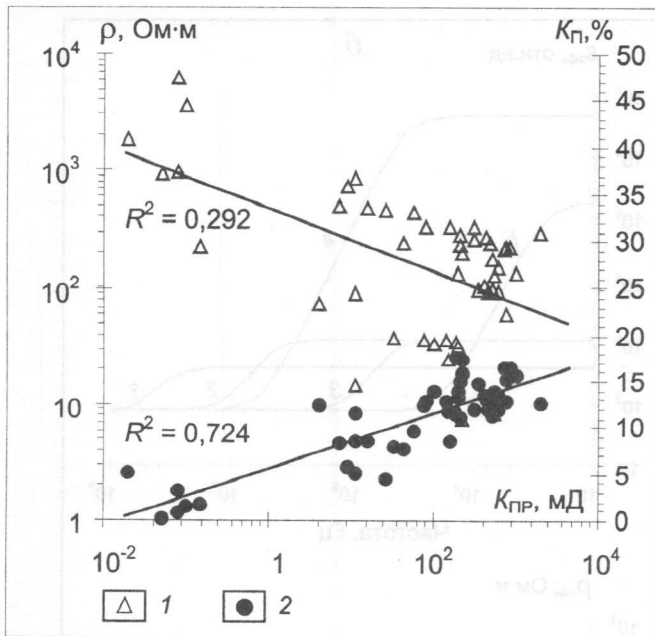


Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления (ρ) и коэффициента общей пористости ($K_{П}$) от коэффициента проницаемости $K_{ПР}$: 1 — ρ (частота 10^4 Гц); 2 — $K_{П}$

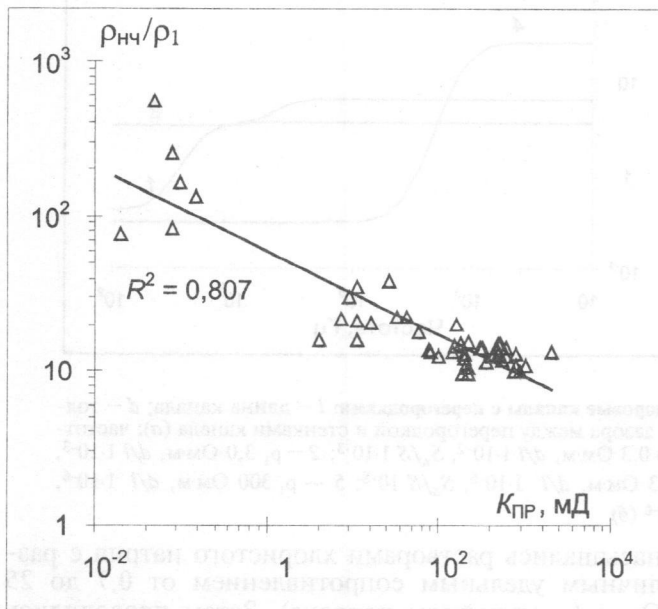


Рис. 3. Зависимость параметра $\rho_{нч}/\rho_1$ от коэффициента проницаемости ($K_{ПР}$)

Полученные данные (рис. 2) показывают, что практическое использование результатов низкочастотных измерений ρ для определения коэффициента проницаемости неприемлемо, так как может привести к ошибкам определения $K_{ПР}$, намного превышающим 100%. Низкая степень корреляции значений ρ и $K_{ПР}$ обусловлена случайным характером распределения удельного сопротивления поровой жидкости в образцах (ρ_1), значения которого обычно неизвестны. Таким образом, эффективные значения удельного сопротивления образцов ρ в первую очередь определяются содержанием и минерализацией поровой жидкости. Структурные особенности пород, в том числе проницаемость,

оказывают при этом лишь второстепенное влияние на величину их электрического сопротивления.

Более тесную взаимосвязь с проницаемостью имеет параметр ρ/ρ_1 , значения которого не зависят от удельного сопротивления поровой жидкости и определяются только пористостью и структурными особенностями пород (рис. 3). Физический смысл отношения $\rho_{нч}/\rho_1$ можно трактовать как оценку удельного сопротивления различных пород при одинаковом значении удельного сопротивления поровой жидкости $\rho_1 = 1$ Ом·м. В данном случае (при одинаковом значении ρ_1) удельное сопротивление $\rho_{нч}$ полностью водонасыщенных пород будет зависеть от их общей пористости и типа структуры порового пространства (формы и степени изолированности отдельных пор и поровых каналов). Сказанное выше предполагает наличие прямо пропорциональной взаимосвязи между $\rho_{нч}$ и ρ_1 и не учитывает влияния поверхностных эффектов, нарушающих такую связь в глиносодержащих породах. Тем не менее степень корреляции $K_{ПР}$ с параметром $\rho_{нч}/\rho_1$ оказывается значительно выше, чем с удельным сопротивлением пород (рис. 3). Можно предположить, что относительно высокая степень корреляции обусловлена применявшейся нами методикой определения значений ρ_1 [3]. Она основана на измерении составляющих комплексного сопротивления и позволяет определять значения ρ_1 в естественных условиях взаимодействия поровой жидкости с минеральным скелетом, ликвидируя тем самым неоднозначность, вызванную эффектом поверхностной проводимости в глинистых породах. Для вычисления параметра $\rho_{нч}/\rho_1$ мы использовали значения $\rho_{нч}$, измеренные на низкой частоте (10^4 Гц), а значения ρ_1 вычисляли по данным измерений комплексной электропроводности на частотах 10–50 МГц, где значения параметра $\text{tg}\delta$ незначительно отличаются от 1, а дисперсия электрических свойств поровой жидкости малозаметна.

Несмотря на значительно более высокую по сравнению с рис. 2 степень корреляции параметров $\rho_{нч}/\rho_1$ и $K_{ПР}$, практическое использование регрессионной зависимости (рис. 3) для определения коэффициента проницаемости также неприемлемо ввиду недостаточно высокой точности ($\Delta_{ср} > \pm 200\%$).

Можно предположить, что большой разброс значений параметра $\rho_{нч}/\rho_1$ у образцов с примерно одинаковыми значениями проницаемости вызван различной глинистостью пород (рис. 3). Как известно, глины, обладая высокой адсорбционной способностью минерального скелета, всегда имеют в естественных условиях низкое электросопротивление, оказывая при этом весьма высокое сопротивление протеканию различных жидкостей или газов. Присутствие в породах даже незначительного количества глинистых минералов отмечается резким увеличением частотной дисперсии электрических параметров, в особенности диэлектрической проницаемости. Тонкие диэлектрические пластинки монтмориллонита обуславливают проявление эффекта Максвелла—Вагнера, при этом эффективные значения диэлектрической проницаемости породы на низких частотах могут значительно превышать ϵ отдельных породообразующих минералов, достигая 1000 отн. ед. и более (рис. 4, а).

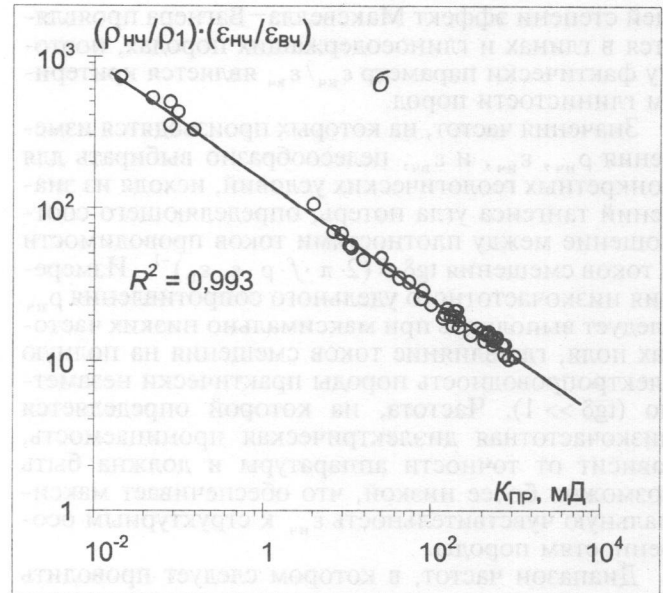
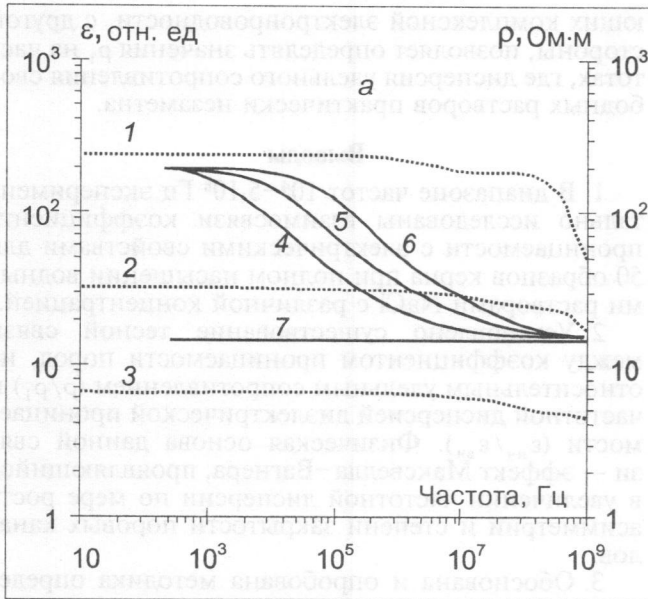


Рис. 4. Осредненные зависимости ϵ и ρ от частоты поля для двух образцов кварцевого песчаника с различным значением глинистости, при различном удельном сопротивлении насыщающих растворов (ρ_1): 1, 4 — ρ_1 20 Ом·м, $C_{гил}$ 15%; 2, 5 — ρ_1 2,5 Ом·м, $C_{гил}$ 15%; 3, 6 — ρ_1 0,5 Ом·м, $C_{гил}$ 15%; 7 — $C_{гил} \approx 0$ (а); зависимость параметра $(\rho_{нч}/\rho_1) \cdot (\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч})$ от коэффициента проницаемости (б)

Особенность частотных характеристик диэлектрической проницаемости — отсутствие зависимости асимптотических значений от минерализации поровой жидкости (рис. 4, а). Низкочастотные значения ϵ определяются только содержанием тонких диэлектрических перегородок и степенью закрытости порового пространства, что фактически эквивалентно глинистости пород. С повышением частоты поля ($\text{tg}\delta < 1$) увеличивается плотность емкостных токов (токов смещения), при этом форма поровых каналов и наличие в них тонких изолирующих перегородок перестают оказывать существенное влияние на силу и направление тока, что приводит к уменьшению эффективных значений ρ и ϵ . Причем высокочастотные асимптотические значения ϵ оказываются пропорциональны количеству содержащейся в породе воды и практически не зависят от ее минерализации, структуры порового пространства и степени глинистости¹. Таким образом, можно полагать, что для составления корреляционных зависимостей между проницаемостью пород и их электрическими свойствами целесообразно проводить измерения обеих составляющих комплексного сопротивления в широком частотном диапазоне, используя взаимосвязь явления частотной дисперсии ϵ и ρ с петрофизическими особенностями пород. Необходимость такого подхода подтверждается экспериментальными данными (рис. 4, б).

В качестве измеряемого параметра для составления корреляционной зависимости здесь использовано произведение относительного низкочастотного сопротивления $(\rho_{нч}/\rho_1)$ и параметра $\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч}$, характеризующего величину частотной дисперсии

диэлектрической проницаемости. Значения $\epsilon_{вч}$ измерялись на частоте 300 МГц, а значения $\epsilon_{нч}$ — на максимально низких частотах, при которых еще удавалось надежно определять диэлектрическую проницаемость (в зависимости от значений $\text{tg}\delta$). Полученная корреляционная зависимость между коэффициентом проницаемости образцов и параметром $(\rho_{нч}/\rho_1) \cdot (\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч})$ описывается следующим уравнением регрессии:

$$K_{пр} = 4,525 \cdot 10^5 \cdot D^{-m}, \quad (2)$$

где $D = (\rho_{нч}/\rho_1) \cdot (\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч})$; $\rho_{нч}/\rho_1$ — относительное удельное сопротивление породы при низкой частоте поля ($\text{tg}\delta \gg 1$); $\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч}$ — отношение диэлектрических проницаемостей, измеренных при низкой ($\text{tg}\delta > 1$) и высокой ($\text{tg}\delta \ll 1$) частотах поля; $m = 2,59$ — эмпирический коэффициент.

Полученное уравнение регрессии характеризуется значительно более высоким коэффициентом корреляции (R^2 0,993) и пригодно для количественных оценок коэффициента фильтрации (в диапазоне 0,5–1500 мД, среднеквадратическая погрешность определения $K_{пр} \pm 25\%$). Физический смысл параметров, входящих в (2), следующий. Относительное удельное сопротивление $\rho_{нч}/\rho_1$ показывает, каким будет удельное сопротивление породы при удельном сопротивлении поровой жидкости 1 Ом·м. Параметр $\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч}$ отражает величину частотной дисперсии диэлектрической проницаемости. В рассматриваемом частотном диапазоне 10^4 – $5 \cdot 10^8$ Гц при отсутствии в породах электропроводящей вкрапленности дисперсия ϵ обуславливается эффектом Максвелла–Вагнера, поэтому величина отношения $\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч}$ характеризует протяженность поровых каналов d/l , наличие в них тонких перегородок и степень закрытости S_Δ/S (рис. 1). В наиболь-

¹ Диэлектрическая проницаемость воды (≈ 80 отн. ед.) значительно превышает ϵ большинства породообразующих минералов (4,5–7 отн. ед.).

шей степени эффект Максвелла—Вагнера проявляется в глинах и глинодержащих породах, поэтому фактически параметр $\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч}$ является критерием глинистости пород.

Значения частот, на которых производятся измерения $\rho_{нч}$, $\epsilon_{нч}$, и $\epsilon_{вч}$, целесообразно выбирать для конкретных геологических условий, исходя из значений тангенса угла потерь, определяющего соотношение между плотностями токов проводимости и токов смещения $\text{tg}\delta = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0)^{-1}$. Измерения низкочастотного удельного сопротивления $\rho_{нч}$ следует выполнять при максимально низких частотах поля, где влияние токов смещения на полную электропроводность породы практически незаметно ($\text{tg}\delta \gg 1$). Частота, на которой определяется низкочастотная диэлектрическая проницаемость, зависит от точности аппаратуры и должна быть возможно более низкой, что обеспечивает максимальную чувствительность $\epsilon_{нч}$ к структурным особенностям породы.

Диапазон частот, в котором следует проводить определение $\epsilon_{вч}$, ограничен сверху частотами порядка 500 МГц, где становятся заметными изменения электрических свойств поровой жидкости (ρ_1). Нижняя граница высокочастотного диапазона определяется необходимостью приближения $\epsilon_{вч}$ к высокочастотным асимптотическим значениям, зависящим от объемной влажности породы ($\text{tg}\delta < 1$).

Для определения удельного сопротивления поровой жидкости и расчета параметра ρ/ρ_1 целесообразно проводить измерения на частотах, где значения $\text{tg}\delta \approx 1$. Такой выбор частоты поля, с одной стороны, обеспечивает примерно одинаковую точность измерения активной и реактивной составля-

ющих комплексной электропроводности, с другой стороны, позволяет определять значения ρ_1 на частотах, где дисперсия удельного сопротивления свободных растворов практически незаметна.

Выводы

1. В диапазоне частот 10^4 – $5 \cdot 10^8$ Гц экспериментально исследованы взаимосвязи коэффициента проницаемости с электрическими свойствами для 50 образцов керна при полном насыщении водными растворами NaCl с различной концентрацией.

2. Установлено существование тесной связи между коэффициентом проницаемости пород, их относительным удельным сопротивлением (ρ/ρ_1) и частотной дисперсией диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{нч}/\epsilon_{вч}$). Физическая основа данной связи — эффект Максвелла—Вагнера, проявляющийся в увеличении частотной дисперсии по мере роста асимметрии и степени закрытости поровых каналов.

3. Обоснована и опробована методика определения коэффициента проницаемости пород по данным многочастотных измерений составляющих комплексной электропроводности (ϵ и ρ). Среднее значение относительной погрешности определения коэффициента проницаемости $\pm 25\%$ в диапазоне значений $K_{пр}$ от 0,5–1500 мД.

4. Измерение обеих составляющих полной электропроводности в широком частотном диапазоне позволяет получать ценную информацию о компонентном составе и структурных особенностях горных пород.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 02-05-65079, гранта Минобразования РФ Е 02-8.0-66 и ФЦП «Интеграция», проект Б-055.

ЛИТЕРАТУРА

1. Талалов А.Д., Даев Д.С., Златина Г.И. Исследование электрических свойств водонасыщенных образцов горных пород в широком частотном диапазоне // Изв. вузов. Геология и разведка. 1991. № 8. С. 40–48.
2. Талалов А.Д., Даев Д.С. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород // Физика Земли. 1996. № 8. С. 56–66.
3. Талалов А.Д., Даев Д.С. Определение влажности и глинистости горных пород по результатам измерений электрических свойств на различных частотах // Изв. вузов. Геология и разведка. 1999. № 2. С. 78–95.
4. Талалов А.Д., Даев Д.С. Взаимосвязь частотной дисперсии электрических параметров горных пород с их петрофизическими характеристиками // Изв. вузов. Геология и разведка. 2003. № 5. С. 52–57.
5. Knight, R., and Brown, E. Can accurate estimates of permeability be obtained from measurements of the dielectric properties? // Environmental and Engineering Geophysical Society. 1995. P. 25–35.

Московский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — А.Д. Каринский