

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СЛАБОЗАСОЛЕННЫХ ПЕСКОВ

П.П. Бобров, Т.А. Беляева, Е.С. Крошка, О.В. Родионова

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

Приведены результаты экспериментальных измерений комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) песка и порошков кварцевых гранул со средними размерами частиц (по массе) от 5 до 250 мкм, насыщаемых дистиллированной водой и солевыми растворами NaCl с проводимостью до 0.77 См/м. Измерения спектров КДП проводились в диапазоне частот от 1 кГц до 8.5 ГГц. Моделирование спектров на частотах выше 1 ГГц производилось с помощью рефракционной трехкомпонентной модели смеси. В диапазоне частот от 10 кГц до 1 ГГц спектры КДП моделировались тремя релаксационными процессами с использованием формул Дебая и Коул-Коула. Показано, что удельная электропроводность (УЭП) образцов на частоте около 5 кГц не пропорциональна УЭП насыщающего раствора. Интенсивности двух низкочастотных процессов имеют более тесные корреляционные связи с УЭП образцов, чем с объемной долей раствора. Времена релаксации низкочастотного и высокочастотного процессов статистически связаны со средними размерами частиц, а время релаксации низкочастотного процесса еще и с удельной поверхностью. Определены значения проводимости насыщающего раствора, при которых корреляционная связь является наиболее тесной.

Комплексная диэлектрическая проницаемость, удельная электропроводность, засоленные пески, процессы диэлектрической релаксации

DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF SLIGHTLY SALINE SANDS

P.P. Bobrov, T.A. Belyaeva, E.S. Kroshka, O.V. Rodionova

We present results of experimental measurements of the complex dielectric permittivity (CDP) of sand and powdered quartz granules with mass-averaged particle sizes of 5 to 250 μm , saturated with distilled water and NaCl solutions with a conductivity of up to 0.77 S/m. The CDP spectra were measured in the frequency range from 1 kHz to 8.5 GHz. The spectra at frequencies above 1 GHz were simulated using a refractive three-component mixture model. In the frequency range from 10 kHz to 1 GHz, the CDP spectra were simulated by three relaxation processes, using the Debye and Cole-Cole formulas. It is shown that the conductivity of the sample at a frequency of ~ 5 kHz is not proportional to the conductivity of the saturating solution. The intensities of two low-frequency processes are more intimately correlated with the conductivity of the sample than with the volume fraction of the solution. The relaxation times of the low-frequency and high-frequency processes are statistically correlated with the average particle size, and the relaxation time of the low-frequency process is additionally correlated with the specific surface area of the particles. We estimated the conductivity of the saturating solution at which the correlation is the strongest.

Complex dielectric permittivity, conductivity, saline sands, dielectric-relaxation processes

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; Бобров и др., 2015; Черемисин и др., 2018].

Электрические и электромагнитные геофизические методы нацелены на предоставление информации о структурных и минералогических характеристиках пород, о свойствах насыщающих флюидов [Binley et al., 2005; Revil et al., 2013]. Изучение природы, интенсивности и частотной зависимости различных процессов диэлектрической релаксации, которые могут иметь место в породах, являются одной из стратегий, способных помочь получить такую информацию [Revil, 2013].

В работе [Loewer et al., 2017] рассмотрены возможные релаксационные процессы, возникающие во влажных породах в частотном диапазоне от единиц миллигерц до десятков гигагерц. С уверенностью можно выделить процессы в высокочастотной области. Это ориентационная поляризация молекул свободной воды и связанной воды. Согласно многочисленным исследованиям, времена релаксации этих

процессов различаются в 1.5—3.0 раза. Преобладающее влияние этих процессов на комплексную диэлектрическую проницаемость (КДП) наблюдается на частотах выше 1 ГГц. Диэлектрические характеристики влажных пород на частотах ниже сотен мегагерц вплоть до единиц килогерц традиционно объясняются релаксационными явлениями Максвелла—Вагнера (МВ), вызываемыми поляризацией межфазных границ [Chen, Or, 2006]. МВ-поляризация вызвана образованием под действием поля распределений свободных зарядов вблизи межфазных границ и обычно влияет на КДП по разным данным в диапазоне частот выше 100 Гц или выше 5 кГц [Leroy et al., 2008; Arcone et al., 2016]. На низкочастотную часть спектра преобладающее влияние оказывают поляризация двойного электрического слоя (ДЭС), особенно его внутренней части, называемой слоем Штерна [Revil, Skold, 2011], и МВ-процессы. Частоты этих процессов накладываются друг на друга.

На частотах в доли герц могут существовать релаксационные явления, вызванные мембранной поляризацией [Titov et al., 2010]. Нужно отметить, что вследствие широкого диапазона размеров пор и частиц многофазной среды релаксационные явления, вызываемые разными причинами, перекрывают друг друга. Это усложняет процесс определения параметров релаксационных процессов и выявления их связи с петрофизическими характеристиками пород.

На низких частотах диэлектрические свойства пород достаточно хорошо изучены в связи с применением явления вызванной поляризации (ВП) для исследования геологических сред. Для изучения ВП используются также измерения в частотной области, которые гораздо удобнее проводить в лабораторных условиях. Для инверсии частотных данных во временные теоретически необходимо проводить измерения в частотном интервале от нуля до бесконечности. На практике проводят измерения на частотах от миллигерц до 100—1000 Гц [Tarasov, Titov, 2007]. Достаточно полный обзор применения метода ВП дан в работе [Kemna et al., 2012]. Отмечено, что значительный прогресс был достигнут в течение последнего десятилетия в понимании микроскопических механизмов спектральной ВП. Тем не менее развитие интегрированных механистических моделей с участием различных процессов поляризации в масштабах зерен (пор) остается сложной задачей.

Основные результаты исследований ВП, полученные российскими геофизиками в течение последних десятилетий, в сжатой форме описаны в работе [Каменецкий и др., 2014]. Большая часть исследований базируется на анализе поведения вещества с постоянными (в зависимости от частоты или времени становления поля) свойствами, а влиянию поляризации посвящены отдельные специальные исследования [Рыжов, 1987].

Многочисленные работы разных авторов выявляют связь комплексной удельной проводимости (КУП) или КДП на этих частотах с удельной поверхностью, размерами пор и гидравлической проницаемостью. Созданы разные модели этого явления, однако они основаны на конкретных предположениях, которые выполняются не для всех материалов.

Для оценки петрофизических характеристик пород используются измерения КДП или КУП, как правило, на низких частотах от долей герц до десятков килогерц [Kruschwitz et al., 2010; Revil et al., 2015; Niu et al., 2016]. Разные авторы характеризуют породы либо КУП σ^* (как правило, на низких частотах), либо КДП ε^* (как правило, на высоких частотах). Связь между этими величинами дается следующим уравнением:

$$\sigma^* = \sigma' + i\sigma'' = i\omega\varepsilon_0\varepsilon^* = i\omega\varepsilon_0(\varepsilon' - i(\varepsilon'' + \sigma_0/\omega\varepsilon_0)),$$

где σ' , ε' — действительные, а σ'' и ε'' — мнимые части КУП и КДП соответственно; $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота; $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная; σ_0 — удельная ионная проводимость; i — мнимая единица. Таким образом, действительная часть КУП связана с мнимой частью КДП выражением $\sigma' = \sigma_0 + i\omega\varepsilon_0\varepsilon''$, а мнимая часть КУП с действительной частью КДП выражением $\sigma'' = i\omega\varepsilon_0\varepsilon'$.

Информация о влиянии состава поровой жидкости на ВП позволила авторам работы [Weller et al., 2015] сопоставить результаты исследований 94 образцов, включая песчаники и неконсолидированный материал. Большинство образцов в базе данных были насыщены раствором NaCl с УЭП, близкой к 0.1 См/м. Для образцов, в которых электропроводность насыщающей жидкости отклонялась от этого значения, была проведена коррекция с использованием найденных взаимосвязей ВП и состава поровой жидкости. Установлено, что для песчаников пластовый коэффициент тесно связан с гидравлической проницаемостью (квадрат коэффициента корреляции равен 0.832) и практически не связан с мнимой частью КУП. Противоположная ситуация наблюдалась для неконсолидированных образцов, в которых мнимая КУП хорошо коррелировала с проницаемостью, а пластовый коэффициент нет.

Это исследование показывает, что невозможно разработать универсальную модель прогнозирования проницаемости, включающую только два геоэлектрических параметра. Для надежного прогнозирования проницаемости необходимы другие параметры, помимо тех, которые связаны с распределением

размера пор. На проницаемость влияют также шероховатость внутренней поверхности, содержание глины и связанность порового пространства.

Таким образом, сопоставление результатов разных авторов показывает, что даже при большом числе опубликованных работ метод вызванной поляризации в частотной области имеет ограниченное применение, определяемое типом породы.

На частотах выше 100 МГц диэлектрический метод наиболее успешно применяется для определения открытой пористости. Этому посвящено большое число публикаций. В частности, показано, что действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' на частоте 1.3 ГГц полностью насыщенных образцов зависит от пористости и насыщающего флюида [Myers et al., 1996]. Корреляционная связь ϵ' и пористости уменьшается с уменьшением частоты ниже 100 МГц из-за вкладов других механизмов поляризации, возникающих на более низких частотах [Beloborodov et al., 2017].

Из-за этого влияния диэлектрические свойства пород на частотах ниже сотен мегагерц до единиц килогерц до последнего времени не обнаруживают надежных связей с петрофизическими характеристиками пород. Ситуацию в этом диапазоне автор работы [Revil, 2013] называет наименее изученной.

На частотах от единиц до нескольких десятков мегагерц достаточно четко проявляется релаксационный процесс МВ, обусловленный поляризацией границ раздела фаз. Как правило, зарубежные авторы не уточняют, о каких границах идет речь. По нашему мнению, в песчаных породах за этот процесс отвечает поляризация границы раздела вода—воздух. Подтверждением данного предположения является тот факт, что этот эффект проявляется сильнее всего при средней водонасыщенности (60—80 % от пористости), когда площадь поверхности раздела вода—воздух достигает максимальных значений, и при увлажнении породы солевым раствором [Bobrov et al., 2015b, Belyaeva et al., 2017]. В некоторых случаях процесс имеет настолько большую интенсивность, что при уменьшении влажности пород одновременно с уменьшением действительной части КДП на частотах около 1 ГГц наблюдается ее возрастание в диапазоне частот 0.1—10.0 МГц. Средняя частота этого релаксационного процесса зависит от размера частиц. При увеличении их размеров релаксационный процесс перемещается вниз по частоте [Bobrov et al., 2017, 2018].

Для экспериментального исследования широкополосных спектров диэлектрической проницаемости используются разные методы. Низкочастотную часть спектра от миллигерц до 10 МГц исследуют с помощью спектрометров высокого разрешения фирмы Novocontrol Technologies [Saltas et al., 2013]. В высокочастотном диапазоне выше десятков мегагерц исследования в основном проводятся с помощью метода коаксиальных линий передачи с использованием векторных анализаторов параметров цепей [Gorriti, Slob, 2005].

Чтобы получить широкий частотный спектр, обычно объединяют два разных метода измерения частотно-зависимых электрических свойств влажных пористых материалов. В работе [Loewer et al., 2017] на частотах от 1 МГц до 45 кГц использовался пятиэлектродный метод измерения импеданса, а в диапазоне от 1 МГц до 10 ГГц — метод коаксиальных линий передачи. Для обоснования достоверности комбинации данных и для восстановления промежуточной части спектра применялось соотношение Крамерса—Кронига. В работе [Chen et al., 2014] для перекрытия диапазона от 1 МГц до 3 ГГц использовалась комбинация двух методов: открытого конца коаксиальной линии и коаксиальной линии передачи. К сожалению, комбинация методов измерения обычно сопровождается заменой измерительной ячейки и образца породы, который в нее помещается. Нами разработан метод измерения одного и того же образца в диапазоне частот от 20 Гц до 20 ГГц [Bobrov et al., 2015a]. Однако реально нижняя частота ограничивается электродной поляризацией, которая искажает результаты измерения на частотах ниже 10—20 кГц [Бобров и др., 2015].

Поляризация ДЭС приводит к частотно-зависимой комплексной поверхностной проводимости. Последняя зависит от плотности поверхностного заряда, поверхностной ионной подвижности и гранулометрического состава [Lesmes, Morgan, 2001]. Значения диэлектрической проницаемости среды увеличиваются с увеличением проводимости жидкости [Chen, Or, 2006; Kremer et al., 2016; Бобров и др., 2020].

В работах [Эпов и др., 2009, 2011; Бобров и др., 2013, 2015] приведены результаты измерений в широком частотном диапазоне диэлектрической проницаемости и проводимости песчано-глинистых смесей, насыщаемых флюидом нефть-солевой раствор. Показано сильное влияние содержания глины на частотах ниже 1 ГГц вследствие межслойной поляризации на границе вода—минерал, приводящей к значительному возрастанию действительной и мнимой частей КДП в породах с большой удельной поверхностью. При моделировании КДП образцов межслойная поляризация в образце учитывалась двумя областями диэлектрической релаксации, описываемой моделью Коул-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, обусловленные наличием меж-

фазной границы, диэлектрическим свойствам связанной воды, то удается создать диэлектрическую модель смеси, в которой возрастание КДП породы на частотах 0.1—1.0 ГГц объясняется в основном возрастанием КДП связанной воды и ее проводимостью [Миронов и др., 2013; González-Teruel et al., 2020].

В настоящей работе приведены результаты измерения КДП образцов песка и порошков кварцевых гранул разных размеров, насыщаемых солевым раствором невысокой концентрации, при которой УЭП пород не подчиняется уравнению Арчи—Дахнова. Целью работы является установление связи параметров процессов диэлектрической релаксации, влияющих на КДП образцов в диапазоне от 10 кГц до 8 ГГц, с удельной проводимостью образцов и размерами частиц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Были исследованы пять образцов песка и порошков кварцевых гранул, характеристики которых приведены в табл. 1, а распределение частиц по размерам — на рис. 1. Образец № 1 представлял собой речной песок из бассейна р. Иртыш, содержащий около 1.5 % глины. Образец № 2 — это фракция речного песка с размерами частиц от 0.08 до 0.18 мм, промытая в дистиллированной воде с целью удаления частиц глины. Остальные образцы — это кварцевые гранулы почти сферической формы. Измерение размеров частиц песка производилось рассеиванием на ситах, а кварцевых гранул — методом лазерной дифракции с более высокой дискретностью. Это позволило определить стандартное отклонение среднего размера и удельную поверхность. Образцы насыщались дистиллированной водой и солевыми растворами NaCl с концентрацией от 0.21 до 0.77 См/м. Проводимость раствора измерялась кондуктометром S700-K с модулем УЭП и датчиком InLab 731-ISM фирмы Mettler Toledo.

КДП образцов измерялась в коаксиальных ячейках сечением 16/6.97 мм и длиной 1 и 2 см в диапазоне частот от 10 кГц до 8.5 ГГц с помощью измерителя импедансов E4990A фирмы Keysight Technologies, перекрывающего диапазон частот от 20 Гц до 10 МГц, и векторных анализаторов цепей ZNB8 или ZNB20 фирмы Rohde & Schwarz, перекрывающих частотный диапазон от 100 кГц до 8.5 или 20 ГГц. Это позволяет измерять КДП веществ, помещаемых в коаксиальную ячейку, в диапазоне от 20 Гц до 8.5 или 20 ГГц, однако из-за электродной поляризации, искажающей результаты измерений в низкочастотной области, для анализа использовались данные, полученные на частотах выше 10 кГц. При измерениях образцы поддерживались при температуре 25 ± 0.3 °С с помощью климатической камеры ТН-МЕ-25 (Южная Корея). Методика измерений изложена в работах [Бобров и др., 2015; Bobrov et al., 2015a]. Погрешность измерения действительной части КДП ϵ' в диапазоне частот 10 кГц—8 ГГц составляла 0.2–5.0 % при УЭП образцов $\sigma_0 \leq 0.1$ См/м, повышаясь на частотах около 1 МГц и 1 ГГц до 6–7 %. Более высокая погрешность наблюдалась при измерении пород с УЭП выше 0.5 См/м и в диапазоне частот 5–10 МГц и достигала 12 %. Погрешность измерений мнимой части КДП ϵ'' не превышала 3% во всем диапазоне частот.

Измерения КДП производились при постепенном уменьшении влажности путем центрифугирования. Такой подход обоснован наличием гистерезиса диэлектрической проницаемости при увеличении и уменьшении влажности. Достижение полного насыщения осуществлялось в вакууме. Для этого в опорных шайбах коаксиальных ячеек были выполнены по несколько отверстий диаметром 0.8 мм для входа раствора с одной стороны и выхода воздуха — с другой. Через эти же отверстия последовательно удалялась вода при центрифугировании. Для достижения равномерного распределения раствора в образце

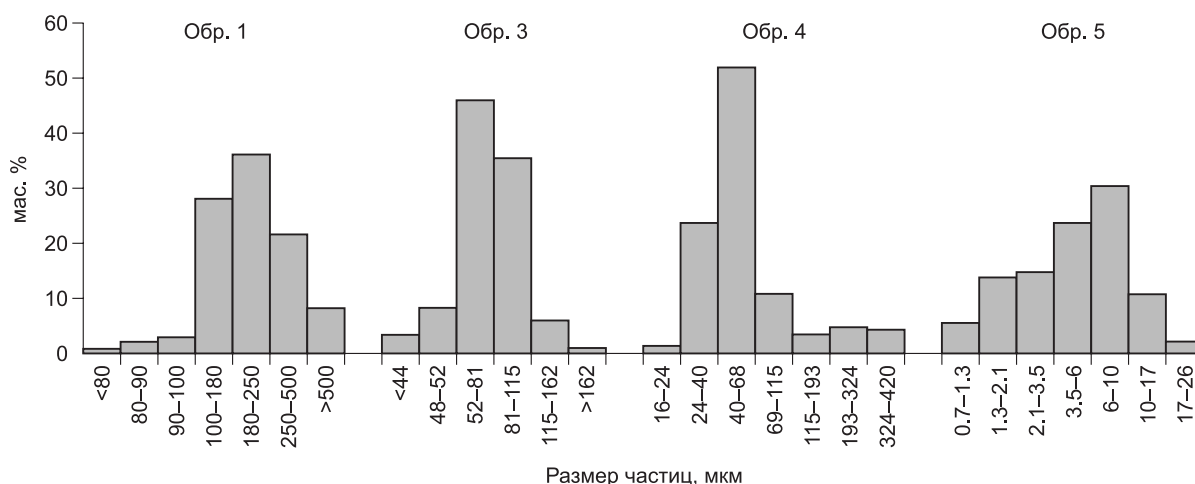


Рис. 1. Распределение частиц по размерам.

Таблица 1.

Физические характеристики образцов

№ образца	Описание	Средний размер частиц, мкм	Плотность сухого сложения, г/см ³	Пористость (объемная доля)	Удельная поверхность S_y , м ² /см ³
1	Речной песок	250	1.48—1.59	0.39—0.43	—
2	Фракция речного песка	130	1.51—1.55	0.40—0.42	—
3	Кварцевые гранулы	118 ± 42	1.41—1.47	0.43—0.46	0.064 ± 0.007
4	»	71 ± 11	1.45—1.50	0.42—0.44	0.13 ± 0.02
5	»	5.34 ± 3.41	1.40—1.46	0.44—0.46	1.88 ± 0.06

каждый этап центрифугирования проводился при неоднократном перевороте ячейки в центрифуге. Для контроля равномерности распределения раствора вдоль образца проводилось измерение коэффициента отражения сигнала с двух сторон ячейки. Перед каждым измерением определялась масса ячейки с образцом. По окончании образец высушивался в течение четырех часов при 105 °С для определения плотности сухого сложения и объемной доли раствора при каждом промежуточном измерении. Масса в процессе измерений и после высушивания измерялась с помощью электронных весов ВЛ-210 завода Госметр.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рисунках 2—4 приведены частотные зависимости действительной части КДП ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$ трех образцов, насыщаемых дистиллированной водой и водным раствором соли NaCl с УЭП $\sigma_w = 772$ мСм/м.

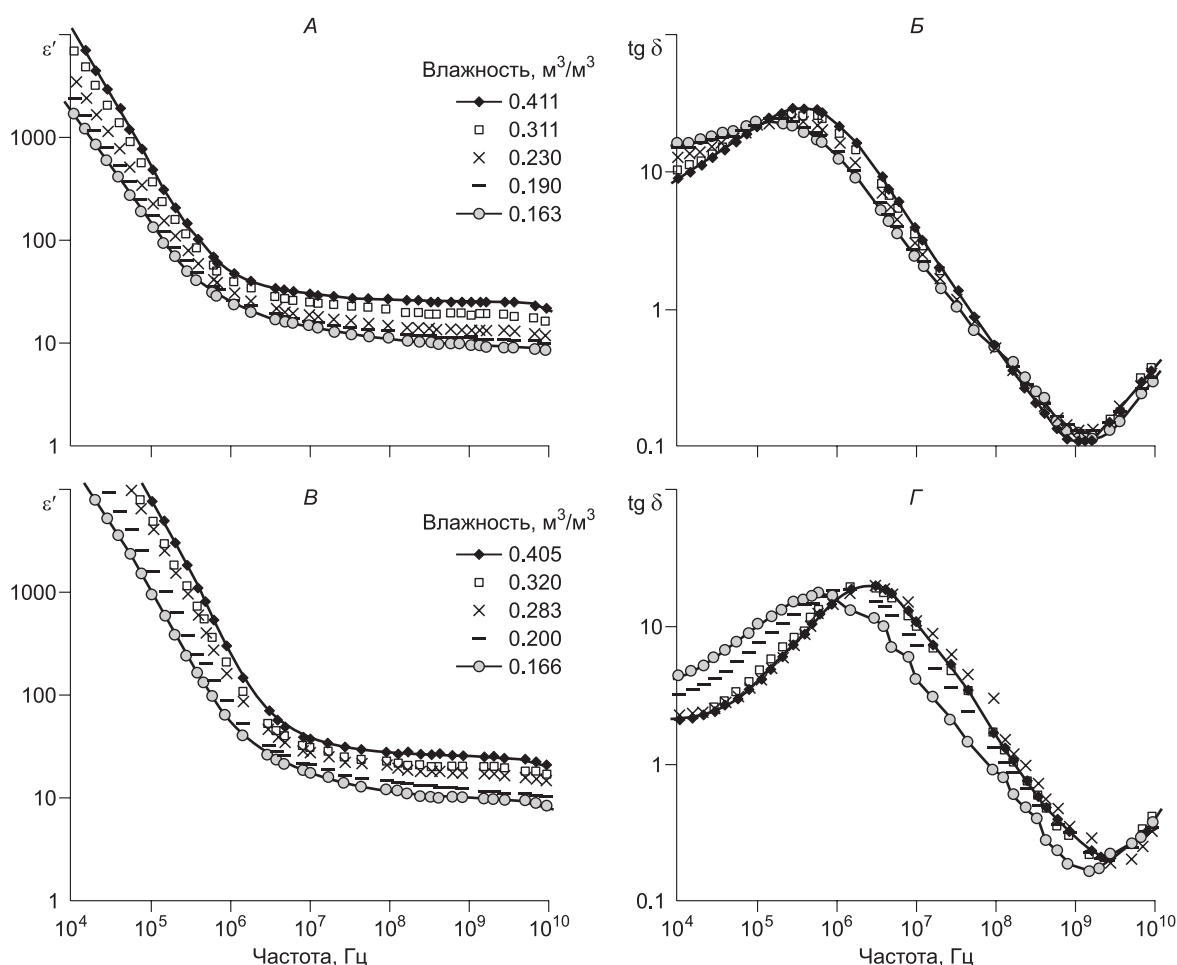


Рис. 2. Частотные зависимости действительной части КДП (А, В) и тангенса угла диэлектрических потерь (Б, Г) обр. № 1 при насыщении дистиллированной водой (А, В) и солевым раствором с УЭП, равным 772 мСм/м (Б, Г).

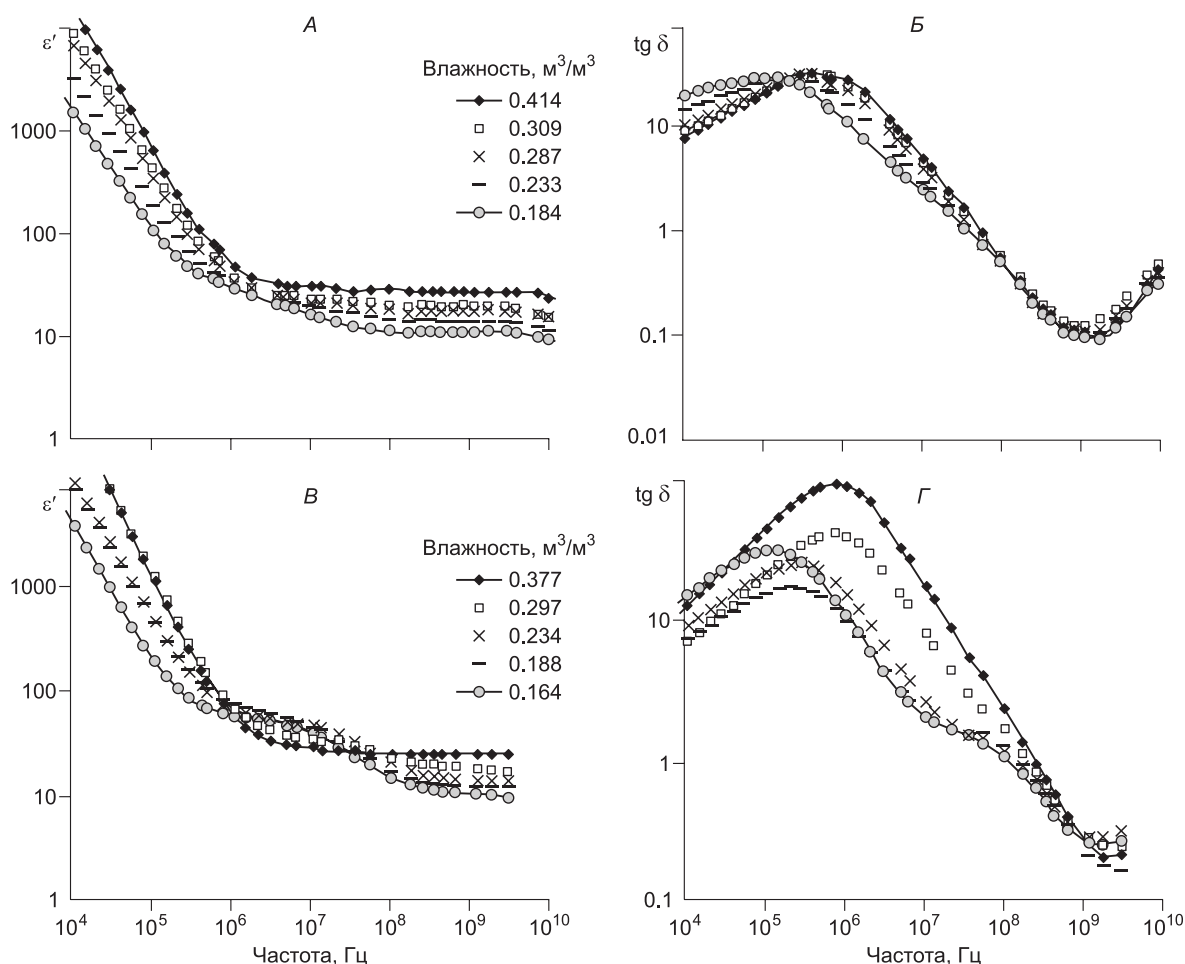


Рис. 3. Частотные зависимости действительной части КДП (А, В) и тангенса угла диэлектрических потерь (Б, Г) обр. № 4 при насыщении дистиллированной водой (А, Б) и солевым раствором с УЭП, равным 772 мСм/м (В, Г).

Действительная часть КДП ϵ' речного песка (обр. № 1) равномерно возрастает при увеличении доли воды или раствора во всем частотном диапазоне (см. рис. 2, А, В). На частотах ниже 10 МГц наблюдается возрастание значений ϵ' , более сильное при насыщении солевым раствором, вызываемое поляризацией межфазных границ и релаксационными процессами. На частоте 10 кГц значения ϵ' при насыщении солевым раствором превышают соответствующие значения при насыщении водой более чем в 10 раз. На частотах выше 100 МГц УЭП раствора практически не влияет на значения ϵ' , но приводит к возрастанию мнимой части КДП ϵ'' . Это отражается в увеличении значений $\text{tg } \delta$ на этих частотах (см. рис. 2, Б, Г). Слабое влияние УЭП раствора и релаксационных процессов проявляется на частотах до 1.5—2.5 ГГц, где наблюдается минимум $\text{tg } \delta$. Выше этой частоты преобладающее влияние на КДП оказывает ориентационная поляризация молекул свободной воды, приводящая к возрастанию значений $\text{tg } \delta$. Максимальные значения $\text{tg } \delta$ наблюдаются в мегагерцовом диапазоне, где существует сильный релаксационный процесс. Увеличение УЭП образца, вызванное как увеличением доли раствора, так и его УЭП приводит к смещению максимума $\text{tg } \delta$ вверх по частоте. Подобные зависимости КДП и $\text{tg } \delta$ наблюдаются у других образцов с крупными частицами (образцы № 2 и 3). Диэлектрические свойства этих образцов мы рассмотрим ниже при анализе релаксационных процессов.

На рисунке 3 показаны спектры значений КДП и $\text{tg } \delta$ обр. № 4 с меньшими размерами частиц. Действительная часть КДП во всем частотном диапазоне возрастает при увеличении доли дистиллированной воды (см. рис. 3, А), однако при небольших значениях доли воды (0.166, 0.2) в диапазоне от 0.4 до 20 МГц наблюдается локальное возрастание значений ϵ' , вызванное проявлением еще одного релаксационного процесса.

Оно приводит к тому, что на частоте 1.9 МГц при изменении доли воды от 0.18 до 0.41 значение ϵ' возрастает только в 1.5 раза, тогда как на более высокой частоте 1 ГГц это значение возрастает в 2.5

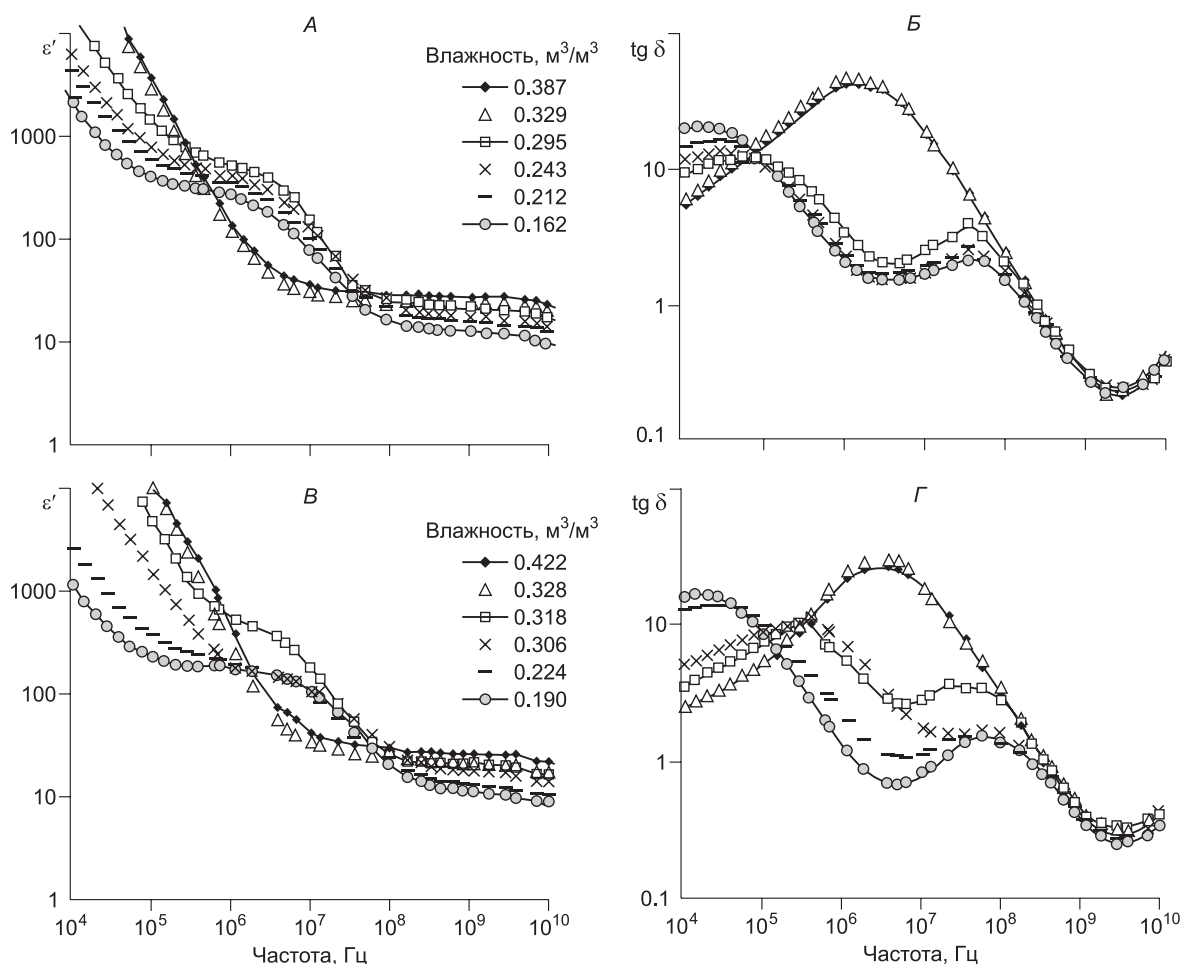


Рис. 4. Частотные зависимости действительной части КДП (А, В) и тангенса угла диэлектрических потерь (Б, Г) обр. № 5 при насыщении дистиллированной водой (А, Б) и солевым раствором с УЭП, равным 772 мСм/м (В, Г).

раза. Возрастание значений ϵ' особенно заметно при насыщении образца солевым раствором (см. рис. 3, В). В диапазоне от 1.5 до 20 МГц при максимальной доле раствора, равной 0.377, значения ϵ' меньше, чем при всех других значениях, включая значение 0.164. Наблюдается также резкое изменение характера частотных зависимостей $\operatorname{tg} \delta$ (см. рис. 3, Г). При изменении влажности происходит более заметное, чем у ранее рассмотренных спектров, изменение частоты максимума, а также уменьшение значений $\operatorname{tg} \delta$ при небольших влажностях в диапазоне частот, где наблюдается возрастание значений ϵ' .

Еще более сильным оказывается влияние среднечастотного релаксационного процесса на КДП обр. № 5 с самыми мелкими частицами (см. рис. 4). Диапазон частот, где он проявляется (4—55 МГц при насыщении дистиллированной водой и 0.7—100 МГц при насыщении солевым раствором), шире, чем в предыдущем образце, и смещен вверх по частоте. Резкие изменения частотных зависимостей ϵ' происходят при небольшом уменьшении доли воды от 0.329 до 0.295 (см. рис. 4, А) и раствора от 0.328 до 0.318 (см. рис. 4, В). Частотные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ при большой доле раствора или воды выглядят почти так же, как у образцов с большими размерами частиц, однако при уменьшении доли раствора вместо одного максимума возникают два четко выраженных максимума. Увеличение проводимости раствора при большой доле раствора приводит к увеличению значений ϵ' на частотах ниже 100 МГц, а при малой доле (менее 0.22) — к уменьшению этих значений (см. рис. 4, А, В).

Мы рассмотрели лишь часть измеренных спектров КДП, но этого достаточно, чтобы представить сложность зависимостей значений КДП в широком частотном диапазоне от размеров частиц, от доли и проводимости насыщающего раствора. Ниже мы приводим результаты анализа свойств релаксационных процессов, влияющих на КДП в этом частотном диапазоне.

МОДЕЛЬ КДП

При уменьшении частоты значения действительной и мнимой частей КДП непрерывно возрастают. Это вызвано как релаксационными МВ-процессами, так и поляризацией ДЭС. На первый взгляд более простые спектры КДП речного песка (см. рис. 2) на частотах ниже 20 МГц можно моделировать одним релаксационным процессом с широким распределением частот релаксации. Однако, как показала практика, лучшего согласования с результатами эксперимента можно получить, моделируя эту часть спектра КДП двумя релаксационными процессами. Низкочастотный процесс можно моделировать формулой Дебая, а среднечастотный — формулой Коул-Коула. В образцах с мелкими размерами частиц на частотах от 1 до 20–100 МГц сильное влияние на КДП оказывает третий релаксационный процесс. Для определения параметров релаксационных процессов мы использовали следующую модель КДП:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty}^* + \frac{\Delta\varepsilon_{S1}}{1 + (i\omega\tau_1)} + \frac{\Delta\varepsilon_{S2}}{1 + (i\omega\tau_2)^{(1-\alpha_2)}} + \frac{\Delta\varepsilon_{S3}}{1 + (i\omega\tau_3)^{(1-\alpha_3)}} - i \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}.$$

Здесь ε_{∞}^* — КДП образца на частотах выше 1 ГГц, определяемая по рефракционной модели смеси [Эпов и др., 2012], образованной твердыми частицами, воздухом и свободной водой; $\Delta\varepsilon_{S1}$, $\Delta\varepsilon_{S2}$ и $\Delta\varepsilon_{S3}$ — интенсивности (в зарубежной литературе используют термин strengths) 1, 2 и 3-го релаксационных процессов соответственно; τ_1 , τ_2 и τ_3 — времена релаксации; α_2 и α_3 — коэффициенты распределения времен релаксации 2-го и 3-го релаксационных процессов; $\omega = 2\pi f$, где f — частота; ε_0 — низкочастотная УЭП образца почвы, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — диэлектрическая постоянная; $i^2 = -1$.

Параметры модели определялись путем минимизации расхождения между экспериментальными и расчетными данными действительной и мнимой частей КДП. Подгонка выполнялась методом Ньютона с использованием инструмента «Поиск решения» программного пакета MS Excel. Вначале мы определяли значения ε_{∞}^* , положив интенсивности релаксационных процессов равными 0 и подбирая на частотах выше 1 ГГц значения действительной и мнимой частей показателя преломления ($n^* = n - ik$) твердой фазы. Эти показатели для всех образцов были почти одинаковы: $n = 1.45\rho$, $k = (0.01-0.07)\rho$, где ρ — плотность сухого сложения. КДП свободной воды описывали стандартной моделью Дебая. Поскольку низкочастотная проводимость практически не оказывает влияния на КДП на частотах выше 1 ГГц, УЭП свободной воды принималась равной 0.

Непрерывное возрастание действительной и мнимой частей КДП при уменьшении частоты затрудняет определение параметров 1-го, низкочастотного релаксационного процесса. Для упрощения задачи мы во всех случаях подбирали его интенсивность и время релаксации в диапазоне частот от 10 до 100 кГц таким образом, чтобы расхождение между экспериментальными и расчетными значениями ε' на частоте 7.8 кГц всегда составляло 20 ± 0.1 %. Одновременно находилась УЭП образца ε_0 . При этом на частотах выше 10 кГц расхождение значений ε' и ε'' обычно не превышало 5–7 %. Так фактически

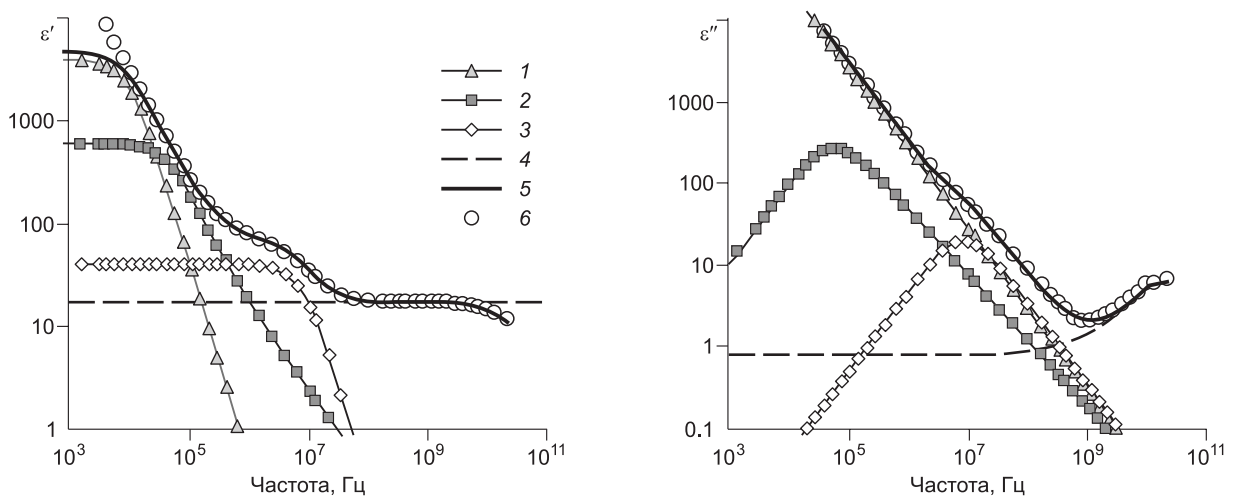


Рис. 5. Иллюстрация процесса моделирования КДП обр. № 4 при влажности $0.283 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и плотности в сухом состоянии $1.5 \text{ г}/\text{см}^3$.

1–3 — вклады соответствующих релаксационных процессов, 4 — вклад высокочастотного предела ε_{∞}^* , 5 — полная модель, включающая УЭП образца, 6 — эксперимент.

определялась лишь часть многочастотного процесса, обусловленного разными причинами, однако единообразие подхода в применении ко всем образцам позволило связать параметры процесса с размерами частиц, долей насыщающего раствора и его УЭП.

Параметры 2-го (среднечастотного) и 3-го (высокочастотного) процессов подбирались во всем частотном диапазоне от 10 кГц до 8.5 ГГц. Вначале мы выбирали приближенные значения параметров «вручную», учитывая особенность частотных зависимостей. Времена релаксации мы оценивали из графиков тангенса угла диэлектрических потерь. Частоты, на которых наблюдаются максимумы, приближенно равны частотам релаксации $f_{rel} = (2\pi\tau)^{-1}$. Поскольку частотные диапазоны трех релаксационных процессов перекрывались, процедура подгонки повторялась несколько раз. По окончании процедуры максимальное различие между расчетными и экспериментальными значениями не превышало 10 % для ϵ' и ϵ'' во всем частотном диапазоне. Относительное среднеквадратичное отклонение не превышало 5 %. Вклады УЭП, трех релаксационных процессов и высокочастотной диэлектрической проницаемости ϵ_∞^* в действительную и мнимую части КДП обр. № 4 показаны на рис. 5. Видно, что релаксационные процессы практически не влияют на действительную часть КДП этого образца на частотах выше 100 МГц, но влияние этих процессов на мнимую часть КДП обнаруживается вплоть до частоты 2 ГГц.

ПАРАМЕТРЫ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Найденные в процессе подбора зависимости параметра σ_0 от влажности (объемной доли раствора) образцов показаны на рис. 6. Значения этого параметра приближенно равны реальной УЭП образцов на частоте около 5 кГц. В образцах с крупными размерами частиц (№ 1 и 2) наблюдаются близкие к линейным зависимости σ_0 от влажности. При увеличении УЭП насыщающего раствора σ_w , как правило, возрастает и УЭП образцов. Однако есть исключения. При возрастании УЭП раствора от 0 (дистиллированная вода) до 212 мСм/м УЭП обр. № 1 при влажности менее 0.3 м³/м³ не возрастает, а при более высокой влажности даже немного уменьшается; УЭП обр. № 2 практически не изменяется при возрастании σ_w от 212 до 320 мСм/м.

УЭП образцов возрастает при уменьшении размеров частиц. В образцах № 3—5 наблюдается более крутое возрастание значений σ_0 , особенно отчетливо заметное в обр. № 5 с самыми мелкими частицами. При доле раствора выше 0.3 УЭП этого образца резко возрастает в несколько раз, что объясняется явлением перколяции: возникновением непрерывных капилляров в объеме образца, через которые осуществляется проводимость. Доля раствора, когда возрастает УЭП (порог перколяции), практически не зависит от концентрации раствора.

Сравним зависимости УЭП образцов от проводимости раствора при насыщении, близком к полному (при доле раствора 0.38—0.42). Такие зависимости приведены на рис. 7. При увеличении УЭП раствора нет монотонного возрастания УЭП образцов. Минимальные значения УЭП образцы № 1, 3 и 4 имеют при УЭП раствора, равной 212 мСм/м. У образца № 5 минимум наблюдается при УЭП раствора 320 мСм/м. У образца № 2 такого минимума нет, но при увеличении УЭП раствора от 212 до 320 мСм/м его проводимость не изменяется. В литературе есть объяснения нелинейной зависимости УЭП образца от концентрации раствора, измеренной на низких частотах порядка 1 Гц. По-видимому, эти объяснения пригодны и для частоты 5 кГц. При невысокой концентрации раствора, как и в нашем случае, проводимость образца осуществляется двумя путями: через объем раствора (объемная проводимость) и через ДЭС (поверхностная проводимость). Поверхностная проводимость включает проводимость как в слое Штерна, так и в диффузной части ДЭС. При увеличении концентрации раствора выше определенного предела толщина диффузного слоя уменьшается, приводя тем самым к уменьшению поверхностной проводимости. При этом общая проводимость может даже уменьшаться. При дальнейшем увеличении концентрации раствора возрастает роль объемной проводимости и общая УЭП образца возрастает. Из данных, приведенных на рис. 7, следует, что минимумы УЭП наблюдаются в образцах, где есть мелкие частицы. Удельная поверхность образца должна быть достаточной, чтобы обеспечить заметный вклад поверхностной проводимости.

На рисунке 8 показаны зависимости интенсивности 1-го и 2-го релаксационных процессов от УЭП образцов, а в табл. 2 приведены соответствующие регрессионные уравнения. Отметим, что регрессионные зависимости на графиках и в таблице не включают данные, полученные для образцов с крупными частицами (№ 1—3), при насыщении дистиллированной водой. Видно, что соответствующие точки лежат ниже регрессионных зависимостей.

Мы обнаружили, что зависимость интенсивностей процессов от УЭП σ_0 имеет более высокий коэффициент корреляции, чем зависимость от влажности. Это хорошо видно на примере обр. № 5, УЭП которого резко изменяется при небольшом изменении влажности, но зависимость интенсивности релаксационных процессов от УЭП является относительно гладкой. Зависимость от УЭП можно объяснить следующим образом. Значительный вклад в КДП на низких частотах вносит поляризация ДЭС, и про-

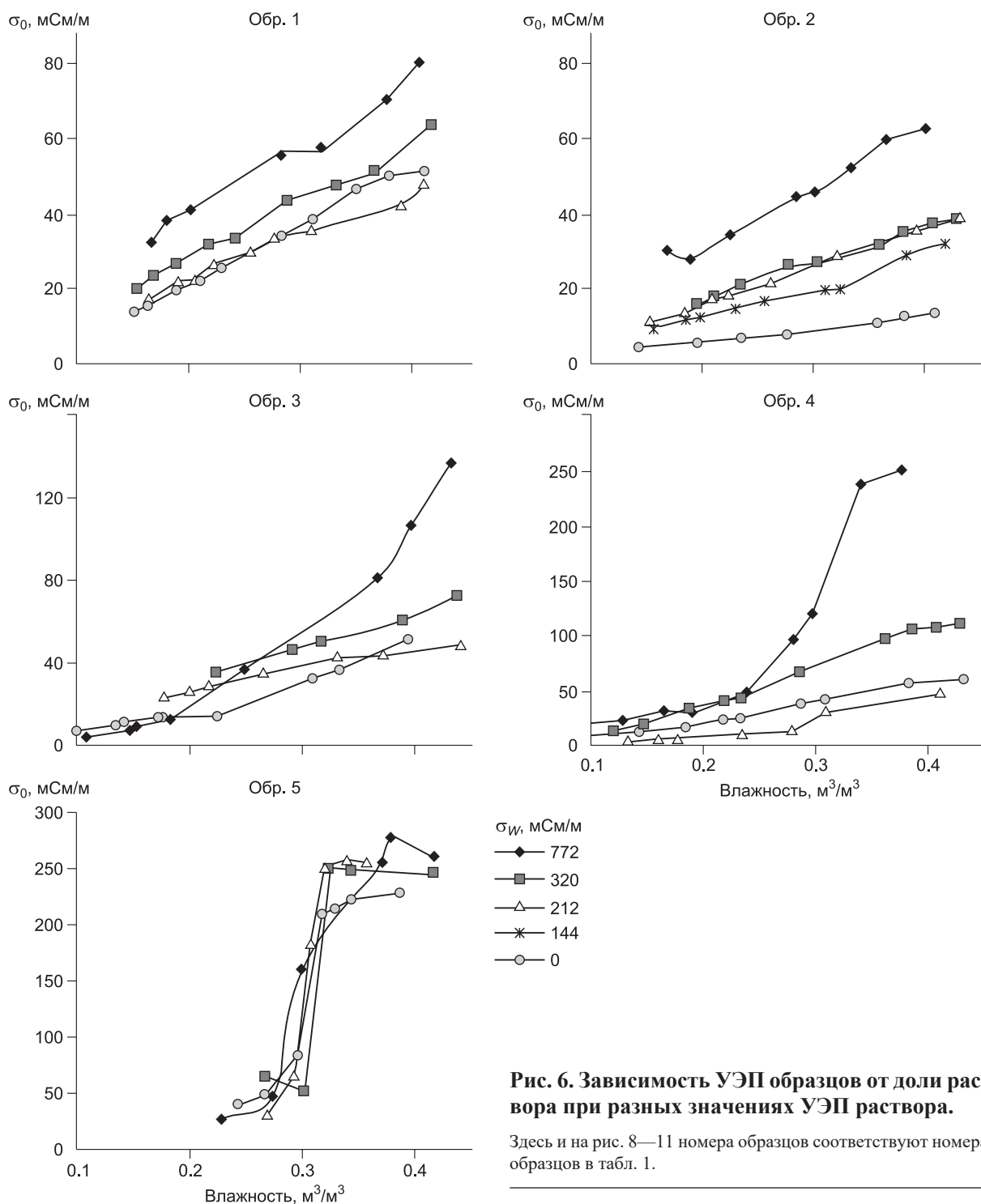


Рис. 6. Зависимость УЭП образцов от доли раствора при разных значениях УЭП раствора.

Здесь и на рис. 8—11 номера образцов соответствуют номерам образцов в табл. 1.

водимость образцов частично осуществляется внутри ДЭС. Таким образом, существенный вклад и в проводимость, и в диэлектрическую релаксацию вносят электрические свойства ДЭС. Корреляция не может быть очень высокой, так как и на проводимость, и на диэлектрическую релаксацию по отдельности влияют еще и другие, разные для этих явлений механизмы. Интенсивность 1-го релаксационного процесса имеет более высокую корреляцию с проводимостью, чем интенсивность 2-го процесса, поскольку поляризация ДЭС сильнее проявляется на низких частотах.

Графики, приведенные на рис. 8, отражают влияние размеров частиц на интенсивность релаксационных процессов. В образцах № 4 и 5 значения интенсивностей существенно выше. Интенсивность 3-го релаксационного процесса (рис. 9) не имеет четко выраженной зависимости от доли раствора и его УЭП. Можно заметить лишь, что в образцах с крупными частицами (№ 1, 3) значения $\Delta\epsilon_{S3}$ выше при

Рис. 7. Зависимость УЭП образцов от УЭП раствора при влажности, близкой к полному насыщению.

1–5 — номера образцов.

высокой УЭП раствора, а в образцах с мелкими частицами (№ 4, 5) они меньше. Кроме того, в мелких частицах значения $\Delta\varepsilon_{S3}$ выше при меньших влажностях. Обратим внимание на значительный рост интенсивности этого процесса при уменьшении размеров частиц.

Времена релаксации 1-го и 2-го процессов слабо зависят от доли и концентрации раствора и немного уменьшаются при увеличении среднего размера частиц. На рисунке 10 приведены зависимости этих параметров от доли раствора для образцов № 1 и 5, а на рис. 11 подобные зависимости коэффициента распределения времен релаксации второго процесса (1-й процесс моделировался формулой Дебая при $\alpha_1 = 0$). Значения α_2 убывают при увеличении влажности. Особенно это заметно в образцах с мелкими размерами. Значения α_3 существенно меньше, а при насыщении солевым раствором в большинстве случаев равны 0.

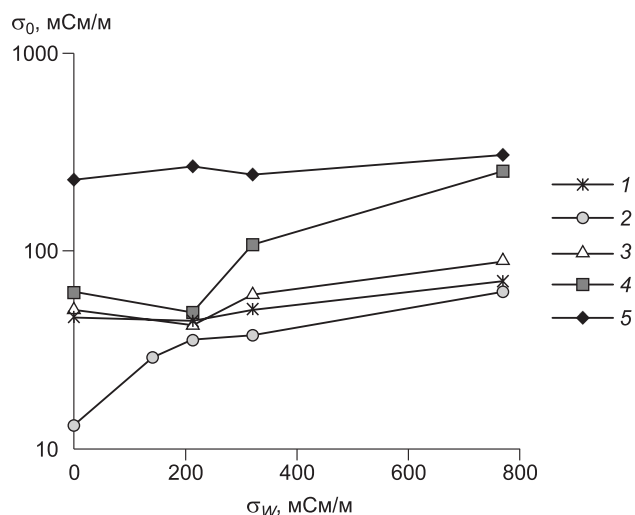


Таблица 2. Зависимости параметров релаксационных процессов от УЭП образцов

№ п/п	$\Delta\varepsilon_{S1}$	R^2	$\Delta\varepsilon_{S2}$	R^2
1	$116 \cdot \sigma_0^{1.58}$	0.918	$1.83 \cdot \sigma_0^{1.99}$	0.941
2	$62.0 \cdot \sigma_0^{1.78}$	0.955	$1.67 \cdot \sigma_0^{1.99}$	0.840
3	$256 \cdot \sigma_0^{1.20}$	0.824	$6.94 \cdot \sigma_0^{0.745}$	0.617
4	$53.9 \cdot \sigma_0^{1.45}$	0.959	$25.6 \cdot \sigma_0^{0.879}$	0.689
5	$54.1 \cdot \sigma_0^{1.46}$	0.969	$90.0 \cdot \sigma_0^{0.627}$	0.648

Таблица 3. Средние значения и стандартные отклонения параметров релаксационных процессов

№ образца	σ_W , мСм/м	τ_1 , мкс	$\delta(\tau_1)$, мкс	τ_2 , мкс	$\delta(\tau_2)$, мкс	τ_3 , нс	$\delta(\tau_3)$, нс	$\Delta\varepsilon_{S3}$	$\delta(\Delta\varepsilon_{S3})$
1	0	13.2	0.2	2.50	0.28	2.1	0.2	2.8	0.5
	212	10.2	0.4	2.21	0.09	2.9	1.1	2.8	0.2
	320	10.0	0.6	2.18	0.14	3.8	1.4	3.3	0.3
	772	8.0	0.4	1.74	0.11	1.5	0.8	3.4	0.5
2	0	14.3	0.1	1.85	0.27	5.6	3.2	2.5	0.9
	212	12.7	0.5	2.07	0.32	4.6	1.6	2.9	0.8
	320	11.7	0.4	2.65	0.19	3.3	2.2	3.6	0.7
	772	9.3	0.7	2.35	0.46	3.8	0.6	5.1	0.5
3	0	14.7	0.2	1.67	0.05	9.73	1.1	4.6	0.2
	212	13.5	0.3	1.81	0.04	1.1	0.3	3.7	0.6
	320	12.6	0.1	1.75	0.14	2.5	0.3	5.2	0.5
	772	10.3	0.6	1.13	0.34	3.6	2.5	3.8	0.7
4	0	15.4	0.3	3.82	0.31	15	7	6.5	1.2
	212	14.0	1.3	2.78	0.38	82	19	56	18
	320	13.4	0.5	2.36	0.41	7.0	0.8	8.3	1.6
	772	13	3	1.75	0.25	13	5	32	12
5	0	15.8	0.7	1.42	0.13	34	7	320	70
	212	18.8	1.8	2.4	1.2	10.1	1.7	140	30
	320	17.4	0.8	2.2	0.4	12	7	98	6
	772	20.5	0.3	1.9	0.3	17	2	160	20

Примечание. $\delta(X)$ — стандартное отклонение значений X .

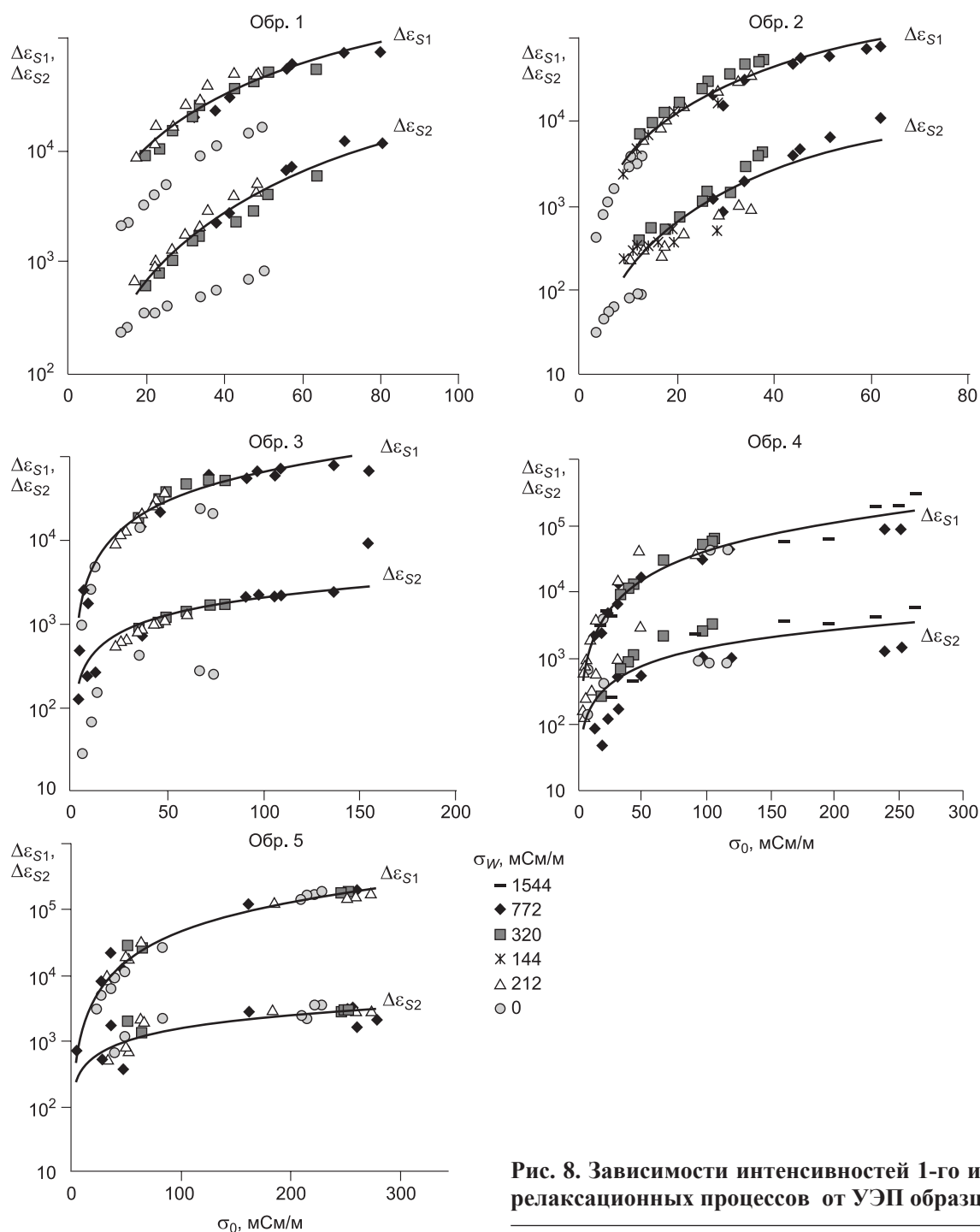


Рис. 8. Зависимости интенсивностей 1-го и 2-го релаксационных процессов от УЭП образцов.

Для выявления влияния размеров частиц на времена релаксации и интенсивность 3-го процесса мы находили средние значения. Для определения средних значений времен релаксации τ_1 и τ_2 мы использовали данные, полученные при влажностях выше $0.3 \text{ м}^3/\text{м}^3$, поскольку при этих величинах уже спектр частот релаксации (значения α меньше), а для параметров 3-го процесса, наоборот, применяли значения при влажностях ниже $0.3 \text{ м}^3/\text{м}^3$, так как в этом случае значения интенсивности этих процессов больше и времена релаксации определяются точнее. Полученные средние значения и стандартные отклонения приведены в табл. 3.

Время релаксации τ_1 уменьшается при увеличении концентрации раствора во всех образцах, кроме обр. № 5. Уменьшение τ_1 является следствием сдвига низкочастотной части спектра вверх по частоте, т. е. одновременно с возрастанием интенсивности происходит резкое возрастание действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей КДП в низкочастотной части диапазона. В образце № 5 возрастание ϵ' и ϵ'' объясня-

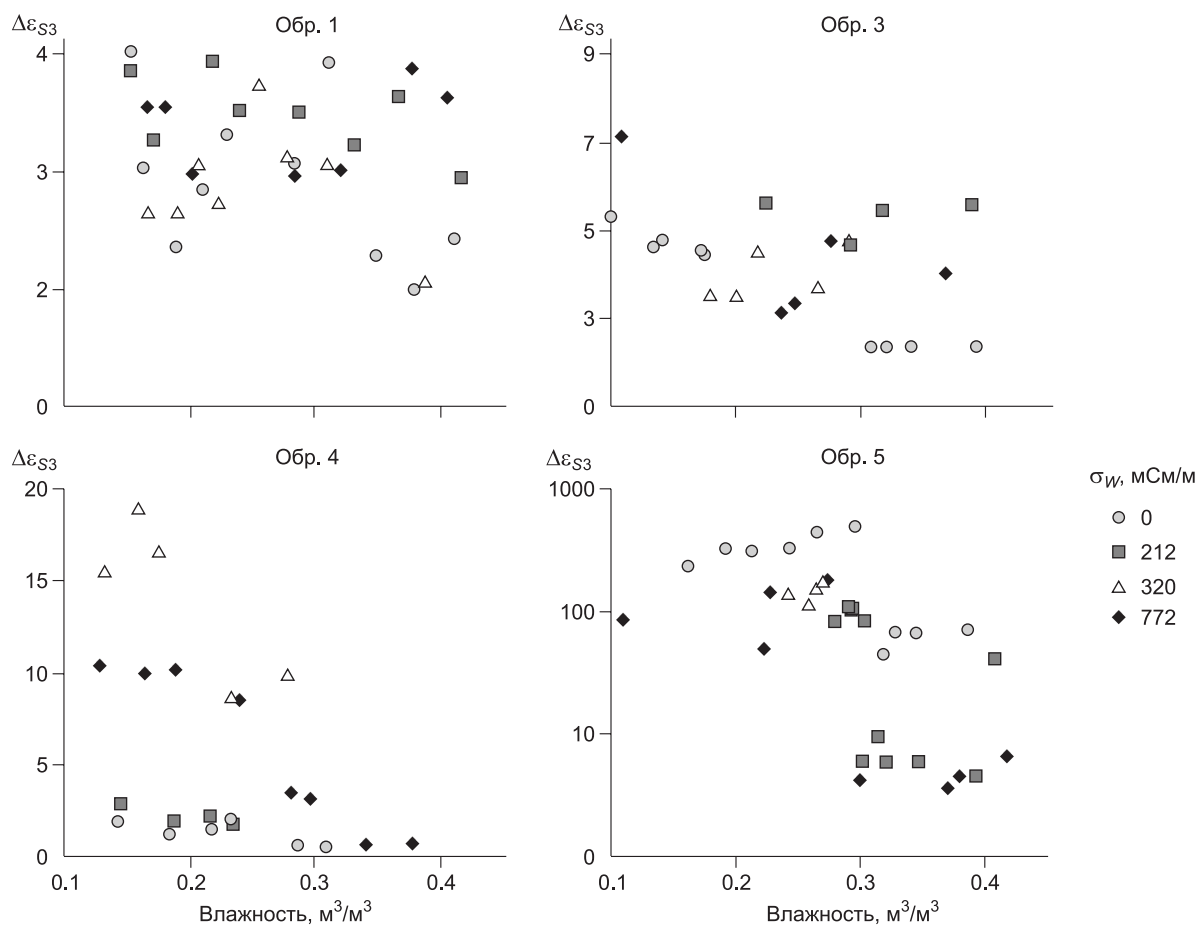


Рис. 9. Зависимости интенсивности 3-го релаксационного процесса от доли раствора при разных УЭП раствора.

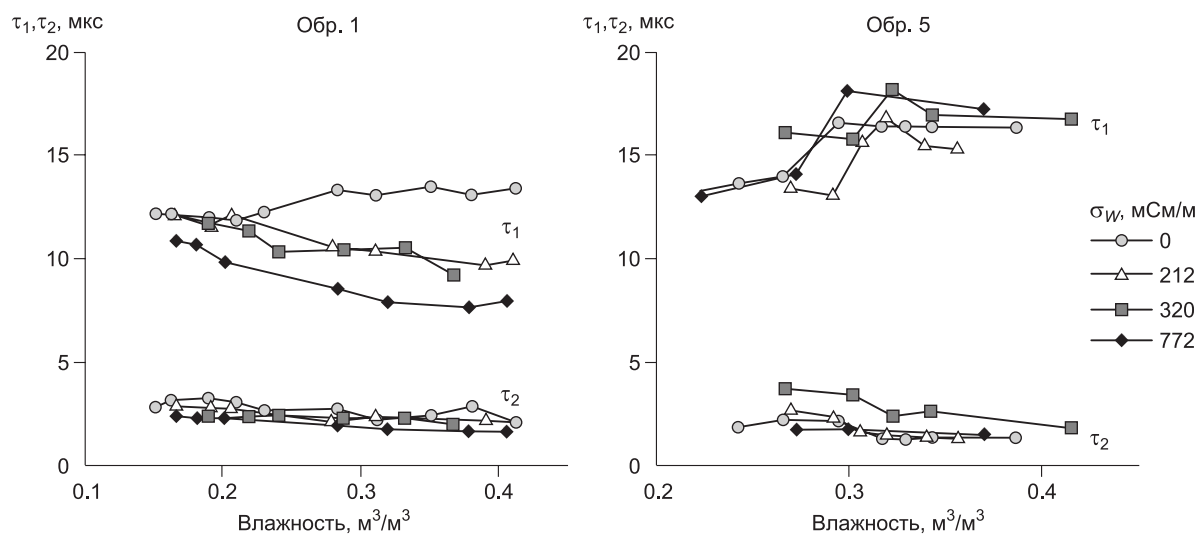


Рис. 10. Зависимости времен релаксации 1-го и 2-го процессов от доли раствора при разных УЭП раствора.

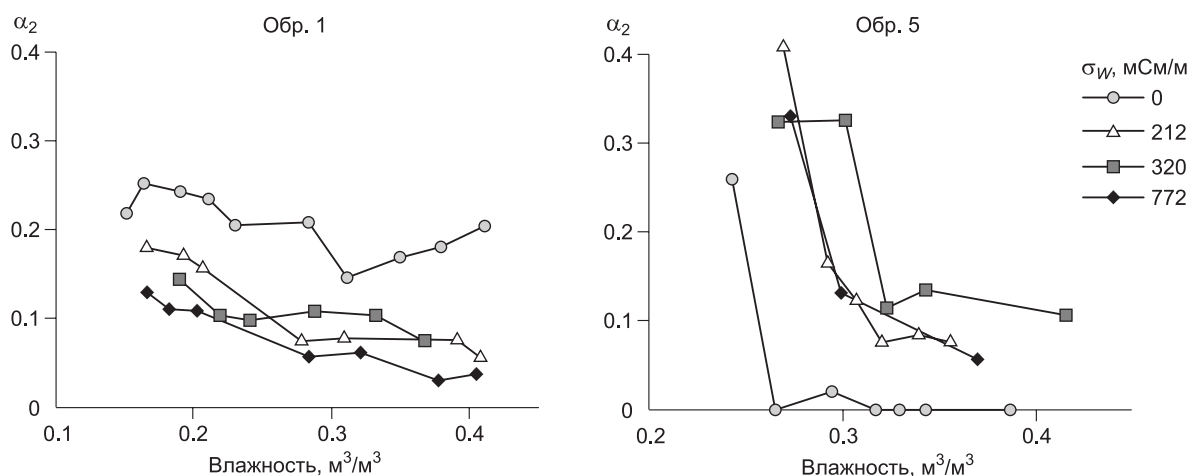


Рис. 11. Зависимости коэффициента распределения времен релаксации 2-го процесса от доли раствора.

ется ростом только $\Delta\epsilon_{s1}$, причем увеличение наблюдается только при большой доле раствора (см. рис. 4, 8). В этом образце при доле раствора менее 0.3 происходит сильный релаксационный процесс со значениями интенсивности $\Delta\epsilon_{s3}$ более 100 ед.

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ОБРАЗЦОВ

Корреляционный анализ данных, приведенных на рис. 8 и в табл. 3, показал, что некоторые параметры релаксационных процессов имеют тесную корреляционную связь с размерами частиц и удельной поверхностью. В таблицах 4—6 приведены регрессионные уравнения, связывающие параметры процессов с размерами частиц и удельной поверхностью образцов № 3—5. Характеристики этих образцов определялись методом лазерной дифракции с более высокой точностью, чем при рассеивании по ситам. Приведены только те уравнения, которые обеспечивают высокие значения квадрата коэффициента корреляции. Так, интенсивность 1-го процесса $\Delta\epsilon_{s1}$ наилучшим образом коррелирует с размерами частиц при насыщении солевым раствором с УЭП, равной 320 и 770 мСм/м, а интенсивность 3-го процесса $\Delta\epsilon_{s1}$ — при УЭП, равной 0 (дистиллированная вода) и 320 мСм/м (см. табл. 4). Оказалось, что параметры 2-го процесса имеют слабые корреляционные связи с характеристиками образцов и поэтому не приводятся.

Таблица 4. Уравнения зависимостей интенсивностей релаксационных процессов от среднего размера частиц

σ_w , мСм/м	$\Delta\epsilon_{s1}$	R^2	$\Delta\epsilon_{s3}$	R^2
0	—	—	$3.31 \cdot 10^3 \cdot d^{-1.415}$	0.998
320	$3.05 \cdot 10^5 \cdot d^{-0.286}$	0.997	$4.81 \cdot 10^2 \cdot d^{-0.950}$	0.994
772	$4.02 \cdot 10^5 \cdot d^{-0.471}$	0.978	—	—

Примечание. Размеры частиц d в мкм.

Таблица 5. Уравнения зависимостей времен релаксации от среднего размера частиц

σ_w , мСм/м	τ_1 , мкс	R^2	τ_3 , нс	R^2
0	—	—	$-2.20 \cdot 10^{-1} \cdot d + 33.84$	0.994
212	$-4.87 \cdot 10^{-2} \cdot d + 18.59$	0.887	—	—
320	$-4.38 \cdot 10^{-2} \cdot d + 17.30$	0.929	$-8.38 \cdot 10^{-2} \cdot d + 12.60$	0.996
772	$-9.21 \cdot 10^{-2} \cdot d + 20.56$	0.971	$-1.15 \cdot 10^{-1} \cdot d + 18.67$	0.899

Примечание. Размеры d частиц в мкм.

Таблица 6. Уравнения зависимостей параметров процессов от удельной поверхности

$\sigma_{\text{пр}}, \text{мСм/м}$	$\tau_1, \text{мкс}$	R^2	$\Delta\epsilon_{\text{сз}}$	R^2
212	$8.69 \cdot S_y^{0.102}$	0.990	$38.15 \cdot \ln S_y - 143.6$	0.965
320	$8.40 \cdot S_y^{0.097}$	0.997	$29.33 \cdot \ln S_y - 124.6$	0.998
772	$4.75 \cdot S_y^{0.196}$	0.981	$47.00 \cdot \ln S_y - 193.9$	0.979

Примечание. Удельная поверхность S_y в $\text{м}^2/\text{см}^3$.

С помощью уравнений, связывающих параметры процессов с размерами частиц d , приведенных в табл. 4 и 5, рассчитаны средние значения размеров частиц в образцах № 1 и № 2. Для образца № 1 получено значение 145 ± 25 мкм, для обр. № 2 — 131 ± 18 мкм. Если для обр. № 2 рассчитанное значение хорошо согласуется с приведенным в табл. 1, то для обр. № 1 оно значительно меньше. Образец № 1 отличается от других широким спектром распределения частиц по размерам, содержит много крупных частиц, вследствие чего средний размер, рассчитанный по массе, является высоким. Диэлектрическая релаксация обусловлена поляризацией границ раствор—минерал и зависит от удельной поверхности минерала, основной вклад в которую дают мелкие частицы. Возможно, что диэлектрическим методом лучше оценивать средний размер частиц не по массе, а по количеству.

С помощью уравнений, связывающих τ_1 с удельной поверхностью S_y , приведенных в табл. 6, рассчитаны средние значения S_y в образцах № 1 и 2. Для обр. № 1 получено значение $0.008 \pm 0.005 \text{ м}^2/\text{см}^3$, для № 2 — $0.034 \pm 0.006 \text{ м}^2/\text{см}^3$. При использовании уравнений связи с $\Delta\epsilon_{\text{сз}}$ получены следующие значения: 0.064 ± 0.016 и $0.065 \pm 0.016 \text{ м}^2/\text{см}^3$ для образцов № 1 и 2 соответственно. Такое различие объясняется тем, что третий релаксационный процесс вызван поляризацией границы раствор—воздух, площадь которой практически не связана с площадью поверхности минерала. Поэтому данные, полученные при использовании времени релаксации 1-го процесса τ_1 , являются более достоверными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены спектры КДП пяти образцов песка и порошков кварцевых гранул в диапазоне частот от 10 кГц до 8.5 ГГц. Образцы со средними размерами частиц (по массе) от 5.3 до 250 мкм насыщались дистиллированной водой и растворами соли NaCl с УЭП от 0.21 до 0.77 См/м. При моделировании спектров на частотах выше 1 ГГц использовалась трехкомпонентная (вода, воздух и твердая фаза) рефракционная модель смеси, в которой частотные свойства КДП воды с нулевой УЭП описывались моделью Дебая. На частотах ниже 1 ГГц спектры КДП описывались тремя релаксационными процессами.

Обнаружено, что УЭП образцов на частоте 5 кГц не пропорциональна УЭП раствора, а имеют минимумы при УЭП раствора 200—300 мСм/м. Кроме того, значения интенсивностей 1-го (низкочастотного) и 2-го (среднечастотного) процессов имеют более тесную корреляционную связь с УЭП образцов, чем с долей раствора. Дано объяснение этих особенностей. Интенсивность 3-го релаксационного процесса не имеет четко выраженной связи ни с долей раствора, ни с УЭП образца, однако имеется тенденция увеличения значений при доле раствора менее 0.25—0.30 и резкое возрастание в образцах с малыми размерами частиц.

Времена релаксации мало изменяются при изменении доли раствора и его УЭП, однако имеется тесная корреляционная связь средних значений, полученных при доле раствора выше 0.3 с размерами частиц. С использованием более точных данных о средних размерах частиц и удельной поверхности порошков кварцевых гранул найдены соответствующие характеристики для песков. Результаты исследования свидетельствуют о перспективности диэлектрического метода для исследования петрофизических характеристик рыхлых пород.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-05-00395).

ЛИТЕРАТУРА

Аксельрод С.М. Новые тенденции в диэлектрическом каротаже (по материалам зарубежной печати) // Каротажник, 2012, № 4, с. 78—112.

Бобров П.П., Лапина А.С., Репин А.В. Влияние связанной воды на комплексную диэлектрическую проницаемость нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород // Каротажник, 2013, № 8 (230), с. 56—68.

Бобров П.П., Миронов В.Л., Репин А.В. Спектры диэлектрической проницаемости нефтеводонасыщенных песчано-глинистых пород различного минералогического состава и релаксационные свойства воды в этих породах // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (7), с. 1359—1368.

Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В. Связь низкочастотной диэлектрической проницаемости с проводимостью слабозасоленных образцов песка // *Техника радиосвязи*, 2020, вып. 3 (46), с. 85—94.

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

Каменецкий Ф.М., Тригубович Г.М., Чернышев А.В. Три лекции о вызванной поляризации геологической среды. Мюнхен, Вела Ферлаг, 2014, 58 с.

Миронов 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.

Рыжов А.А. Основные закономерности вызванной поляризации горных пород // *Применение метода вызванной поляризации при поисках месторождений полезных ископаемых*. М., Изд-во МГРИ, 1987, с. 179—191.

Черемисин А.А., Васильев Ю.В., Оленченко В.В., Эпов М.И., Тойб Р.Е., Шнипов И.С., Широков С.В., Болтинцев В.Б. Возможности сверхширокополосной георадиолокации низкоомных геологических сред // *Геология и геофизика*, 2018, т. 59 (2), с. 256—267.

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.

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.

Эпов М.И., Бобров П.П., Миронов 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., Миронов 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.

Arcone S.A., Grant S.A., Boitnott G.E. Maxwell-Wagner relaxation in two desert soils at medium and high water contents: Interpretation from modeling of time domain reflectometry data // *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2016, v. 9 (1), p. 201—211.

Beloborodov R., Pervukhina M., Han T., Josh M. Experimental characterization of dielectric properties in fluid saturated artificial shales // *Hindawi Geofluids*, 2017, v. 2017, Article ID 1019461.

Belyaeva T.A., Bobrov P. P., Kroshka E.S., Repin A.V. Complex dielectric permittivity of saline soils and rocks at frequencies from 10 kHz to 8 GHz // *Proceedings of 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*, St. Petersburg, Russia, 22—25 May 2017, 2017, p. 3046—3051.

Binley A., Slater L.D., Fukes M., Cassiani G. Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone // *Water Resour. Res.*, 2005, v. 41, W12417.

Bobrov P.P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband frequency domain method of soil dielectric properties measurements // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2015a, v. 53 (5), p. 2366—2372.

Bobrov P.P., Lapina A.S., Repin A.V. Effect of the rock/water/air interaction on the complex dielectric permittivity and electromagnetic waves attenuation in water-saturated sandstones // *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings*, Prague, July 6—9, 2015, 2015b, p. 1877—1879.

Bobrov P.P., Kroshka E.S., Lapina A.S., Repin A.V. Relaxation model of complex relative permittivity of sandstones for the frequency range from 10 kHz to 1 GHz // *Proceedings of 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*. St. Petersburg, Russia, 22—25 May 2017, 2017, p. 3041—3045.

Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S. Combined dielectric model of sandy soils in the frequency range from 10 kHz to 8 GHz // *Appl. Geophys.*, 2018, v. 159, p. 616—620.

Chen Y., Or D. Effects of Maxwell–Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity // *Water Resour. Res.*, 2006, v. 42, W06424.

Chen Z., Schwing M., Karlovšek J., Wagner N., Scheuermann A. Broadband dielectric measurement methods for soft geomaterials: coaxial transmission line cell and open-ended coaxial probe // *IACSIT Int. J. Eng. Technol.*, 2014, v. 6 (5), p. 373—380.

González-Teruel J.D., Jones S.B., Soto-Valles F., Torres-Sánchez R., Lebron I., Friedman S.P., Robinson D.A. Dielectric spectroscopy and application of mixing models describing dielectric dispersion in clay minerals and clayey soils // *Sensors*, 2020, v. 20 (22), 6678.

- Gorriti A., Slob E.** Comparison of the different reconstruction techniques of permittivity from S-parameters // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2005, v. 43 (9), p. 2051—2057.
- Kemna A., Binley A., Cassiani G., Niederleithinger E., Revil A., Slater L., Williams K.H., Orozco A.F., Haegel F.-H., Hördt A., Kruschwitz S., Leroux V., Titov K., Zimmermann E.** An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications // *Near Surf. Geophys.*, 2012, № 6, p. 453—468.
- Kremer T., Schmutz M., Leroy P., Agrinier P., Maineult A.** Modelling the spectral induced polarization response of water-saturated sands in the intermediate frequency range (10^2 — 10^5 Hz) using mechanistic and empirical approaches // *Geophys. J. Int.*, 2016, v. 207 (2), p. 1303—1312.
- Kruschwitz S., Binley A., Lesmes D., Elshenawy A.** Textural controls on low-frequency spectra of porous media // *Geophysics*, 2010, v. 75 (4), p. 113—123.
- Leroy P., Revil A., Kemna A., Cosenza P., Ghorbani A.** Complex conductivity of water saturated packs of glass beads // *J. Colloid Interface Sci.*, 2008, v. 321 (1), p. 103—117.
- Lesmes D.P., Morgan F.D.** Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks // *J. Geophys. Res.*, 2001, v. 106, p. 13329—13346.
- Loewer M., Günther T., Igel J., Kruschwitz S., Martin T., Wagner N.** Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments — a combined permittivity and conductivity model // *Geophys. J. Int.*, 2017, v. 210 (3), p. 1360—1373.
- Myers M.T.A.** Pore geometry dependent dispersion model for the dielectric constant 1996 SCA Conference Paper Number 9626. 1996, <http://www.ux.uis.no/~s-skj/ip/Proceedings/SCA.1987-2004/1-SCA1996-26.pdf>.
- Niu Q., Prasad M., Revil A., M. Saidian M.** Textural control on the quadrature conductivity of porous media // *Geophysics*, 2016, v. 81 (5), p. E297-E309.
- Revil A.** Effective conductivity and permittivity of unsaturated porous materials in the frequency range 1 mHz to 1 GHz // *Water Resour. Res.*, 2013, v. 49 (1), p. 306—327.
- Revil A., Skold M.** Salinity dependence of spectral induced polarization in sands and sandstones // *Geophys. J. Int.*, 2011, v. 187, p. 813—824.
- Revil A., Binley A., Mejus L., Kessouri P.** Predicting permeability from the characteristic relaxation time and intrinsic formation factor of complex conductivity spectra // *Water Resour. Res.*, 2015, v. 51 (8), p. 6672—6700.
- Saltas V., Vallianatos F., Gidarakos E.** Charge transport in diatomaceous earth studied by broadband dielectric spectroscopy // *Appl. Clay Sci.*, 2013, v. 80—81, p. 226—235.
- Tarasov A., Titov K.** Relaxation time distribution from time domain induced polarization measurements // *Geophys. J. Int.*, 2007, v. 170, p. 31—43.
- Titov K., Tarasov A., Ilyin Yu., Seleznev N., Boyd A.** Relationships between induced polarization relaxation time and hydraulic properties of sandstone // *Geophys. J. Int.*, 2010, v. 180, p. 1095—1106.
- Weller, A., Slater L., Binley A., Nordsiek S., Xu A.** Permeability prediction based on induced polarization: Insights from measurements on sandstone and unconsolidated samples spanning a wide permeability range // *Geophysics*, 2015, v. 80 (2), p. D161—D173.

*Поступила в редакцию 9 декабря 2020 г.,
принята в печать 31 января 2021 г.*