

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ

А.А. Гапеев¹, Е.Б. Черепецкая¹, И.А. Кудинов¹, Я.Г. Семенов¹, В.В. Васильевых¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: agapeev@misis.ru

Аннотация: Изучение частотной дисперсии является важным аспектом для развития и применения диэлектрического каротажа скважин, георадарных исследований почв, грунтов и горных пород, при дистанционном зондировании в микроволновом диапазоне. Рассмотрена частотная дисперсия диэлектрической проницаемости и удельная проводимость для песчаника и известняка в диапазоне частот от 120 Гц до 200 кГц. Установлено, что частотная зависимость значений диэлектрической проницаемости и удельной проводимости песчаника проявляется во всем исследуемом частотном диапазоне. При этом наблюдалось уменьшение диэлектрической проницаемости для образцов песчаника от значения $165,5 \pm 72,3$ на 120 Гц до $19,3 \pm 2,9$ на 200 кГц, а удельная проводимость изменялась от $0,45 \pm 0,39$ мкСм/м на 120 Гц до $235,4 \pm 144,7$ мкСм/м на 200 кГц. Для известняка данные величины изменялись в более узком диапазоне. Значение диэлектрической проницаемости для известняка при 120 Гц было равно $5,85 \pm 0,48$ и $5,41 \pm 0,34$ при 5 кГц. В диапазоне 5–200 кГц значения данных характеристик практически не изменяются. Поскольку основным типом поляризации гетерогенных сред, оказывающих влияние на частотную зависимость электрических свойств, является межфазная поляризация Максвелла–Вагнера–Силларса, то для песчаника, являющегося более неоднородной породой, чем известняк, дисперсия диэлектрической проницаемости и удельной проводимости проявляется сильнее.

Ключевые слова: частотная зависимость, диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, горная порода, известняк, песчаник, дисперсия.

Для цитирования: 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.

Frequency dependence of permittivity and conductivity of reservoir rocks

A.A. Gapeev¹, E.B. Cherepetskaya¹, I.A. Kudinov¹, Ya.G. Semenov¹, V.V. Vasilevykh¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: agapeev@misis.ru

Abstract: The frequency dispersion analysis is important for the development and application of dielectric logging and ground-penetrating radar methods in remote sounding of soils and rocks in a micro wave range. This study focuses on frequency dispersion of permittivity and conductivity in sandstone and limestone in a frequency range from 120 Hz to 200 kHz. It is

found that frequency dependence of permittivity and conductivity in sandstone shows up in the whole frequency range being tested. In sandstone, the permittivity decreased from the value of 165.5 ± 72.3 at 120 Hz to 19.3 ± 2.9 at 200 kHz, and conductivity changed from 0.45 ± 0.39 $\mu\text{S}/\text{m}$ at 120 Hz to 235.4 ± 144.7 $\mu\text{S}/\text{m}$ at 200 kHz. In limestone, these values changed in a narrower range. The permittivity in limestone was 5.85 ± 0.48 at 120 Hz and 5.41 ± 0.34 at 5 kHz. In the range of 5–200 kHz, these values remain practically unchanged. Since the main type of polarizing of heterogeneous media which have effect on the frequency dependence of electric properties is the Maxwell–Wagner–Sillars interfacial polarization, the dispersion of permittivity and conductivity shows up stronger in sandstone being a more nonuniform rock type than limestone.

Key words: frequency dependence, permittivity, conductivity, rock, limestone, sandstone, dispersion.

For citation: 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;(9):117-128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_117.

Введение

В соответствии с классической электродинамикой сплошные среды, в том числе горные породы, обладают электрическими свойствами, которые можно охарактеризовать диэлектрической проницаемостью, удельным электрическим сопротивлением и обратной ему величиной — удельной электропроводностью (проводимостью), а также тангенсом угла диэлектрических потерь. Данные величины являются важными электрическими характеристиками, используемыми при диэлектрическом каротаже скважин, микроволновом дистанционном зондировании для идентификации типов горных пород, георадарных исследованиях для построения радиолокационного изображения структуры материала и др. [1–5].

Значения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления для песчаников, известняков, гранита и других горных пород измерялись в широком частотном диапазоне, от десятков герц до десятков гигагерц. Этому посвящено множество работ [6–15]. Стоит отметить, что и диэлектрическая проницае-

мость и электропроводность являются комплексными величинами, обладающими сильной дисперсией, обусловленной не только минеральным составом, но и флюидонасыщением [7–10].

Электрический каротаж на основе измерения удельного сопротивления используется для идентификации нефти и воды, поскольку удельные сопротивления данных жидкостей сильно различаются. Например, используя закон Арчи, связывающий электропроводность с пористостью и флюидонасыщением, оценивают насыщение жидкостью пласта по данным каротажа [11]. Однако в определенных случаях значения удельного сопротивления нефти и воды в пласте близки [12]. Как показано в работах [13, 14], для песчаников, известняков и гранита при их насыщении водным раствором NaCl и нефтью идентификация слоев нефти и воды по их удельным сопротивлениям становится затруднительной.

В работе [7] проведены измерения частотной дисперсии диэлектрической проницаемости для песчаника на частотах от 20 МГц до 1 ГГц, как для сухих

образцов горной породы, так и в зависимости от их водонасыщенности и концентрации раствора NaCl, находящегося в открытых порах. Показано, что в данном диапазоне частот для высушенных образцов, то есть без раствора в поровом пространстве, мнимая часть диэлектрической проницаемости значительно меньше действительной части, а также наблюдается уменьшение значений диэлектрической проницаемости при увеличении частоты. Насыщение горной породы флюидами приводит к повышению модуля комплексной диэлектрической проницаемости на одних и тех же рассматриваемых частотах. При этом большее содержание солей в воде также ведет к такому же результату. Результаты с аналогичной тенденцией получены на образцах глинистого сланца на частотах до 100 МГц [8]. В сухом состоянии действительная часть диэлектрической проницаемости обладала сравнительно небольшой частотной дисперсией на частотах до 100 МГц, при этом наблюдалось уменьшение значения диэлектрической проницаемости на 30 % по сравнению со значением на 40 Гц.

В аппаратуре для диэлектрического каротажа, как правило, используется несколько частот, так как многочисленные экспериментальные исследования показали, что горные породы обладают свойством диэлектрической дисперсии [16, 17]. Примером является прибор, разработанный компанией Schlumberger, для проведения диэлектрического каротажа

с широким диапазоном частот. Хотя данная аппаратура имеет широкий спектр применений при каротаже, в диапазоне частот 1 кГц – 1 ГГц проведено мало экспериментов по физике горных пород и разработано мало теоретических и вычислительных моделей [18, 19] для описания частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и идентификации по ним минералов и флюидов.

Таким образом, исследование, представленное в данной статье, направлено на изучение частотной дисперсии диэлектрической проницаемости и удельной электрической проводимости.

Материалы и методы

Исследования дисперсии таких электрических свойств, как диэлектрическая проницаемость и удельная электропроводность, проводились на образцах пород-коллекторов — песчанике и известняке. Для проведения экспериментов изотобранных образцов неправильной формы изготавливались образцы-пластины толщиной от 2,5 до 7 мм. Образцы-пластины шлифовались и полировались для достижения плоскопараллельности противоположных граней не хуже, чем 100 мкм (рис. 1). Соблюдение данного условия выполнялось путем контроля толщины образцов при помощи микрометра по 5 точкам с точностью 0,01 мм. Для исключения влияния влаги, оставшейся вследствие процессов подготовки, а также естественной влажности, образцы высушивались в сушильном шкафу

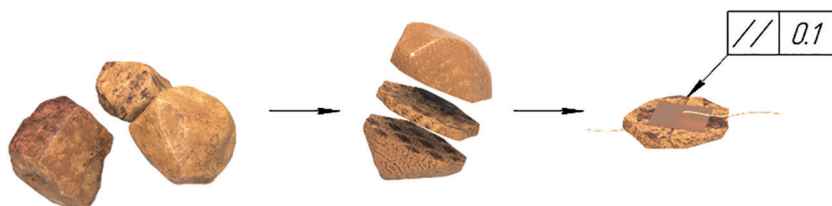


Рис. 1. Подготовка образцов

Fig. 1. Preparation of samples



Рис. 2. Схема проведения измерений
Fig. 2. Measurement scheme

ШС-80-01 при температуре 110 °С до достижения постоянной массы. Масса образцов измерялась на электронных весах с точностью до 0,01 г. Высушивание образцов выполнялось до тех пор, пока разница масс между измерениями не составляла 0,01 г. Таким образом было изготовлено 15 образцов-пластин песчаника и 12 образцов-пластин известняка.

Для проведения измерений использовался цифровой RLC-измеритель АММ-3046, позволяющий измерять емкость C_p от значений 0,00001 пФ до 10 Ф и проводимость G от 0,00001 мкСм до 100 См в частотном диапазоне 20 Гц – 200 кГц. Для каждой исследуемой частоты значения снимаемых показаний с прибора усреднялись по 20 значениям.

Теоретические оценки для расчета дисперсии диэлектрической проницаемости образцов горных пород

Для определения диэлектрической проницаемости и удельной электропроводности были разработаны и применяются различные методы: резонансные, коаксиальные и волноводные; методы, использующие волны в свободном пространстве; методы измерения во временной области [6, 7].

В данной работе измерение диэлектрической проницаемости и проводимо-

сти производилось по схеме измерения емкости и потерь плоского конденсатора, то есть значение диэлектрической проницаемости рассчитывается исходя из значений измеренной емкости. Следует отметить, что при определении данной величины необходимо учитывать влияние на емкость конденсатора с прямоугольными обкладками конечных размеров краевых эффектов. Аналитические выражения для вычисления емкости плоского конденсатора C с обкладками длиной a и шириной b (их толщина $h \ll a, b$ влияния на значение C не оказывает) приведены в работе [20].

Для расчетов использовалась формула емкости такого конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon ab}{d} \left[1 + \frac{d}{\pi b} + \frac{d}{\pi b} \ln \left(\frac{2\pi b}{d} \right) \right] \cdot \left[1 + \frac{d}{\pi a} + \frac{d}{\pi a} \ln \left(\frac{2\pi a}{d} \right) \right] \quad (1)$$

где d – расстояние между электродами, соответствующее толщине исследуемого образца; $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость. Полученное с использованием цифрового RLC-измерителя значение проводимости G пересчитывалось в удельную проводимость σ умножением на ab/d .

В качестве диэлектрического материала, расположенного между обкладками конденсатора, выступает подготовленная образец-пластина горной породы. В качестве электродов использовалась медная фольга толщиной 30 мкм с проводящим клейким слоем скотча. Электроды имели размеры 18×18 мм. Подключение образцов осуществлялось с помощью 4-проводного зажима, что позволяло добиться малой величины паразитной емкости. Схема установки приведена на рис. 2.

Для проверки корректности работы собранной схемы были проведены эксперименты с использованием образцов-пластин из оптического стекла. Известно, что оптическое стекло не обладает частотной дисперсией изучаемых параметров в диапазоне 0–200 кГц, а значение диэлектрической проницаемости является практически постоянным [21].

Результаты

Для калибровки аппаратуры первоначально измерялись значения емкости C и проводимости G конденсатора, заполненного стеклом, в частотном диапазоне 120 Гц – 200 кГц. По полученным значениям рассчитывались относительные диэлектрические проницаемости ε и удельные проводимости σ , величины которых приведены в табл. 1. Среднее значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 5,65$ при среднеквадратичной погрешности 0,09 для стекла № 1 и $\varepsilon = 5,49$ при среднеквадратичной погрешности 0,08 для стекла № 2 в изучаемом частотном диапазоне. Полученные данные свидетельствуют о том, что дисперсия данных величин в частотном диапазоне 1–200 кГц практически отсутствует, что совпадает с табличными данными. Удельная проводимость при

этом растет линейно с возрастанием частоты.

Результат измерений и вычислений частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и удельной проводимости образцов горных пород приведены в табл. 2 и на рис. 3. Данные значения являются усредненными по 15 образцам песчаника и 12 образцам известняка. Приведены доверительные интервалы с использованием коэффициента Чебышева и коэффициентом доверия $\alpha = 0,8$ на каждой из частот.

Обсуждение

По рис. 3 можно отметить, что происходит возрастание значений удельной проводимости горных пород с увеличением частоты. Для песчаника удельная проводимость на 120 Гц равна $0,45 \pm 0,39$ мкСм/м, и далее происходит ее увеличение более чем в 500 раз, до $235,4 \pm 144,7$ мкСм/м на 200 кГц. Изменение и возрастание удельной проводимости горных пород при увеличении частоты внешнего электромагнитного поля зависит от многих факторов: минерального состава, характерного размера зерен, пористости, наличия связанной или свободной воды в поровом пространстве горной породы [22]. Поскольку данные

Таблица 1

Результаты проведенных исследований на модельных образцах стекла Results of the research on model glass samples

Частота, кГц	Стекло № 1 ($d = 5,95$ мм)		Стекло № 2 ($d = 4,94$ мм)	
	диэлектрическая проницаемость ε	удельная проводимость σ , мкСм/м	диэлектрическая проницаемость ε	удельная проводимость σ , мкСм/м
1	5,78	0,02	5,59	0,02
5	5,67	0,05	5,51	0,06
10	5,63	0,10	5,47	0,11
25	5,61	0,21	5,44	0,26
50	5,55	0,42	5,40	0,49
100	5,57	0,73	5,42	0,88
200	5,77	1,29	5,61	1,57

Таблица 2

**Диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость
песчаника и известняка в результате проведенных исследований**
Dielectric permittivity and conductivity of sandstone and limestone as a result of the research

Частота, кГц	Образцы песчаника		Образцы известняка	
	диэлектрическая проницаемость ε	удельная проводи- мость σ , мкСм/м	диэлектрическая проницаемость ε	удельная проводи- мость σ , мкСм/м
0,12	165,5±72,3	0,45±0,39	5,85±0,48	4±2
0,24	150,7±67,6	0,74±0,60	5,71±0,44	6±2
0,36	143,1±63,8	1,03±0,80	5,66±0,42	8±3
0,48	137,8±61,3	1,33±0,98	5,61±0,41	9±3
0,60	133,8±59,6	1,63±1,17	5,58±0,40	11±4
0,72	130,6±57,8	1,94±1,35	5,56±0,40	13±5
0,84	127,9±56,6	2,25±1,54	5,54 ±0,39	14±5
1	124,7±55,2	2,68±1,81	5,52±0,36	16±6
5	89,5±39,0	16,2±11,2	5,37±0,35	54±16
10	70,3±28,9	33,2±24,2	5,32±0,35	94±25
15	59,9±23,2	46,7±34,7	5,30±0,35	131±33
20	52,3±18,9	59,1±44,1	5,29±0,35	169±41
25	46,8±16,0	70,0±52,3	5,29±0,34	208±48
50	33,0 ±8,8	109,1±78,4	5,23±0,34	402±85
80	26,6±5,8	141,8±97,5	5,23±0,34	579±126
100	24,2±4,8	159,9±107,2	5,24±0,33	714±156
120	22,6±4,2	176,3±115,6	5,25±0,34	835±186
150	20,9±3,5	199,2±126,9	5,30±0,34	1015±228
171	20,0±3,2	214,4±134,3	5,33±0,34	1152±258
200	19,3±2,9	235,4±144,7	5,41±0,34	1289±284

параметры меняются от образца к образцу, то наблюдается сильный разброс в значениях удельной проводимости. Такая же тенденция характерна для результатов экспериментов с образцами известняка, отмечено увеличение удельной проводимости с 4 ± 2 нСм/м на 120 Гц до 1289 ± 284 нСм/м на частоте 200 кГц. Возрастание значений удельной проводимости для образцов осадочных горных пород исследовалось также в работах [23 – 25].

По результатам проведенных экспериментов на образцах песчаника можно отметить, что при частоте 120 Гц диэлектрическая проницаемость составляет $\varepsilon = 165,5\pm 72,3$, а далее происходит ее уменьшение более чем в 8 раз до значения $\varepsilon = 19,3\pm 2,9$ на частоте 200 кГц. В исследуемом диапазоне можно отметить большой разброс в значениях как удельной проводимости, так и диэлектрической проницаемости для разных образцов, особенно при частоте ниже

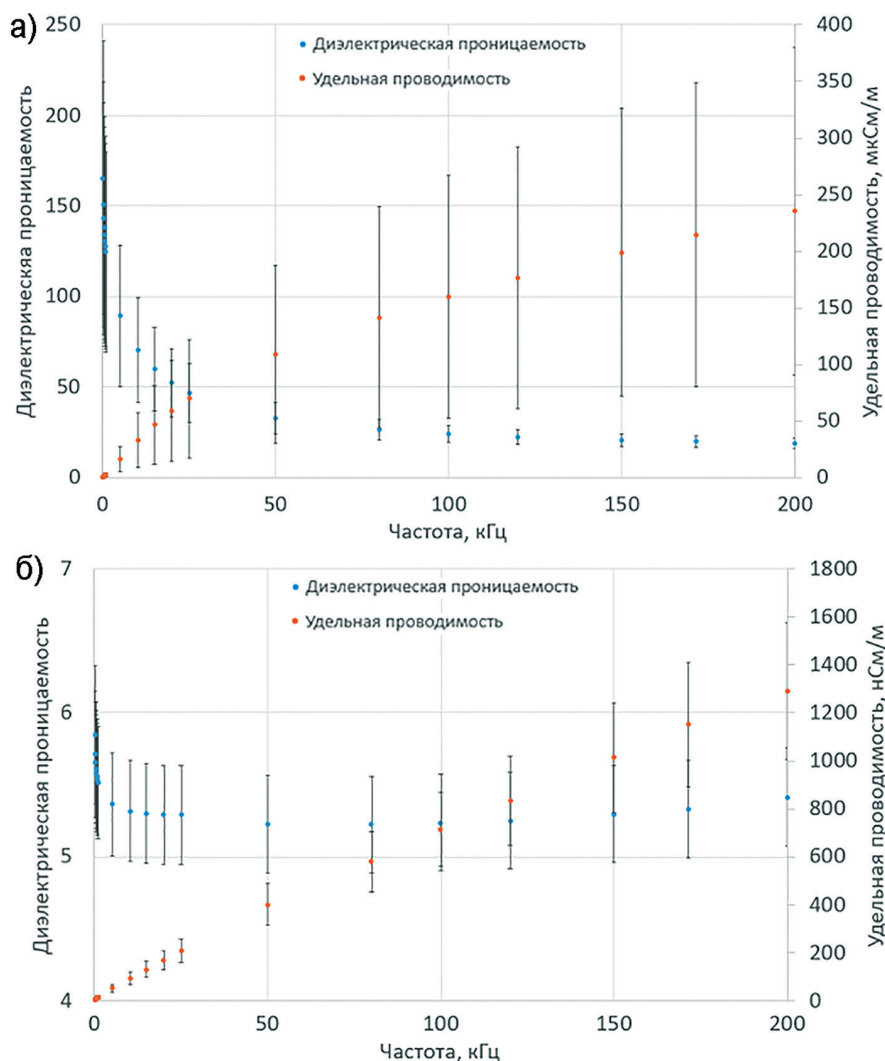


Рис. 3. Частотные зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости: песчаник (а); известняк (б)

Fig. 3. Frequency dependences of dielectric permittivity and conductivity: sandstone (a); limestone (b)

1 кГц, например, при частоте 120 Гц минимальное значение диэлектрической проницаемости составило 108,8 для образца № 3, а максимальное — 220,9 для образца № 14; или при частоте 1 кГц: минимальное значение 75,8, а максимальное — 166,0 для тех же образцов. Однако при увеличении частоты свыше 100 кГц различие значений диэлектрической проницаемости уменьшается и

лежит в пределах от 15,3 до 21,0 на частоте 200 кГц. Похожие тенденции наблюдались в работе [26], в которой исследования выполнялись также на образцах песчаника. По ее результатам, диэлектрическая проницаемость уменьшается примерно в 100 раз в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц.

Диэлектрические свойства материала связаны с его поляризуемостью, которая

обусловлена перемещением связанных зарядов под действием электрического поля относительно их равновесного положения. Низкочастотная дисперсия диэлектрической проницаемости твердых тел, которая изучается в данной работе, может быть обусловлена поляризацией, связанной со скоплением заряда на границах структурных неоднородностей, так называемой межфазной поляризацией или поляризацией Максвелла–Вагнера–Силларса [8]. Время релаксации поляризации для твердых тел может лежать в диапазоне от нескольких миллисекунд до нескольких микросекунд (для льда, например, это время составляет 1 мс, что соответствует частоте релаксации 1 кГц). Поэтому при низких частотах вектор поляризации успевает «отслеживать» изменения внешнего электрического поля, что приводит к увеличению значения вектора поляризации и, следовательно, к увеличению значения диэлектрической проницаемости, что и наблюдается в данной работе.

Так как песчаник является полиминеральной горной породой, состоящей из полевого шпата, кварца, слюды, включений пирита, межфазная поляризация проявляется на границах различных по составу зерен [27]. Для разных молекул минералов характерно наличие различных времен релаксации, которые приводят к сильной межфазной поляризации и обуславливают дисперсию диэлектрической проницаемости для песчаника практически во всем исследуемом частотном диапазоне вплоть до 200 кГц. Поскольку другая изучаемая в данной работе горная порода, известняк, является в основном мономинеральной средой (CaCO_3), то при ее помещении в электрическое поле наблюдается незначительная межфазная поляризация по сравнению с песчаником. Таким образом, наблюдаемая дисперсия диэлектрической проницаемости известняка в диапазоне

0,12–200 кГц кратно меньше, чем у песчаника, и составляет не более 11% и проявляется на частотах 0,12–5 кГц, где вклад в данную величину дает межфазная поляризация.

Приведенная в работе относительная диэлектрическая проницаемость является действительной частью комплексной диэлектрической проницаемости. Изучение мнимой части является важным вопросом для оценки полной величины комплексной диэлектрической проницаемости и предполагается в дальнейшем.

Заключение

Таким образом, в ходе работы была изучена частотная дисперсия диэлектрической проницаемости и удельной проводимости пород-коллекторов песчаника и известняка. Подтверждено, что основной вклад в поляризацию в низкочастотной области, а именно на рассматриваемых в работе частотах от 120 Гц до 200 кГц, для образцов горных пород вносит межфазная поляризация. Она же оказывает влияние на дисперсию диэлектрических свойств. Выяснено, что диэлектрическая проницаемость рассматриваемых образцов песчаника изменяется от значения $165,5 \pm 72,3$ на 120 Гц до $19,3 \pm 2,9$ на 200 кГц. Для известняка разброс значений диэлектрической проницаемости оказался меньше, их изменение составило от $5,85 \pm 0,48$ до $5,41 \pm 0,34$. При частотах более 5 кГц значение диэлектрической проницаемости практически не изменяется. Отмечено, что наличие в составе песчаника разных минералов приводит к большей дисперсии диэлектрической проницаемости, а вследствие этого — к большим ее значениям для полиминеральной среды. В то же время известняк, являясь более однородной по составу и структуре горной породой, обладает меньшей дисперсией диэлектрических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинов Л. М., Герасименко А. П., Гуляев Ю. В., Долголаптев А. В., Черепенин В. А. О возможности создания технологии «взрывного» разрушения массива горных пород-диэлектриков направленным электромагнитным потоком концентрированной энергии СВЧ // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. — 2019. — № 2. — 42 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.2.4.
2. Мачерет Ю. Я., Сосновский А. В., Глазовский А. Ф. Диэлектрические свойства почв и грунтов и оценка их гидротермического состояния под снежным покровом по данным радиозондирования // Лед и снег. — 2022. — Т. 62. — № 2. — С. 203–216. DOI: 10.31857/S2076673422020126.
3. Сизин П. Е., Вознесенский А. С., Кидима Мбомби Л. К. Влияние длины трещин со случайными параметрами на электрическую проводимость горных пород // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8. — № 1. — С. 30–38. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-07-11.
4. Аузин А. А., Зацепин С. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации) // Вестник ВГУ. Серия Геология. — 2015. — № 4. — С. 122–127.
5. Cai L., Deng S., Yuan X. Detection performance analysis of array dielectric dispersion logging based on sensitivity function // Sensors. 2023, vol. 23, no. 12, article 5737. DOI: 10.3390/s23125737.
6. Wang S., Sun Q., Wang N., Yang L. Variation in the dielectric constant of limestone with temperature // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2020, vol. 79, pp. 1349–1355. DOI: 10.1007/s10064-019-01647-3.
7. 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 11065.
8. Connolly P. R. J., Josh M., O'Neill K. T., Seltzer S. J., Wigand M. O., Clennell M. B., May E. F., Johns M. L. Dielectric polarization studies in partially saturated // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019, vol. 124, no. 11, pp. 10721–10734.
9. 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.
10. Gonzalez-Teruel J. D., Jones S. B., Soto-Valles F., Torres-Sanchez 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, vol. 20, article 6678. DOI: 10.3390/s20226678.
11. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics // Transactions of the AISME. 1946, vol. 146, no. 1, pp. 54–62.
12. Shen L. C., Savre W. C., Price J. M., Athavale K. Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies // Geophysics. 1985, vol. 50, no. 4, pp. 692–704.
13. 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.
14. Yan W., Sun J., Zhang J., Yuan W., Zhang L., Cui L., Dong H. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology // Journal of Geophysics and Engineering. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 153–163. DOI: 10.1088/1742-2140/aa8715.
15. Бобров П. П., Беляева Т. А., Крошка Е. С., Родионова О. В. Связь низкочастотной диэлектрической проницаемости с проводимостью слабозасоленных образцов песка // Техника радиосвязи. — 2020. — № 3 (46). — С. 85–94. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-46-85-94.
16. Loewer M., Günther T., Igel J., Kruschwitz S., Martin Y., Wagner N. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – a combined permittivity and conductivity model // Geophysical Journal International. 2017, vol. 210, no. 3, pp. 1360–1373. DOI: 10.1093/gji/ggx242.
17. Ramia M. E., Martin C. A. Sedimentary rock porosity studied by electromagnetic techniques: nuclear magnetic resonance and dielectric permittivity // Applied Physics A. 2015, vol. 11, no. 2, pp. 769–777.
18. Zhao P., Fu J., Shi Y., Li G., Ostadhassan M., Luo M., Mao Zh. Hydrocarbon saturation in shale oil reservoirs by inversion of dielectric dispersion logs // Fuel. 2020, vol. 266, article 116934. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116934.
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. 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.

21. Chen S., Nguyen K. N., Afsar M. N. Complex dielectric permittivity measurements of glasses at millimeter waves and terahertz frequencies / Proceedings of the 36th European Microwave Conference. 2007, pp. 384–387.

22. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. Electrical Properties. Cambridge University Press. 2020, 728 p.

23. Hongshuai Bao, Tongcheng Han, Li-Yun Fu Dielectric properties of porous rocks with partially saturated fractures from finite-difference modeling // Geophysics. 2022, vol. 87, no. 5, pp. 1–53. DOI: 10.1190/geo2022-0041.1.

24. Han Tongcheng, Yang Y. S. Numerical and theoretical simulations of the dielectric properties of porous rocks // Journal of Applied Geophysics. 2018, vol. 159, pp. 186–192.

25. Olatinsu O. B., Olorode D. O., Oyedele K. F. Radio frequency dielectric properties of limestone and sandstone from Ewekoro, Eastern Dahomey Basin // Advances in Applied Science Research. 2013, vol. 4, no. 6, pp. 150–158.

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

27. Norbistrath J. H., Weger R. J., Eberli G. P. Complex resistivity spectra and pore geometry for predictions of reservoir properties in carbonate rocks // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2017, vol. 151, pp. 455–467. **WJAS**

REFERENCES

1. Blinov L. M., Gerasimenko A. P., Gulyaev Yu. V., Dolgolaptev A. V., Cherepenin V. A. About a possible development of an «explosive» massive hard rocks-dielectrics destruction technology, based on a directed concentrated electromagnetic microwave power flux. *Journal of Radio Electronics*. 2019, no. 2. 42 p. [In Russ]. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.2.4.

2. Macheret Yu. Ya., Sosnovsky A. V., Glazovsky A. F. Dielectric properties of soils and assessment of their hydrothermal state under snow cover based on radio-echo sounding data. *Ice and Snow*. 2022, vol. 62, no. 2, pp. 203–216. [In Russ]. DOI: 10.31857/S2076673422020126.

3. Sizin P. E., Voznesenskii A. S., Kidima-Mbombi L. K. Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 30–38. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-07-11.

4. Auzin A. A., Zatsepin S. A. About the dispersion of dielectric permeability of the geological environment (in connection with interpretation of GPR materials). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2015, no. 4, pp. 122–127. [In Russ].

5. Cai L., Deng S., Yuan X. Detection performance analysis of array dielectric dispersion logging based on sensitivity function. *Sensors*. 2023, vol. 23, no. 12, article 5737. DOI: 10.3390/s23125737.

6. Wang S., Sun Q., Wang N., Yang L. Variation in the dielectric constant of limestone with temperature. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020, vol. 79, pp. 1349–1355. DOI: 10.1007/s10064-019-01647-3.

7. 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 11065.

8. Connolly P. R. J., Josh M., O'Neill K. T., Seltzer S. J., Wigand M. O., Clennell M. B., May E. F., Johns M. L. Dielectric polarization studies in partially saturated. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019, vol. 124, no. 11, pp. 10721–10734.

9. Zinnatullin R. R., Kovaleva L. A., Sultanguzhin R. F. Investigation of dielectric properties of water-softened rocks and their heating in electromagnetic field. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2019, vol. 57, no. 1, pp. 143–145. [In Russ].

10. Gonzalez-Teruel J. D., Jones S. B., Soto-Valles F., Torres-Sanchez 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, vol. 20, article 6678. DOI: 10.3390/s20226678.

11. Archie G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AISME*. 1946, vol. 146, no. 1, pp. 54–62.

12. Shen L. C., Savre W. C., Price J. M., Athavale K. Dielectric properties of reservoir rocks at ultra-high frequencies. *Geophysics*. 1985, vol. 50, no. 4, pp. 692–704.

13. 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.
14. Yan W., Sun J., Zhang J., Yuan W., Zhang L., Cui L., Dong H. Studies of electrical properties of low-resistivity sandstones based on digital rock technology. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018, vol. 15, no. 1, pp. 153–163. DOI: 10.1088/1742-2140/aa8715.
15. Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Kroshka E. S., Rodionova O. V. Relationship of low-frequency dielectric permittivity with the conductivity of low-salted sand samples. *Radio communication technology*. 2020, no. 3 (46), pp. 85–94. [In Russ]. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-46-85-94.
16. Loewer M., Günther T., Igel J., Kruschwitz S., Martin Y., Wagner N. Ultra-broad-band electrical spectroscopy of soils and sediments – a combined permittivity and conductivity model. *Geophysical Journal International*. 2017, vol. 210, no. 3, pp. 1360–1373. DOI: 10.1093/gji/ggx242.
17. Ramia M. E., Martin C. A. Sedimentary rock porosity studied by electromagnetic techniques: nuclear magnetic resonance and dielectric permittivity. *Applied Physics A*. 2015, vol. 11, no. 2, pp. 769–777.
18. Zhao P., Fu J., Shi Y., Li G., Ostadhassan M., Luo M., Mao Zh. Hydrocarbon saturation in shale oil reservoirs by inversion of dielectric dispersion logs. *Fuel*. 2020, vol. 266, article 116934. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116934.
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. Ostertak D. I. An analysis of electrostatic interactions in parallel-plate MEMS with regard to fringing field effects within a 3D-approach. *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*. 2017, no. 1(34), pp. 116–132. [In Russ]. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-1-116-132.
21. Chen S., Nguyen K. N., Afsar M. N. Complex dielectric permittivity measurements of glasses at millimeter waves and terahertz frequencies. *Proceedings of the 36th European Microwave Conference*. 2007, pp. 384–387.
22. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. *Electrical Properties*. Cambridge University Press. 2020, 728 p.
23. Hongshuai Bao, Tongcheng Han, Li-Yun Fu Dielectric properties of porous rocks with partially saturated fractures from finite-difference modeling. *Geophysics*. 2022, vol. 87, no. 5, pp. 1–53. DOI: 10.1190/geo2022-0041.1.
24. Han Tongcheng, Yang Y. S. Numerical and theoretical simulations of the dielectric properties of porous rocks. *Journal of Applied Geophysics*. 2018, vol. 159, pp. 186–192.
25. Olatinsu O. B., Olorode D. O., Oyedele K. F. Radio frequency dielectric properties of limestone and sandstone from Ewekoro, Eastern Dahomey Basin. *Advances in Applied Science Research*. 2013, vol. 4, no. 6, pp. 150–158.
26. Lesmes D. P., Morgan F. D. Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. *Journal of Geophysical Research*. 2001, vol. 106, no. B7, pp. 13329–13346.
27. Norbistrath J. H., Weger R. J., Eberli G. P. Complex resistivity spectra and pore geometry for predictions of reservoir properties in carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, vol. 151, pp. 455–467.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гапеев Артем Андреевич¹ – аспирант,
 e-mail: agapeev@misis.ru, ORCID ID: 0009-0001-7744-9426,
 Черепецкая Елена Борисовна¹ – д-р техн. наук,
 профессор, e-mail: echerepetskaya@mail.ru,
 ORCID ID: 0000-0002-9642-21492,
 Кудинов Игорь Александрович¹ – инженер научного проекта,
 e-mail: igor@optoacoustic.ru,
 Семенов Ярослав Глебович¹ – лаборант-исследователь,
 e-mail: y@48.org, ORCID ID: 0000-0003-0313-2714,
 Васильевых Владимир Владимирович¹ – лаборант-исследователь,
 e-mail: vova398777@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8128-0531,
¹ НИТУ МИСИС.

Для контактов: Гапеев А.А., e-mail: agapeev@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Gapeev¹, Graduate Student, e-mail: agapeev@misis.ru,
ORCID ID: 0009-0001-7744-9426,

E.B. Cherepetskaya¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: echerepetskaya@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9642-21492,

I.A. Kudinov¹, Research Project Engineer,
e-mail: igor@optoacoustic.ru,

Ya.G. Semenov¹, Laboratory Assistant,
e-mail: y@48.org, ORCID ID: 0000-0003-0313-2714,

V.V. Vasilevykh¹, Laboratory Assistant,
e-mail: vova398777@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0001-8128-0531,
¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.A. Gapeev, e-mail: agapeev@misis.ru.

Получена редакцией 13.05.2024; получена после рецензии 18.06.2024; принята к печати 10.08.2024.

Received by the editors 13.05.2024; received after the review 18.06.2024; accepted for printing 10.08.2024.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЮ ХОДОВЫХ РОЛИКОВ КОНВЕЙЕРА ROPECON® (2024, № 5, СБ 12, 12 с.)

Галкин Владимир Иванович — докт. техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС,

Бердюгин Илья Андреевич — аспирант, НИТУ МИСИС e-mail: aberd@mail.ru.

Рассмотрен конвейер с лентой, имеющей гофрированные борта и ходовые ролики с осями, что сказывается на способе ее перемещения вдоль става конвейера. От величины коэффициента сопротивления вращения ходовых роликов зависят величины распределенных сопротивлений движению конвейерной ленты на грузовой и порожней ветви конвейера. Указанные величины оказывают влияние на: выбор типа и параметров ленты; величину тягового усилия развиваемого приводом конвейера, а следовательно, и на его потребляемую мощность. Рассмотрены особенности нагружения отверстия в цапфе ходового ролика при разных зазорах ε между отверстием в ролике и его осью. Установлено, что в случае применения подшипников качения составляющая коэффициента сопротивления движению ленты от сопротивления вращению ходовых роликов совершенно ничтожна, по сравнению со случаем отсутствия подшипников. В обоих случаях эта величина не зависит от действующей нагрузки на ходовой ролик, состоящей от веса ленты с гофробортами, расположенного на ней груза, и веса оси ходового ролика.

Ключевые слова: лента, гофроборт, ходовые ролики, цапфа, нагружение, давление, подшипник качения, зазор, момент вращения, зона контакта.

DETERMINATION OF THE ROTATIONAL RESISTANCE OF ROPECON® CONVEYOR ROLLERS

V.I. Galkin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor; I.A. Berdygin¹, Graduate Student, e-mail: aberd@mail.ru,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Due to the fact that in the conveyor considered in the article, the belt, unlike a traditional belt conveyor, has corrugated sides and running rollers with axles, which affects the way it moves along the conveyor line. Magnitude of the resistance coefficient of their rotation of running rollers determines the values of distributed resistance to the movement of the conveyor belt on the cargo and empty branches of the conveyor, which influence: the choice of the type and parameters of the belt; the magnitude of the traction force developed by the conveyor drive, and consequently, its power consumption. The features of loading a hole in the journal of a running roller at different gaps ε between the hole in the roller and its axis are considered. It has been established that in the case of using rolling bearings, the component of the coefficient of resistance to the movement of the belt from the resistance to rotation of the running rollers is completely negligible, compared to the case of the absence of bearings. In both cases, this value does not depend on the effective load on the running roller, which consists of the weight of the tape with corrugated sides, the load located on it, and the weight of the running roller axis.

Key words: tape, corrugated board, running rollers, axle, loading, pressure, rolling bearing, gap, torque, contact zone.