ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(1):114-127
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 552.08 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_114

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГРАНИТА И ИЗВЕСТНЯКА В СУХОМ И ВОДОНАСЫЩЕННОМ СОСТОЯНИИ

А.А. Гапеев

НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: artgapeev@yandex.ru

Аннотация: В результате исследования была изучена дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости образцов гранита и известняка на частотах до 200 кГц в сухом и водонасыщенном состоянии. Полученные данные свидетельствуют о том, что наиболее сильная дисперсия действительной и комплексной частей комплексной диэлектрической проницаемости наблюдается в частотном диапазоне от 120 Гц до 10 кГц для сухих образцов обоих типов горных пород. Это связано с релаксационными процессами поляризации гетерогенных сред. Различие в пористости всего на 0,08% среди образцов гранита привело к увеличению действительной части комплексной диэлектрической проницаемости на 15%. Водонасыщенные образцы демонстрируют увеличение комплексной части комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 120 Гц до 1 кГц на несколько порядков в зависимости от их пористости. Дисперсия обеих частей комплексной диэлектрической проницаемости минимальна в частотной области от 10 до 200 кГц как для сухих, так и для водонасыщенных образцов. Однако при заполнении пор флюидом значение каждой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости увеличивается в несколько раз. Удельная электропроводность образцов гранита и известняка в сухом состоянии достигает своего максимума при частоте 200 кГц и составляет менее 10 мкСм/м вне зависимости от пористости для образцов гранита и около 25 мкСм/м для образцов известняка. При водонасыщении она увеличивается до 200 мкСм/м при пористости около 1% для образцов гранита и до 2200 мкСм/м при пористости порядка 25% для образцов известняка.

Ключевые слова: частотная зависимость, комплексная диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, электрические свойства, горная порода, гранит, известняк, дисперсия.

Для цитирования: *Гапеев А. А.* Экспериментальные исследования комплексной диэлектрической проницаемости гранита и известняка в сухом и водонасыщенном состоянии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1. – С. 114–127. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_114.

Experimental research of complex permittivity of granite and limestone in dry and water-saturated state

A.A. Gapeev

NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: artgapeev@yandex.ru

© А.А. Гапеев. 2025.

Abstract: The research investigated dispersion of complex permittivity in samples of granite and limestone at the frequencies to 200 kHz in dry and water-saturated state. The results prove that the highest dispersion of the real and complex parts of complex permittivity takes place in a frequency range from 120 Hz to 10 kHz in the dry samples of both rock types. This is connected with relaxation of polarization in heterogeneous media. The difference in porosity of the granite samples just by 0.07% resulted in the increase in the real part of complex permittivity by 15%. The water-saturated samples demonstrate an increase in the complex part of complex permittivity in a frequency range from 120 Hz to 1 kHz by several orders of magnitude depending on the porosity. Dispersion of both parts of complex permittivity is minimal in a frequency range from 10 to 200 kHz both in dry and water-saturated samples. However, when pores are filled with a fluid, the value of each part of complex permittivity increases by several times. Specific electric conductivity of the dry samples of granite and limestone reaches its maximum at the frequency of 200 kHz, and is less than 10 μS/m in the samples of granite and is about 25 μS/m in the samples of limestone irrespective of porosity. After saturation of the samples with water, specific electric conductivity increases to 200 μS/m at the porosity of 1% in the granite samples and to 2200 μS/m at the porosity of 25% in the limestone samples.

Key words: frequency dependence, complex permittivity, specific conductivity, electric properties, rock, granite, limestone, dispersion.

For citation: Gapeev A. A. Experimental research of complex permittivity of granite and limestone in dry and water-saturated state. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(1):114-127. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_114.

Введение

Электрические свойства горных пород являются определяющими при использовании таких геофизических методов, как, например, низкочастотная скважинная электроразведка, радиоволновой каротаж для изучения свойств и структуры массива горных пород, георадиолокация. Они используются для мониторинга деформаций и напряжений в горных массивах, что важно для обеспечения безопасности проведения горных работ [1—4].

Для корректной интерпретации данных о слагающих массив горных породах, полученных при применении перечисленных методов, необходима предварительная информация о значениях диэлектрической проницаемости по результатам лабораторных исследований. Наряду с этим при проведении лабораторных исследований следует учитывать, что данная электрическая характеристика является комплексной, обладает дисперсией, а ее значение зависит от насыщения геоматериала флюидом [5, 6]. Знание диэлектрических свойств позволяет определять не только минеральный состав, но и соотношение вода–нефть в насыщенных пористых породах-коллекторах [7, 8].

В научной практике определение комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) выполняется в частотном диапазоне от единиц герц до гига- и терагерц [5—9]. Методы измерения действительной и мнимой частей КДП определяются рассматриваемым частотным диапазоном. Исследования дисперсии электрических свойств на низких частотах (в диапазоне от единиц Гц до нескольких МГц, когда выполняется условие квазистационарности [10]) проводятся конденсаторным методом с ис-

пользованием измерителей импеданса [5, 11]. При этом используются плоские, цилиндрические или сферические конденсаторы, между обкладками которых помещается исследуемый образец [10]. При проведении измерений для уменьшения погрешности в определении диэлектрической проницаемости необходимо учитывать два основных фактора: паразитную емкость проводов и электродную поляризацию. Уменьшения влияния первого фактора добиваются, к примеру, использованием четырехэлектродной схемы [12, 13]. Электродная поляризация объясняется появлением двойного электрического слоя на границе раздела твердое тело — электрод, при неимении которого вклад в погрешность отсутствует [14].

На частотах от 10—100 МГц и выше конденсаторные методы неприменимы вследствие нарушения условия квазистационарности, поэтому для измерения КДП на данных частотах используются волноводные методы. В основе данных методов в большинстве случаев лежит использование отрезков коаксиальных кабелей и ячеек, которые состоят из двух цилиндрических металлических проводников, расположенных концентрично друг другу, а пространство между проводниками заполняется исследуемым материалом. Для определения КДП образцов выполняется измерение импеданса или матрицы рассеяния [15, 16].

Дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости горных пород сильно зависит от флюидонасыщения, особенно в области низких частот до 1 кГц [5, 6]. Применение и использование диэлектрической спектроскопии позволяет оценивать содержание воды в водонефтяных смесях и насыщаемых ими пористых средах. В статье [17] на основании экспериментальных данных показано, что использование диэлектрической спектроскопии эффективно для оценки содержания воды в легкой нефти. С ростом содержания воды происходит увеличение КДП, что согласуется с данными других исследований [5, 18]. Также исследования показывают зависимость КДП от солености воды или раствора, находящегося в поровом пространстве горных пород; с ростом солености происходит рост значений и действительной и мнимой частей КДП [19].

Проведенный анализ свидетельствует о том, что при проведении натурных измерений и интерпретации полученных данных необходимо учитывать флюидонасыщение горных пород. В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований низкочастотной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости сухих и водонасыщенных образцов гранита и известняка.

Материалы и методы

В данной работе изучение частотной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости выполнялось на образцах гранита и известняка различной пористости. Для этого были подготовлены серии образцов в виде пластин неправильной формы толщиной от 5,06 до 7,27 мм и площадью поперечного сечения не менее 25 см^2. Подготовка образцов заключалась в шлифовании противоположных граней образцов для установления плоскопараллельности не хуже 0,1 мм и последующем полировании. Контроль данного условия выполнялся при помощи микрометра по измерениям не менее чем в 5 точках.

Первым этапом работ было высушивание образцов в сушильном шкафу ШС-80-01 при температуре 105 °С до достижения постоянной массы. Далее для определения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости применялся емкостной метод с использованием цифрового RLC-изме-

рителя АММ-3046, работающего в частотном диапазоне 120 Гц — 200 кГц. Сначала для калибровки аппаратуры выполнялись измерения емкости конденсатора C, образованного квадратными обкладками размерами $a = b = 18$ мм, выполненными из медной фольги, и стеклянной пластиной, являющейся диэлектрическим материалом, помещенным между обкладками, с известным значением диэлектрической проницаемости во всем частотном диапазоне. После этого вместо стекла помещались образцы пластины гранита и известняка и проводились новые измерения [20]. Подключение такого конденсатора к измерителю АММ-3046 осуществлялось с помощью 4-проводных клемм Кельвина, что существенно уменьшало емкость соединительных проводов и позволило добиться малой величины паразитной емкости. Измерения всех величин на каждой гармонике приведенного выше диапазона осуществлялись 50 раз, после чего усреднялись.

Расчет действительной части ε' комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) производился из соотношения, учитывающего краевые эффекты, оказывающие влияние на емкость конденсатора конечных размеров [21]:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon' ab}{d}\left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b}\ln\left(\frac{2\pi b}{d}\right)\right] \cdot \left[1 + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a}\ln\left(\frac{2\pi a}{d}\right)\right], \quad (1)$$

где d — расстояние между электродами, соответствующее толщине исследуемого образца; $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Вычисление мнимой части ε'' КДП производилось на основе измеренного тангенса угла потерь $\mathrm{tg}\delta$ по известной формуле, приведенной, например, в [5]:

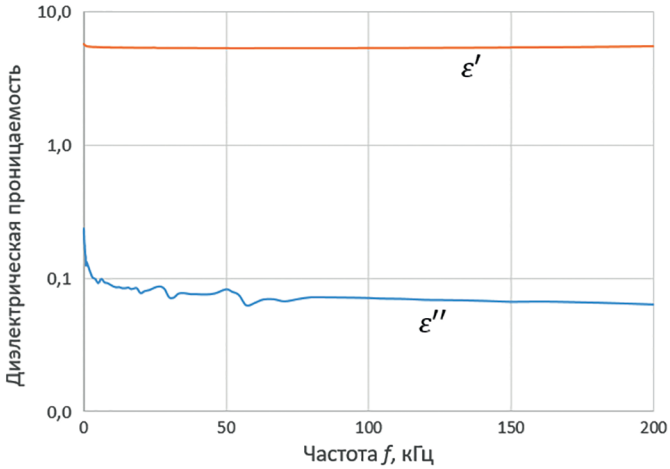
$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot tg\delta. \quad (2)$$

Для определения этих же характеристик образцов в водонасыщенном состоянии образцы помещались в дистиллированную воду на 48 ч. Величина водонасыщения образцов вычислялась по разнице масс сухого образца и насыщенного, рассчитывалась открытая пористость. Далее также выполнялись измерения емкости конденсатора и тангенса угла диэлектрических потерь и расчет действительной и мнимой частей КДП в частотном диапазоне 120 Гц — 200 кГц.

Результаты

Как было описано в [20], первоначально выполнялась калибровка аппаратуры на основе измерений характеристик конденсатора, заполненного материалом (стеклом), у которого в частотном диапазоне 120 Гц — 200 кГц дисперсия практически отсутствует. В этом диапазоне для образца стекла среднее значение действительной части комплексной диэлектрической проницаемости равнялось $\varepsilon = 5{,}40$ при среднеквадратичной погрешности 0,10, что составляло менее 2% и было обусловлено, по-видимому, погрешностью в измерении емкости. Найденное численное значение совпало с табличными данными. Средняя величина мнимой части КДП была мала и варьировалась в диапазоне 120 Гц — 1 кГц от 0,236 до 0,132, а в диапазоне от 2 кГц до 200 кГц — от 0,115 до 0,063, соответственно. Частотные зависимости действительной (красная линия) и мнимой (синяя линия) частей КДП стекла приведены на рис. 1.

В таблице представлен результат измерений емкости $C_с$ и $C_в$, тангенса угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta_с$ и $\mathrm{tg}\delta_в$ и проводимости $G_{сух}$ и $G_{вод}$ конденсатора с диэлектриком в виде пластины из гранита, соответственно в сухом и водонасыщенном состояниях. Значения таблицы являются усредненными по 10 об-



красная линия – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ε',

синяя линия – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости ε''

Рис. 1. Диэлектрическая проницаемость стекла
Fig. 1. Permittivity of glass

Результаты измеренных емкостей, тангенса диэлектрических потерь, электропроводности сухих и влажных образцов гранита
Results of measured capacitance, dissipation factor, electrical conductivity of dry and wet granite samples

Частота, кГц	Сухое состояние			Водонасыщенное состояние		
	емкость $C_с$, пФ	$tg\delta_с$	$G_{сух}$, мкСм	емкость $C_в$, пФ	$tg\delta_в$	$G_{вод}$, мкСм
0,12	11,8	0,24	0,002	395,1	1,88	0,67
0,24	10,7	0,20	0,004	275,3	1,33	0,69
0,36	10,3	0,19	0,004	235,7	1,09	0,74
0,48	9,9	0,18	0,006	212,1	0,95	0,75
0,60	9,7	0,17	0,006	197,2	0,87	0,76
0,72	9,6	0,16	0,007	187,3	0,81	0,79
0,84	9,4	0,16	0,008	179,5	0,76	0,82
1	9,3	0,15	0,010	171,0	0,72	0,87
5	8,1	0,12	0,032	101,9	0,63	2,2
10	7,8	0,11	0,056	77,3	0,69	3,7
15	7,6	0,10	0,074	65,2	0,74	4,8
20	7,5	0,10	0,094	56,5	0,79	5,8
25	7,4	0,09	0,112	50,3	0,83	6,8
50	7,1	0,09	0,196	33,5	0,94	10,1
80	6,9	0,08	0,281	25,3	0,98	12,9
100	6,9	0,07	0,335	22,2	0,99	14,3
120	6,8	0,07	0,385	20,0	0,99	15,4
150	6,8	0,07	0,460	17,9	0,98	17,0
171	6,9	0,07	0,513	16,7	0,96	18,1
200	6,9	0,06	0,582	15,8	0,94	19,4

разцам для каждой из частот. По полученным данным были рассчитаны действительная $\varepsilon'_{с,в}$ и мнимая $\varepsilon''_{с,в}$ части КДП и удельная электропроводность $\sigma_{с,в}$. Результаты расчетов для образца гранита с открытой пористостью V = 0,78% в сухом состоянии приведены на рис. 2. Резкое уменьшение значений обеих частей КДП сухих образцов наблюдается в области низких частот (120 Гц — 5,0 кГц, рис. 2, *а*): $\varepsilon'_с$ в 1,5 раза (от значения 9,3 до 6,2); $\varepsilon''_с$ почти в 4 раза (от 2,3 до 0,8). При частотах, больших 5—10 кГц, и мнимая, и действительная составляющие КДП стремятся к постоянным значениям ($\varepsilon'_с$ ~ 6,2; $\varepsilon''_с$ ~ 0,6) (рис. 2, *б*). После определения электрических свойств сухих образцов производилось их насыщение дистиллированной водой и расчет двух частей КДП по величинам емкости и тангенса угла потерь (см. таблицу).

Частотные зависимости двух компонент $\varepsilon'_в$ и $\varepsilon''_в$ приведены на рис. 3. Наб-

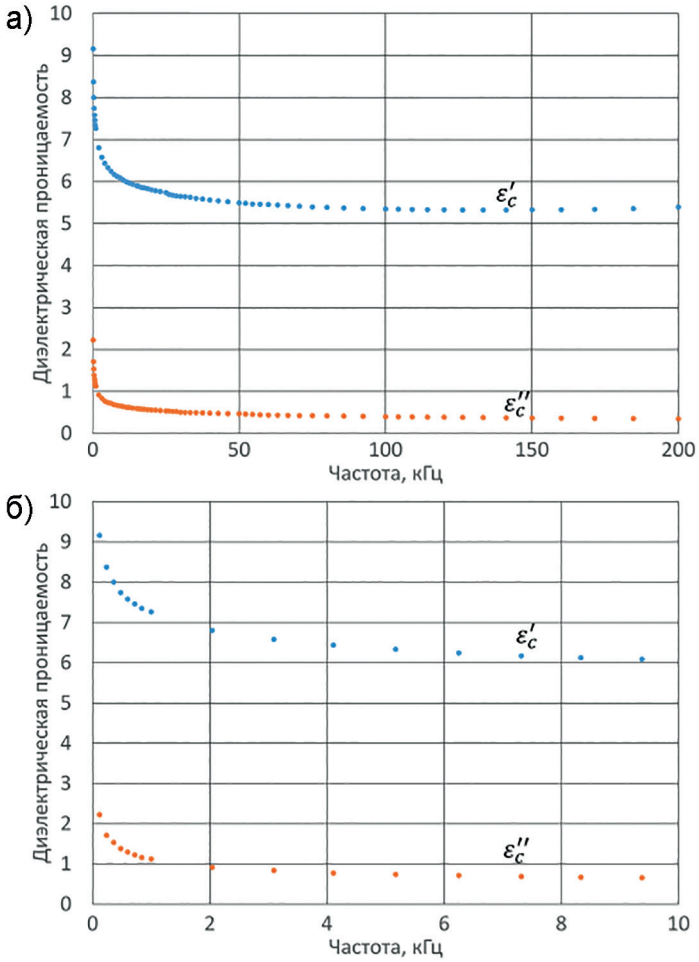


Рис. 2. Действительная $\varepsilon'_с$ и мнимая $\varepsilon''_с$ части КДП образцов гранита в сухом состоянии: исследуемый частотный диапазон 120 Гц — 200 кГц (а); частотный диапазон 120 Гц — 10 кГц (б)

Fig. 2. Real $\varepsilon'_с$ and imaginary $\varepsilon''_с$ parts of complex permittivity of granite samples in dry state: investigated frequency range 120 Hz — 200 kHz (a); frequency range 120 Hz — 10 kHz (b)

людалось резкое возрастание значений обеих частей КДП водонасыщенных образцов во всем исследуемом частотном диапазоне, несмотря на малую пористость образцов. При этом на частоте 120 Гц действительная часть увеличивалась примерно в 30 раз, в то время как мнимая увеличивалась в 250 раз. Отношение $\varepsilon'_в / \varepsilon'_с$ на частоте 5 кГц составило 13, в то время как $\varepsilon''_в / \varepsilon''_с$ на данной частоте — 68. При дальнейшем возрастании частоты, начиная с 50 кГц, значения действительной и мнимой частей становятся примерно равными, $\varepsilon'_в \sim \varepsilon''_в$, достигая значения около 12 при 200 кГц. Поскольку $\varepsilon''_с$ связана с удельной электропроводностью σ' соотношением $\sigma' = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'(f)$, то $\sigma'_с$ принимает значение 0,02 мкСм/м на частоте 120 Гц и 4,1 мкСм/м на частоте 200 кГц.

Аналогичные значения были получены для σ' в результате пересчета проводимости *G* (рис. 4). Анализируя значения удельной проводимости, можно отметить, что водонасыщение образцов дистиллированной водой приводит к резкому скачку и изменению значений более чем в 300 раз на 120 Гц: $\sigma'_с = 0{,}02$ мкСм/м,

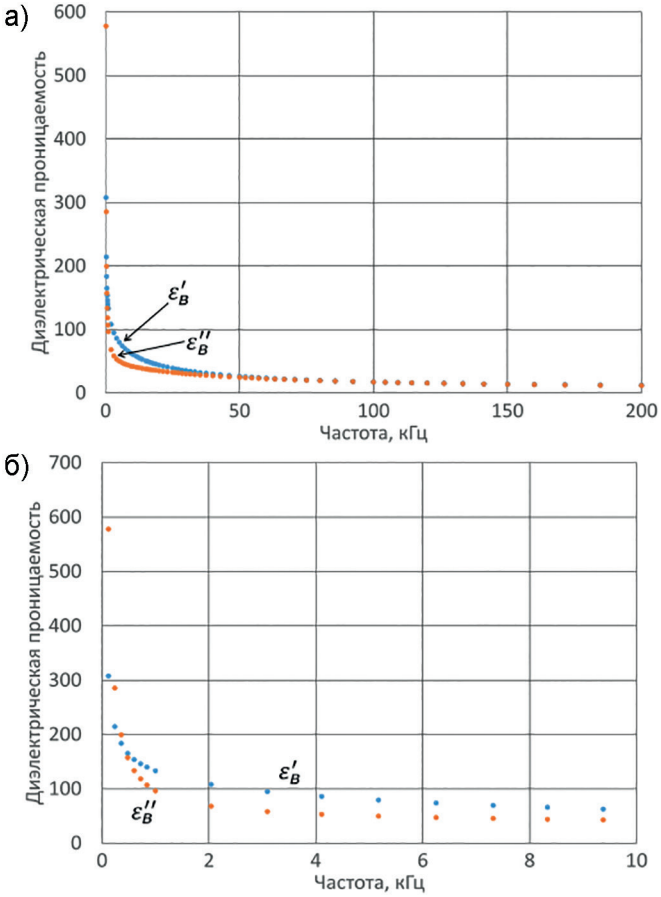


Рис. 3. Частотные зависимости действительной $\varepsilon'_в$ и мнимой $\varepsilon''_в$ частей КДП для образцов гранита в водонасыщенном состоянии: исследуемый частотный диапазон 120 Гц — 200 кГц (а); частотный диапазон 120 Гц — 10 кГц (б)

Fig. 3. Frequency dependences of real $\varepsilon'_в$ and imaginary $\varepsilon''_и$ parts of complex permittivity for granite samples in water-saturated state: investigated frequency range 120 Hz — 200 kHz (a); frequency range 120 Hz — 10 kHz (b)

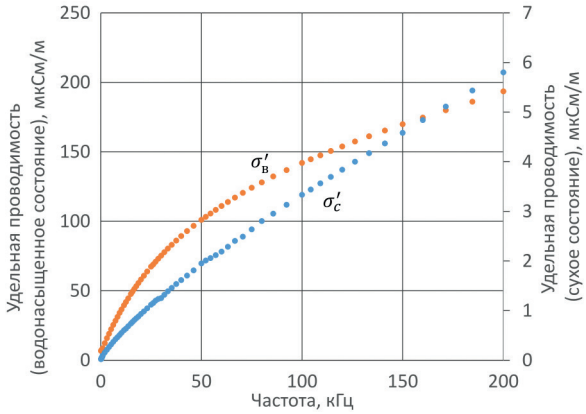


Рис. 4. Частотные зависимости удельной проводимости образца гранита в сухом σ'_c и водонасыщенном $\sigma'_в$ состояниях

Fig. 4. Frequency dependences of specific conductivity of granite sample in dry σ'_c and water-saturated $\varepsilon'_в$ states

а $\sigma'_в$ = 6,7 мкСм/м. Далее на всем рассматриваемом частотном диапазоне наблюдается нелинейный рост значений удельной проводимости с частотой и на 200 кГц составляет σ'_c = 5,8 мкСм/м, а $\sigma'_в$ = 198 мкСм/м. Таким образом, в частотном диапазоне $f \in$[120 Гц, 200 кГц] гранит в сухом состоянии является хорошим диэлектриком, для которого действительная часть КДП меняется в диапазоне от 6,3 до 5,6.

Влияние водонасыщения на электрические свойства горных пород с высокой пористостью (порядка 15 — 30%) исследовалось на образцах известняка. В качестве примера в настоящей работе приведены результаты, полученные на одном из образцов с открытой пористостью 24,6%. Такое значение пористости сухого образца приводит к тому, что образец становится хорошим изолятором при частоте 120 Гц, когда действительная часть ε' = 20. Как и в случае с гранитом, ε'_c и ε''_c уменьшаются, стремясь при 200 кГц к значениям ε'_c = 5,3; ε''_c = 1,2 (рис. 5).

Водонасыщение приводит к тому, что на частоте 120 Гц действительная часть

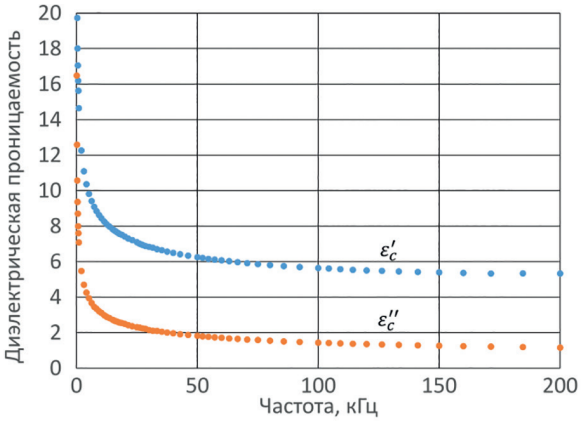


Рис. 5. Действительная и мнимая части КДП образца известняка в сухом состоянии

Fig. 5. Real and imaginary parts of CP of limestone sample in dry state

КДП увеличивается в 400 раз, а мнимая часть КДП — более чем в 1000 раз (рис. 6). Значения данных величин при 200 кГц составляют $\varepsilon'_в$ = 86, $\varepsilon''_в$ = 109.

Так же как и с гранитом, водонасыщение образцов известняка дистиллированной водой приводит к резкому скачку и изменению значений удельной проводимости более чем в 1300 раз на 120 Гц: $\sigma'_с$ = 0,2 мкСм/м, а $\sigma'_в$ = 271 мкСм/м (рис. 7). Далее на всем рассматриваемом частотном диапазоне наблюдается нелинейный рост значений удельной проводимости с частотой и на 200 кГц составляет $\sigma'_с$ = 24 мкСм/м, а $\sigma'_в$ = = 2187 мкСм/м.

Обсуждение

Полученные результаты показали, что в низкочастотной области 120 Гц — 10 кГц для всех исследуемых образцов (низкопористого гранита и высокопористого известняка) наблюдается значительная дисперсия как действительной,

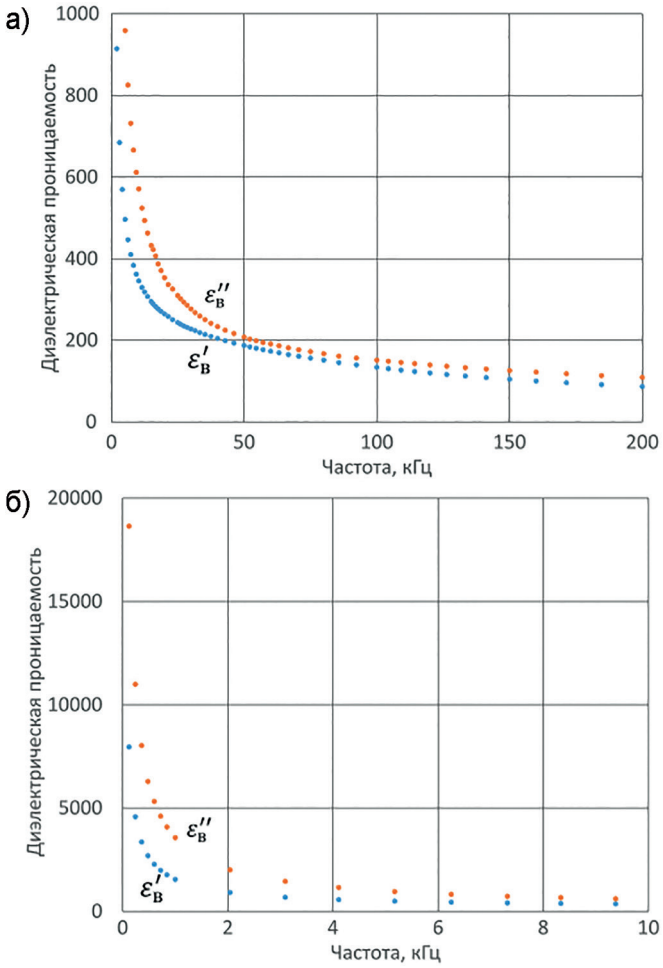


Рис. 6. Действительная и мнимая части КДП образца известняка в водонасыщенном состоянии: исследуемый частотный диапазон 120 Гц — 200 кГц (а); частотный диапазон 120 Гц — 10 кГц (б)

Fig. 6. Real and imaginary parts of CP of limestone sample in water-saturated state: investigated frequency range 120 Hz — 200 kHz (a); frequency range 120 Hz — 10 kHz (b)

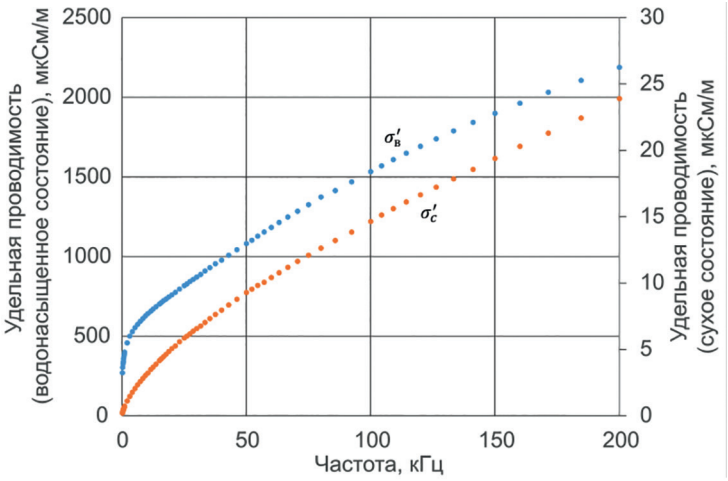


Рис. 7. Частотные зависимости удельной проводимости образца известняка в сухом и водонасыщенном состояниях

Fig. 7. Frequency dependences of specific conductivity of limestone sample in dry and water-saturated states

так и мнимой частей диэлектрической проницаемости для сухих образцов. Так, в данном диапазоне для сухих образцов гранита при увеличении частоты f от 120 Гц до 10 кГц действительная часть уменьшается в 1,6 раз, в то время как в диапазоне частот от 10 до 200 кГц ее изменение составляло всего лишь 12%. Аналогичные результаты получены и для известняков. При этом значение удельной проводимости для всех исследуемых образцов во всем частотном диапазоне не превосходило 10 мкСм/м. Поэтому и гранит, и известняк в сухом состоянии являются хорошими диэлектриками.

Наличие низкочастотной дисперсии электрических свойств неоднородных сред обусловлено, как отмечалось в работах [22, 23], релаксационными свойствами. Так, при помещении в электромагнитное поле образцов гранита, состоящего из различных слабо проводящих ток минеральных зерен, на их границах вследствие смещения связанных зарядов наблюдается появление поверхностных зарядов, которое и приводит к межфазной поляризации. Процесс смещения зарядов требует некоторого времени τ, которое в зависимости от размеров зерен и других структурных особенностей может лежать в диапазоне $10^{(-4)}$ — 10^{1} с [24]. Данное время называется временем релаксации и соответствует частотному диапазону, в котором у сухих образцов гранита наиболее сильно проявлялась дисперсия диэлектрической проницаемости.

Для водонасыщенных образцов ситуация существенно менялась. Поскольку удельная электропроводность дистиллированной воды на два порядка больше (~500 мкСм/м по ГОСТ Р 58144-2018), ее наличие в порах приводило к увеличению электропроводности образцов. Также дополнительный вклад в эту величину вносило незначительное растворение отдельных минеральных зерен и ионизация воды за счет данного эффекта, увеличивая тем самым электропроводность среды. Удельная электропроводность среды существенно возрастала с ростом частоты. При этом действительная часть КДП в области низких частот возрастала более чем на порядок даже при незначительной пористости 0,7 — 1,5%. Различие значений действи-

тельной части КДП при пористости 0,8% и 1,5% достигало 20%.

Исследования с известняками с высокой (до 25%) пористостью показали, что их водонасыщение приводит к увеличению дисперсии обеих частей КДП в несколько сотен раз на частоте 120 Гц, а также к увеличению $\varepsilon'_в$ и $\varepsilon''_в$ в несколько раз по сравнению с сухими образцами во всем частотном диапазоне. Полученные данные находятся в хорошем соответствии с результатами работы [25], в которой изучались электрические свойства известняков с пористостью 22%. Авторами [25] было установлено, что в диапазоне частот 100 — 300 Гц действительная часть $\varepsilon_в'$ КДП может возрастать до значений 10^4 при водонасыщении, а при частотах порядка 100 кГц ее значение уменьшается практически в 100 раз.

Заключение

В ходе проведенных исследований была изучена дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости образцов гранита и известняка, а также рассчитана их удельная электропроводность на частотах до 200 кГц в сухом и водонасыщенном состояниях. Результаты исследования показали:

- наиболее сильно для сухих образцов гранита и известняка дисперсия действительной и комплексной частей КДП проявляется в частотном диапазоне 120 Гц — 10кГц, что обусловлено релаксационными процессами поляризации гетерогенных сред, причем незначительное различие в пористости образцов (всего лишь на 0,08%) может приводить к увеличению действительной части КДП на 15%;
- для водонасыщенных образцов в зависимости от их пористости в диапазоне частот 120 Гц — 10 кГц КДП возрастает на несколько порядков;
- дисперсия обеих частей КДП несущественна в области частот 10 — 200 кГц как для сухих, так и для водонасыщенных образцов, но при заполнении пор флюидом численное значение каждой составляющей КДП больше в несколько раз;
- в исследуемом диапазоне частот удельная электропроводность образцов гранита достигала максимального значения при частоте 200 кГц и не превышала 10 мкСм/м для образцов гранита вне зависимости от их пористости, при водонасыщении ее значение возрастало на частоте 200 кГц до значений 200 мкСм/м при пористости порядка 1% и до 2200 мкСм/м при пористости около 25% для образцов известняка.

Проведенные исследования свидетельствует о том, что при натурных измерениях и интерпретации полученных данных необходимо учитывать флюидонасыщение горных пород, а перед проведением скважинного каротажа с использованием низких частот необходимо проводить серию лабораторных исследований КДП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jin Lai, Yang Su, Lu Xiao, Fei Zhao, Tianyu Bai, Yuhang Li, Hongbin Li, Yuyue Huang, Guiwen Wang, Ziqiang Qin* Application of geophysical well logs in solving geologic issues: Past, present and future prospect // Geoscience Frontiers. 2024, vol. 15, no. 3, article 101779.

2. *Cai L., Deng S., Yuan X.* Detection performance analysis of array dielectric dispersion logging based on sensitivity function // Sensors. 2023, vol. 23, article 5737. DOI: 10.3390/s23125737.

3. *Soldatov S., Umminger M., Heinzel A., Link G., Lepers B., Jelonnek J.* Dielectric characterization of concrete at high temperatures // Cement and Concrete Composites. 2016, vol. 73, pp. 54 — 61. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.01.006.

4. *Deyab S. M., Rafezi H., Hassani F., Kermani M., Sasmito A. P.* Experimental investigation on the effects of microwave irradiation on kimberlite and granite rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 13, no. 7, pp. 267 – 274. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.001.

5. *Chen Sh., Ke Sh., Jia J., Cheng L., Shi H., Zhang Y.* A laboratory study on the dielectric spectroscopy of sandstone and the improvement of dispersion model // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022, vol. 216, article 110655. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110655.

6. *Зиннатуллин Р. Р., Ковалева Л. А., Султангужин Р. Ф.* Исследование диэлектрических свойств водонефтенасыщенных горных пород и их нагрева в электромагнитном поле // Теплофизика высоких температур. — 2019. — Т. 57. — № 1. — С. 143 – 145.

7. *Eltsov T. I., Dorovsky V. N., Gapeev D. N.* Dielectric spectra of water – oil-saturated porous media for the kHz range and determination of volume fractions of system components // Russian Geology and Geophysics. 2014, vol. 55, pp. 1009 – 1018. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.07.008.

8. *Benavides J. A. A.* Dielectric response interpretation of shale rocks with low cation exchange capacity / Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. 2022, pp. 3568 – 3570.

9. *Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., Ivanov P., Shibaev I.* Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone // Remote Sensing. 2020, vol. 12, no. 24, article 4036. DOI: 10.3390/rs12244036.

10. *Брандт А. А.* Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. — М., 1963. — 403 с.

11. *Hongqi Liu, Tian Jie, Deng Youming, Qiu Chunning* Study of the low-frequency dispersion of permittivity and resistivity in tight rocks // Journal of Applied Geophysics. 2017, vol. 143, pp. 141 – 148.

12. *Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N.* Improving petrophysical interpretation with wide-band electromagnetic measurements // SPE Journal. 2008, vol. 13, pp. 205 – 215.

13. *Gomez-Sanchez J. A., Felice C. J.* Description of corrections on electrode polarization impedance using isopotential interface factor // Journal of Electrical Bioimpedance. 2012, vol. 3, pp. 29 – 35.

14. *Feldman Yu., Polygalov E., Ermolina I., Polevaya Yu., Tsentsiper B.* Electrode polarization correction in time domain dielectric spectroscopy // Measurement Science and Technology. 2001, vol. 12, pp. 1355 – 1364.

15. *Zheng Y. L., Zhao X. B., Zhao Q. H., Li J. C., Zhang Q. B.* Dielectric properties of hard rock minerals and implications for microwave-assisted rock fracturing // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2020, vol. 6, article 22.

16. *Bobrov P. P., Golikov N. A., Kroshka E. S., Repin A. V.* Assessment of the permeability and pore size of quartz-based consolidated sedimentary rocks by dielectric spectroscopy in the frequency range of 1kHz — 500 MHz // Journal of Applied Geophysics. 2022, vol. 204, article 104750.

17. *Shumskayte M., Mezin A., Chernova E., Burukhina A., Golikov N. Melkozerova S.* Estimating water content in water – oil mixtures and porous MEDIA they saturate: Joint interpretation of NMR relaxometry and dielectric spectroscopy // Geosciences. 2022, vol. 12, article 179. DOI: 10.3390/geosciences12040179.

18. *Bona N., Rossi E., Venturini C., Capaccioli S., Lucchesi M.* Characterization of rock wettability though dielectric measurements // Revue de l'Institut Français du Pétrole. 1998, vol. 53, no. 6, pp. 771 – 783.

19. *Kang Z., Ke Sh., Yin Ch., Wang W., Zheng Sh., Sun X., Li J.* Dielectric constant measurements of sweep frequency and its effect from 20 MHz to 1000 MHz // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018, vol. 166, pp. 602 – 610. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.093.

20. *Гапеев А. А., Черепецкая Е. Б., Кудинов И. А., Семенов Я. Г., Васильевых В. В.* Частотная зависимость диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород-коллекторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 9. — С. 117 – 128. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_117.

21. *Остертак Д. И.* Анализ электростатических взаимодействий в плоскопараллельных МЭМС с учетом краевых эффектов в 3D-приближении // Доклады АН ВШ РФ. — 2017. — № 1 (34). — С. 116 – 132. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132.

22. *Kremer F., Schonhals A.* Broadband dielectric spectroscopy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2003, 729 p.

23. *Chelidze T. L., Gueguen Y.* Electrical spectroscopy of porous rocks: a review — I. Theoretical models // Geophysical Journal International. 1999, vol. 137, no. 1, pp. 1 – 15.

24. *Song Z., Nie L., Li Z., Zhang S., Deng Z., Li Y.* Estimation of rock mass permeability using relaxation time and P-wave velocity // Geophysical Prospecting. 2024, pp. 1—10.

25. *Lesmes D. P.*, *Morgan F. D.* Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks // Journal of Geophysical Research. 2001, vol. 106, no. B7, pp. 13329—13346. ГИАБ

REFERENCES

1. Jin Lai, Yang Su, Lu Xiao, Fei Zhao, Tianyu Bai, Yuhang Li, Hongbin Li, Yuyue Huang, Guiwen Wang, Ziqiang Qin Application of geophysical well logs in solving geologic issues: Past, present and future prospect. *Geoscience Frontiers*. 2024, vol. 15, no. 3, article 101779.

2. Cai L., Deng S., Yuan X. Detection performance analysis of array dielectric dispersion logging based on sensitivity function. *Sensors*. 2023, vol. 23, article 5737. DOI: 10.3390/s23125737.

3. Soldatov S., Umminger M., Heinzel A., Link G., Lepers B., Jelonnek J. Dielectric characterization of concrete at high temperatures. *Cement and Concrete Composites*. 2016, vol. 73, pp. 54—61. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.01.006.

4. Deyab S. M., Rafezi H., Hassani F., Kermani M., Sasmito A. P. Experimental investigation on the effects of microwave irradiation on kimberlite and granite rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020, vol. 13, no. 7, pp. 267—274. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.09.001.

5. Chen Sh., Ke Sh., Jia J., Cheng L., Shi H., Zhang Y. A laboratory study on the dielectric spectroscopy of sandstone and the improvement of dispersion model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022, vol. 216, article 110655. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110655.

6. Zinnatullin R. R., Kovaleva L. A., Sultanguzhin R. F. Study of the dielectric properties of water-oil-saturated rocks and their heating in an electromagnetic field. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2019, vol. 57, no. 1, pp. 143—145. [In Russ].

7. Eltsov T. I., Dorovsky V. N., Gapeev D. N. Dielectric spectra of water—oil-saturated porous media for the kHz range and determination of volume fractions of system components. *Russian Geology and Geophysics*. 2014, vol. 55, pp. 1009—1018. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.07.008.

8. Benavides J. A. A. Dielectric response interpretation of shale rocks with low cation exchange capacity. *Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy*. 2022, pp. 3568—3570.

9. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., Ivanov P., Shibaev I. Thermal infrared radiation and laser ultrasound for deformation and water saturation effects testing in limestone. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 24, article 4036. DOI: 10.3390/rs12244036.

10. Brandt A. A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Research of dielectrics at ultrahigh frequencies], Moscow, 1963, 403 p.

11. Hongqi Liu, Tian Jie, Deng Youming, Qiu Chunning Study of the low-frequency dispersion of permittivity and resistivity in tight rocks. *Journal of Applied Geophysics*. 2017, vol. 143, pp. 141—148.

12. Toumelin E., Torres-Verdin C., Bona N. Improving petrophysical interpretation with wide-band electromagnetic measurements. *SPE Journal*. 2008, vol. 13, pp. 205—215.

13. Gomez-Sanchez J. A., Felice C. J. Description of corrections on electrode polarization impedance using isopotential interface factor. *Journal of Electrical Bioimpedance*. 2012, vol. 3, pp. 29—35.

14. Feldman Yu., Polygalov E., Ermolina I., Polevaya Yu., Tsentsiper B. Electrode polarization correction in time domain dielectric spectroscopy. *Measurement Science and Technology*. 2001, vol. 12, pp. 1355—1364.

15. Zheng Y. L., Zhao X. B., Zhao Q. H., Li J. C., Zhang Q. B. Dielectric properties of hard rock minerals and implications for microwave-assisted rock fracturing. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2020, vol. 6, article 22.

16. Bobrov P. P., Golikov N. A., Kroshka E. S., Repin A. V. Assessment of the permeability and pore size of quartz-based consolidated sedimentary rocks by dielectric spectroscopy in the frequency range of 1kHz — 500 MHz. *Journal of Applied Geophysics*. 2022, vol. 204, article 104750.

17. Shumskayte M., Mezin A., Chernova E., Burukhina A., Golikov N. Melkozerova S. Estimating water content in water—oil mixtures and porous MEDIA they saturate: Joint interpretation of NMR relaxometry and dielectric spectroscopy. *Geosciences*. 2022, vol. 12, article 179. DOI: 10.3390/geosciences12040179.

18. Bona N., Rossi E., Venturini C., Capaccioli S., Lucchesi M. Characterization of rock wettability though dielectric measurements. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. 1998, vol. 53, no. 6, pp. 771—783.

19. Kang Z., Ke Sh., Yin Ch., Wang W., Zheng Sh., Sun X., Li J. Dielectric constant measurements of sweep frequency and its effect from 20 MHz to 1000 MHz. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018, vol. 166, pp. 602—610. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.03.093.

20. Gapeev A. A., Cherepetskaya E. B., Kudinov I. A., Semenov Ya. G., Vasilevykh V. V. Frequency dependence of permittivity and conductivity of reservoir rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 9, pp. 117—128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_117.

21. Ostertak D. I. An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with regard to fringing field effects within a 3D-approach. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*. 2017, no. 1 (34), pp. 116—132. [In Russ]. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132.

22. Kremer F., Schonhals A. *Broadband dielectric spectroscopy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 2003, 729 p.

23. Chelidze T. L., Gueguen Y. Electrical spectroscopy of porous rocks: a review — I. Theoretical models. *Geophysical Journal International.* 1999, vol. 137, no. 1, pp. 1—15.

24. Song Z., Nie L., Li Z., Zhang S., Deng Z., Li Y. Estimation of rock mass permeability using relaxation time and P-wave velocity. *Geophysical Prospecting*. 2024, pp. 1—10.

25. Lesmes D. P., Morgan F. D. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research*. 2001, vol. 106, no. B7, pp. 13329—13346.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гапеев Артем Андреевич — аспирант,
НИТУ МИСИС, e-mail: artgapeev@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0001-7744-9426.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.A. Gapeev, Graduate Student,
NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
e-mail: artgapeev@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0001-7744-9426.

Получена редакцией 03.09.2024; получена после рецензии 02.10.2024; принята к печати 10.12.2024.
Received by the editors 03.09.2024; received after the review 02.10.2024; accepted for printing 10.12.2024.