

Раздел 1. Физика угля и горных пород

УДК 537.868: 53.043

Т.А. Василенко¹, А.К. Кириллов¹, А.С. Дорошкевич², А.В. Шило²

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕННОГО УГЛЯ ПРИ МАГНИТОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

¹Институт физики горных процессов НАН Украины

²Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины

Исследовался уголь ранней стадии метаморфизма методом электрохимического импеданса. Представлены зависимости от частоты относительной диэлектрической проницаемости, удельной электропроводности и тангенса потерь для исходного, увлажненного и просушенного образца. Показано, что воздействие на образцы импульсным магнитным полем низкой частоты приводит к изменению этих величин в отдельных интервалах частот.

В условиях интенсификации добычи угля в шахтах Украины актуальной является дегазация угольных пластов, обеспечивающая безопасность работы шахтеров. В настоящее время есть достаточно традиционных способов дегазации и извлечения метана. Тем не менее разрабатываются новые подходы для решения таких задач. Один из них предусматривает воздействие электромагнитным полем на угольный пласт [1]. В естественных условиях на электропроводность влияет содержание влаги в угольном пласте. Эффективным методом, позволяющим исследовать влияние влажности, а также физических воздействий на электрофизические свойства пористых сред в широком интервале частот, является метод электрохимического импеданса.

Образцы и условия проведения эксперимента

Использовались образцы угля марки ДГ из шахты «Россия» (ГП «Селидовуголь») в виде параллелепипеда $9 \times 8 \times 1.5$ мм, на поверхности которых наносился углерод, обеспечивающий надежный контакт с электродами. Запись спектров электрохимического импеданса (СЭИ) проводилась при комнатной температуре (19°C) в автоматическом режиме с помощью прецизионного виртуального измерителя-анализатора параметров импеданса типа 2В-1 [2]. Регистрировались частотные зависимости мнимой $\text{Im}Z(\omega)$ и реальной $\text{Re}Z(\omega)$ составляющих комплексного сопротивления $Z(\omega)$ в диапазоне частот $f = \omega/2\pi$ 1 Гц – 1 МГц. Время измерения $t = 5$ с. Съёмка СЭИ-спектров

проводилась до, непосредственно после и в различные промежутки времени после экспозиции образцов МИВ, в частности, через 20, 40, 60 мин, а также через 2, 3, 5, 24 и 48 часов. После измерения электрофизических параметров исходных образцов они подвергались воздействию последовательности униполярных экспоненциально-нарастающих импульсов магнитного поля, создаваемого соленоидом. Частота следования импульсов 1 Гц, длительность отдельного импульса 600 мкс, переднего фронта – 30 мкс. При таких низких частотах основной вклад в энергию электромагнитных колебаний в объеме соленоида делает магнитная компонента поля. Поэтому дальше это электромагнитное воздействие будем называть магнитоимпульсным (МИВ). Подробное описание лабораторной установки, предназначенной для МИВ, содержится в статье [3]. Затем образцы насыщались в парах воды в климатической камере в течение одного месяца и подвергались повторному исследованию СЭИ в идентичном режиме.

Анализировались импедансные спектры, частотная зависимость действительной ReZ , мнимой ImZ компонент комплексного импеданса и тангенса диэлектрических потерь $tg\delta = ImZ/ReZ$. Аппроксимацию модельного и экспериментального спектров импеданса выполняли с помощью компьютерной программы, опубликованной на вебсайте Европейского интернет-центра импедансной спектроскопии [4, 5].

Основные результаты измерений

На рис. 1–3 представлены импедансные спектры, частотные зависимости их составляющих в различные промежутки времени после экспозиции МИВ. Характер импедансных спектров (рис. 1) указывает на сложную зависимость электрического отклика исследуемого образца угля (дисперсной системы) на возбуждающий сигнал в используемом частотном диапазоне. Электрофизические свойства исследуемого образца не могут быть смоделированы простой эквивалентной схемой параллельного соединения емкости и активного сопротивления, годограф которой имеет вид полуокружности в координатах $ImZ-ReZ$. Влагонасыщенный уголь является ультрадисперсной системой, где дисперсной фазой является агрегат угольного вещества, а дисперсионной средой – вода, распределенная в объеме порового пространства. Таким образом, материал угля состоит из трех основных компонент, отличающихся агрегатным состоянием вещества: пористой углеродной матрицы, воды и газа, заполняющего свободный объем пор. Вероятно, многофазностью данной физической системы обусловлена сложность протекающих в ней электрофизических процессов и соответствующей эквивалентной электрической схемы (ЭЭС).

Вид зависимости $tg\delta(f)$ указывает на существенную неоднородность структуры угольного вещества, что приводит к широкому набору значений времен релаксации диэлектрических потерь. Значения максимума этой зависимости изменяются со временем.

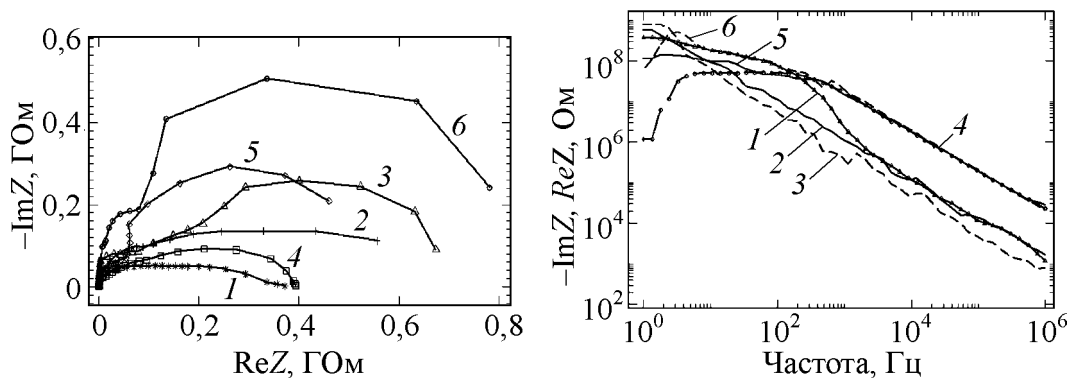


Рис. 1. Импедансные спектры (годографы) для различных моментов времени после МИВ: 1 – непосредственно после МИВ; 2 – через 40 мин; 3 – через 2 ч; 4 – через 5 ч; 5 – через 24 ч; 6 – через 48 ч

Рис. 2. Зависимость ReZ (1–3) и ImZ (4–6) от частоты для трех моментов времени после МИВ: 1, 4 – непосредственно после МИВ; 2, 5 – через 40 мин; 3, 6 – через 48 ч

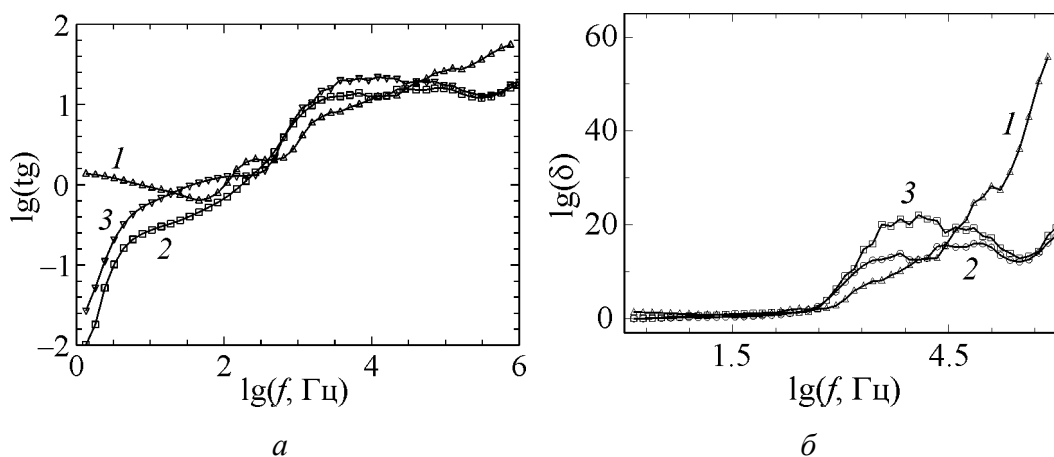


Рис. 3. Зависимость от частоты тангенса диэлектрических потерь до (1), после (2) и через 2 часа после МИВ (3): а – двойные логарифмические координаты; б – полулогарифмические координаты

Тем не менее представляется возможным описать систему уголь-флюид в терминах эффективных диэлектрических проницаемостей ϵ или электропроводностей σ . На комплексной плоскости диэлектрическая проницаемость представляется в виде вектора

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \tag{1}$$

где j – мнимая единица, а действительная ϵ' и мнимая ϵ'' компоненты диэлектрической проницаемости выражаются соответственно через емкость $C(\omega)$ и электрическое сопротивление $R(\omega)$ образца через следующие равенства:

$$\begin{aligned} \epsilon'(\omega) &= C(\omega)d / \epsilon_0 S, \\ \epsilon''(\omega) &= R^{-1}(\omega)d / (\omega\epsilon_0 S). \end{aligned} \tag{2}$$

В этом выражении d и S – толщина образца и площадь электродов на его поверхности соответственно, ω – циклическая частота.

Удельная электропроводность (действительная часть комплексной величины $\sigma(\omega)$), характеризующая активные потери, связана с диэлектрической проницаемостью равенством

$$\sigma'(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon''(\omega) \cdot \omega. \quad (3)$$

На рис. 4 и 5 представлены данные по частотной зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости, а также электропроводности для исследуемого образца.

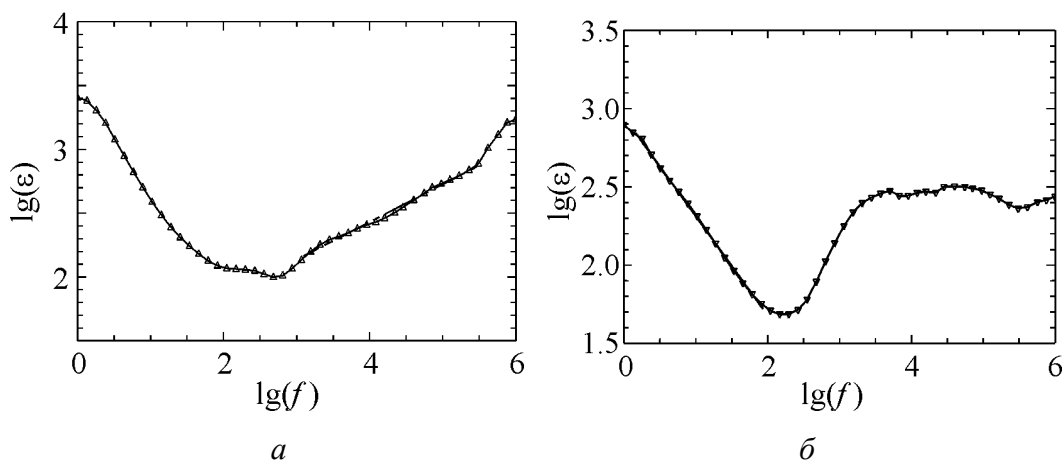


Рис. 4. Зависимость ε'' исходного (а) и после магнитоимпульсного воздействия (б) влагонасыщенного образца угля от частоты в двойных логарифмических координатах

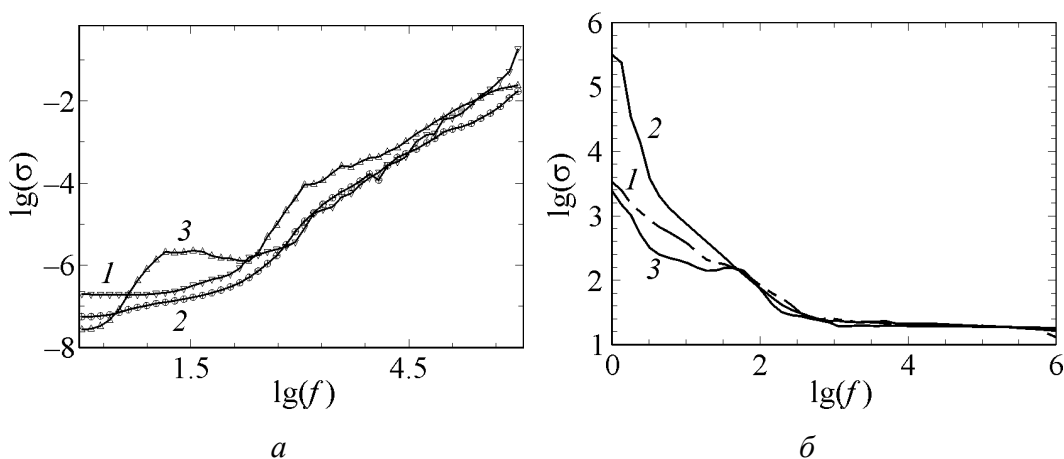


Рис. 5. Зависимость электропроводности (а) и действительной части диэлектрической проницаемости ε' (б) исходного влагонасыщенного образца угля от частоты в двойных логарифмических координатах до (1), после (2) и через 48 часов (3) после МИВ

Следует отметить, что обе величины изменяются в широких пределах в интервале частот до 1 МГц, но для электропроводности наблюдается линейная зависимость в двойных логарифмических координатах при частотах $f > 1$ кГц, что указывает на скейлинговую зависимость в виде $\sigma' = \sigma_0 f^\alpha$, в которой смысл коэффициента σ_0 отличен от электропроводности на постоянном токе. Действительно, при более низких частотах электропроводность и диэлектрическая проницаемость могут варьироваться и иметь различные значения в зависимости от влажности образца и момента времени после импульсного воздействия.

Согласно [6] тангенс угла наклона графика $\sigma(f)$ в двойных логарифмических координатах связан с фрактальной размерностью D_f поверхности пор равенством $\alpha = (D_f - 1)/2$. Не для всех вариантов применим такой подход, так как экспериментальные данные показывают значения $\alpha > 1$, что приводит к значениям $D_f > 3$, превышающим размерность пространства вложения $d = 3$ для поверхности. Это наблюдается для исходного исследуемого образца и для момента измерений непосредственно после МИВ. Через 40 мин, а также через 5 и 48 часов после МИВ получены значения D_f : 2.88, 2.68 и 2.84 соответственно.

Поскольку исходные экспериментальные данные представлены в виде значений $\text{Im}Z$ и $\text{Re}Z$, для дальнейшего анализа были получены значения эффективной действительной части диэлектрической проницаемости ε' из выражения (2) для некоторых моментов времени. Из рис. 5,б следует, что ε' так же, как и $\text{Im}Z$, испытывают наибольшие изменения в низкочастотной области спектра $f < 100$ Гц, связанные с процессами поляризации. Электропроводность образцов на частоте 1 МГц увеличивается по сравнению с низкочастотной областью на 3–5 порядков. Отсутствие максимума диэлектрических потерь в исследуемом интервале частот для исходного образца указывает на достаточно малые времена релаксации $\tau < 1/\omega_{\text{max}} = 1/2\pi f_{\text{max}} = 1.6 \cdot 10^{-7}$ с.

Анализ результатов измерений

Сравним полученные при эксперименте результаты измерений для диэлектрической проницаемости и электропроводности углей с опубликованными данными [7–10]. А.А. Агроскин в своей монографии [7] приводит только данные измерений на постоянном токе. Отмечается, что характеристики углей зависят от многих факторов: влажности, степени окисления, температуры. Отметим, что в интервале температур от комнатной до 100° С удельное электрическое сопротивление ρ уменьшается более чем на два порядка по величине и изменяется от 10^{10} до 10^6 Ом·см. Диэлектрическая проницаемость углей зависит от частоты. Поэтому различные образцы углей можно характеризовать двумя величинами: ε_0 – диэлектрической проницаемостью на постоянном токе ($\omega = 0$) и диэлектрической проницаемостью ε_∞ на высоких (оптических) частотах, которая для аморфных диэлектриков

совпадает с величиной квадрата показателя преломления света. Японские угли имеют относительные диэлектрические проницаемости в пределах 2–6, что указывает на отсутствие дополнительной поляризации полярных ОН и других групп в угольном веществе [8]. Диэлектрическая проницаемость увеличивается для увлажненных углей. Минимальные значения для сухих углей достигаются для образцов с содержанием углерода 80–90%. При увеличении электропроводности высокометаморфизированных углей ϵ снова увеличивается. Существенное увеличение ($\epsilon > 4$) указывает на возрастание дипольного момента молекул, входящих в состав угольного вещества.

Широкое исследование электрофизических свойств проведено для углей из Бангладеш [9] на постоянном токе в интервале температур от комнатной до 573°C. В качестве образцов сравнения взяты угли Иллинойского бассейна (США), из Лисичанска (Украина), а также из Индии. Получены значения удельного сопротивления для образцов вдоль и поперек напластования, в зависимости от глубины залегания пласта и влажности. Наблюдался полупроводниковый характер зависимости удельного электрического сопротивления ρ от температуры в большом интервале температур, что предполагает уменьшение ρ при возрастании температуры. При изменении глубины залегания пласта на 100–150 м ρ уменьшается более, чем на порядок. Кроме того, в таком же отношении находятся значения ρ для расположения электродов на образцах поперек и вдоль напластования. Характерные значения удельного сопротивления для одного из образцов составляют $8.2 \cdot 10^8$ Ом·м для глубины 172 м и $6.15 \cdot 10^6$ Ом·м для 195 м. Увлажненные образцы с содержанием 2.5–3.5 % достигали значений $\rho = 3.15 \cdot 10^3$ – $4.11 \cdot 10^4$ Ом·м при температурах ниже 100°C.

Рассматриваемые в статье угли имеют самые различные значения диэлектрической проницаемости. Основной особенностью их электрофизических параметров являются высокие значения диэлектрической проницаемости в исследуемом интервале частот (рис. 5,б). При уменьшении частоты ($f \rightarrow 0$) значения ϵ' превышают 10^3 , а после МИВ – превышают даже 10^4 . При максимальной частоте измерений импеданс-спектрометра $f = 1$ МГц ϵ' достигает значений 16–20, которые превосходят значение $\epsilon = 4$, полученное другими авторами для сухих углей. Это означает, что в структуре угля ДГ находится достаточно большое количество молекул, которые поляризуются при протекании переменного электрического тока в широком диапазоне частот. Кроме того, измеряемые образцы содержали влагу, которая усиливала эффекты поляризации элементов сложной неоднородной среды угольного вещества. Высокие значения ϵ' невозможно объяснить только содержанием влаги, так как использование формулы для гетерогенных сред [10] вида

$$\epsilon' = w\epsilon'_w + (1-w)\epsilon'_c \quad (4)$$

не позволяет объяснить значения $\epsilon' > 10$. В выражении (4) w – влажность образца, ϵ'_w , ϵ'_c – диэлектрическая проницаемость воды и сухого угля соответственно. Для пористых сред необходимо применять выражение [11]:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right)^{1/3} = 1 - \Phi_2, \quad (5)$$

где ε , ε_1 , ε_2 – диэлектрическая проницаемость для смеси, воды и диэлектрических включений соответственно, а Φ_2 – доля объема включений. При значениях $\varepsilon_1 = 81$ для воды и $\varepsilon_2 = 4.5$ для сухого угля $\varepsilon(\omega)$ будет определяться влажностью $W = 1 - \Phi_2$ для двухфазной среды.

Значения электропроводности также изменяются в широком диапазоне (рис. 5,а). Как следует из табл. 1, практически во всем диапазоне частот для увлажненного образца угля ДГ происходит уменьшение электропроводности после МИВ. Потери снижаются практически на пять порядков при увеличении частоты сигнала до 1 МГц. Линейный участок уравнения регрессии $\lg(\sigma') = a \cdot \lg(f) + b$ позволяет по тангенсу угла наклона графика к оси абсцисс проследить за изменением эффекта МИВ со временем в интервале частот $f > > 1$ кГц. Данные для коэффициента указывают на уменьшение дисперсии электропроводности $d\sigma'/df$ после МИВ (табл. 2).

Таблица 1

Электропроводность угля ДГ на избранных частотах до и после магнитоимпульсного воздействия (Ом·м)⁻¹

Частота	1	10	100	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	8·10 ⁵
До МИВ	2·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁷	6·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁶	1.5·10 ⁻⁴	3.7·10 ⁻³	6·10 ⁻²
После МИВ	5.6·10 ⁻⁸	1.1·10 ⁻⁷	2.6·10 ⁻⁷	8·10 ⁻⁶	1.4·10 ⁻⁴	1.8·10 ⁻³	1.2·10 ⁻²

Таблица 2

Значения коэффициента а в регрессионной зависимости $\lg(\sigma') = a \cdot \lg(f) + b$ для избранных моментов времени

До МИВ	После МИВ	40 мин	5 час	48 час
1.32	1.06	0.98	0.84	0.92

Сравним представленные выше результаты для исходного образца угля ДГ, включающего сорбированную влагу, с данными для сухого образца. Так как не удалось обеспечить стабильность работы импеданс-спектрометра при измерениях в интервале частот менее 500 Гц, ниже все результаты относятся к интервалу частот 500 Гц – 1 МГц. Прежде всего, следует обратить внимание на годограф (рис. 6). Заметны изменения электрофизических параметров образца после МИВ, которые, однако, не так ярко выражены, как для влагонасыщенного образца. Следует указать на одну особенность, наблюдаемую и для увлажненного образца (рис. 1). Годограф, полученный через 5 ч после МИВ, нарушает общую тенденцию возрастания площади под кривой графика. Этот эффект отражает общую закономерность образцов, подвергнутых МИВ, наблюдаемую для других пористых сред, и указывает на колебательный характер медленной релаксации электрофизических свойств двойных электрических слоев, возбужденных импульсным магнитным полем. Не отмечены изменения в зависимости

$\text{Im}Z$ от частоты (график здесь не приводится). Это означает, что все изменения происходят только для мнимой компоненты комплексной диэлектрической проницаемости ϵ'' из выражения (2), которая в свою очередь выражается через электропроводность и удельное сопротивление.

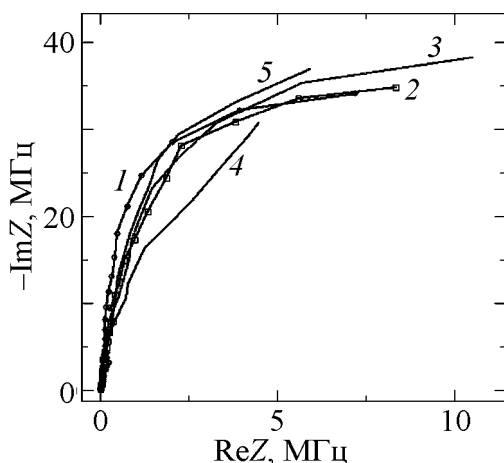


Рис. 6. Годограф сухого образца угля ДГ для различных моментов времени после магнитоимпульсного воздействия: 1 – до, 2 – непосредственно после МИВ, 3 – через 1 ч, 4 – через 5 ч, 5 – через 24 ч

Действительно, как следует из рис. 7,а, $\sigma'(f)$ изменяется в наибольшей степени на частотах $f > 10^4$ Гц, а МИВ приводит к увеличению электропроводности. На частоте 10^5 Гц происходит изменение наклона графика. В интервале 10^4 – 10^5 Гц возможна аппроксимация зависимости от $\lg(f)$ с коэффициентом $a = 0.81$. Теорию фракталов удалось применить только для исходного образца. Этому значению соответствует фрактальная размерность $D_f = 2.62$.

Для более высоких частот $a = 0.86$. Для всех других моментов времени коэффициент $a > 1$ и имеет максимальное значение $a = 1.86$ непосредственно после МИВ, уменьшаясь до ≈ 1.5 в другие моменты времени. Этот результат свидетельствует о том, что МИВ изменяет электрофизические свойства поверхности пор, что приводит к неопределенности в интерпретации частотной зависимости электропроводности для пористого угольного вещества.

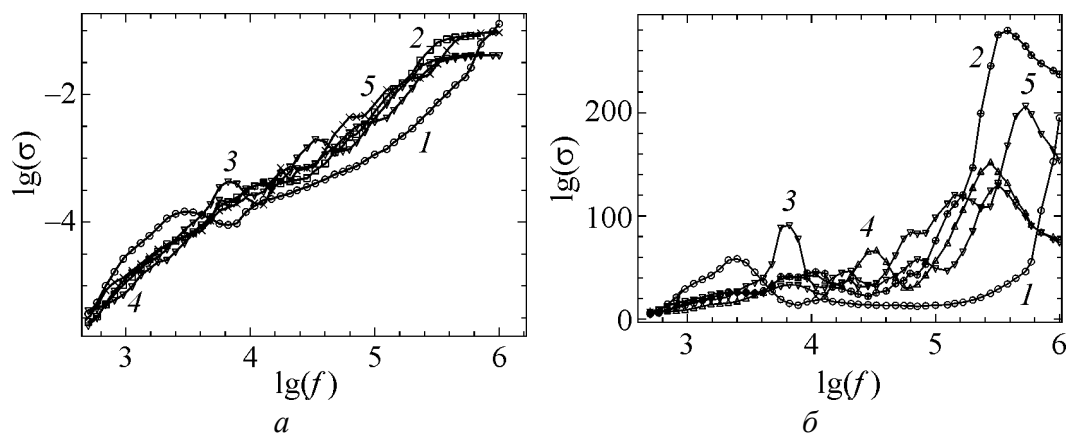


Рис. 7. Зависимость электропроводности (а) и тангенса потерь (б) сухого образца угля от частоты для избранных моментов времени: до (1), сразу после (2), через 60 мин (3), через 5 часов (4) и и через 24 часа (5) после МИВ

Тангенс потерь $\text{tg}\delta = \text{Im}Z/\text{Re}Z$ так же, как и для увлажненного образца, изменяется в большей степени в высокочастотной области, однако направление его изменения противоположно предыдущему случаю. После МИВ $\text{tg}\delta$ увеличивается. При этом резонансная частота f_m , соответствующая максимуму потерь (рис.7,б), смещается в направлении более низких частот, но со временем ее значение восстанавливается. Если в исходном образце $f_m > 1$ МГц, то после МИВ $f_m \approx 0.35$ МГц. Через 24 ч она увеличивается до 0.5 МГц, а через двое суток вновь превышает значение 1 МГц.

Построение эквивалентных электрических схем (ЭЭС) проводилось с помощью программного пакета *EIS Spectrum Analyser* [5] в предположении наличия хотя бы двух элементов параллельных соединений активного и пассивного сопротивлений. Предполагается, что эти элементы схемы отвечают за объемную электропроводность угольного вещества и электрофизические свойства поверхности объема пор. Последний элемент параллельного соединения описывает электрофизические свойства флюида на самых низких частотах, зарегистрированных в экспериментальном спектре. Один из вариантов ЭЭС получен методом Simulation [5] и показан на рис. 8 и в табл. 3. Значения элементов ЭЭС представлены в метрической системе единиц СИ. В данной схеме обозначение

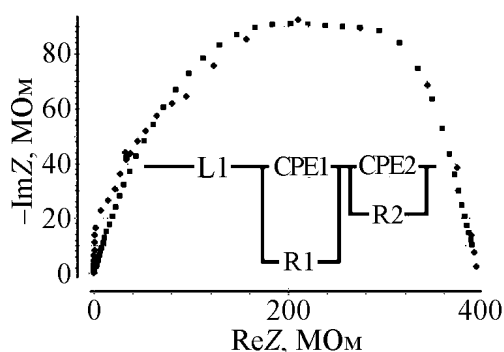


Рис. 8. Годограф и эквивалентная электрическая схема сухого образца после МИВ

CPE означает элемент с постоянной фазой. В этом случае импеданс CPE представляется в виде $Z_{CPE} = A^{-1}(i\omega)^{-n}$, где A – множитель пропорциональности, n имеет значение фазового смещения. Только при $n = 1$ CPE дает чисто емкостную зависимость от частоты, то есть $Z_C = (i\omega C)^{-1}$. Отклонение показателя степени от единицы может характеризовать различные физические явления, например, неоднородность поверхности, которая выражается через ее грубость, дефекты, дислокации и границы зерен [12].

Таблица 3

Параметры ЭЭС сухого образца угля после МИВ

Параметры	Значения параметров
R_1	4.04E06
R_2	3.57E08
P_1	0.37E-08
n_1	1.2
P_2	3.57E-11
n_2	0.58
L_1	3.0E-11

Используя метод последовательных приближений (Simulation), удалось построить модель эквивалентной электрической схемы для просушенного образца без элемента емкости L . Его влияние на вид импедансного спектра оказалось незначительным. Основные параметры этой схемы указаны на рис. 9 и в табл. 4. В схеме использован элемент W_s – импеданс Варбурга конечной длины диффузии [13, 14], n – показатель степени, определяющий вид частотной зависимости для элемента CPE с постоянной фазой.

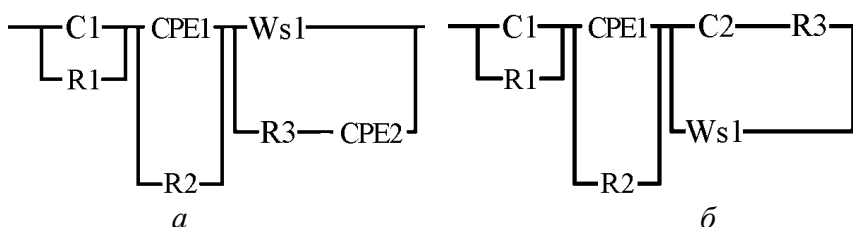


Рис. 9. ЭЭС сухого образца до (а) и после (б) МИВ

Аналогичной ЭЭС аппроксимированы экспериментальные точки для образца после воздействия, но с другими значениями параметров (рис. 9,б). При моделировании показатели степени элементов с постоянной фазой CPE были близки к единице для третьего параллельного соединения. Поэтому он был представлен обычной емкостью C .

Таблица 4

Параметры ЭЭС сухого образца угля до и после МИВ

Параметры	До МИВ	После МИВ
C_1	5E-4	7.6E-12
C_2	–	3.61E-12
R_1	4E09	2.2E08
R_2	1.31E08	8.0E07
R_3	2E09	7.75E10
P_1	4.45E-12	3.95E-11
P_2	1.07	1.23
n_1	3E-3	–
n_2	1.1	–
P_2	6.6E07	1E07
n_2	0.74	4.63
W_{sr1}		
W_{sc1}		

В результате моделирования показано, что зависимость $\text{Im}Z$ от частоты в двойных логарифмических координатах определяется уравнением $y = -0.968 \cdot \lg(f) + 10.2$ до МИВ, после МИВ $y = -0.982 \cdot \lg(f) + 10.3$ во всем интервале частот. Для $\text{Re}Z$ до МИВ имеем $y = -0.418 \cdot \lg(f) + 6.92$ в интервале частот $f > 5 \cdot 10^4$ Гц, и после МИВ $y = -0.503 \cdot \lg(f) + 6.61$ при $f > 10^4$. Заметно существенное изменение параметров уравнений регрессии частотной зависимости $\text{Re}Z$ и $\text{Im}Z$, которое является следствием изменения электрофизиче-

ских свойств матрицы угля в результате МИВ. Из экспериментальных данных получены соответствующие уравнения регрессии с коэффициентами, совпавшими с теоретическими. Это подтверждает адекватность аппроксимации с помощью ЭЭС экспериментальных данных моделями, представленными на рис. 9.

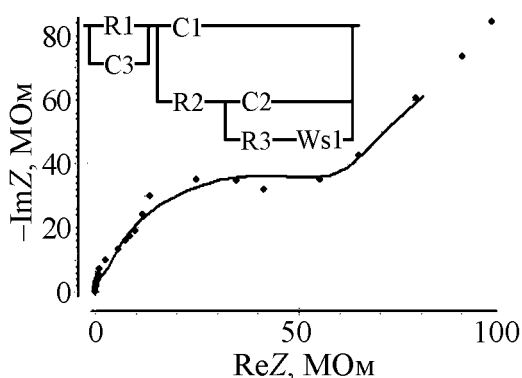


Рис. 10. Импеданс-спектр и эквивалентная электрическая схема увлажненного образца угля до МИВ

Для сравнения приводим на рис. 10 ЭЭС и значения параметров ее элементов (табл. 5) для образца угля, увлажненного в течение месяца в парах воды при температуре 35°C. Влажность образца составила 2.5%. Годограф построен для данных из интервала частот от 1 Гц до 1 МГц.

Таблица 5

Параметры ЭЭС увлажненного образца угля до МИВ

Параметры	Значения параметров
C_1	1.687E-11
C_2	1.531E-10
C_3	2.016E-11
R_1	5.754E07
R_2	4.604E06
R_3	4520
Wsr_1	1.612E09
Wsc_1	0.0771

В этом варианте элемент ЭЭС, включающий импеданс Варбурга W_{s1} , отвечает за электрофизические свойства воды, заполняющей поры угля, и соответствует наиболее низким частотам импедансного спектра. На основании этих данных можно сделать вывод о существенном влиянии влажности на вид импедансного спектра угля и о зависимости электрофизических параметров от частоты.

Выводы

Изученный методом импедансной спектроскопии уголь начальной стадии метаморфизма в зависимости от влажности имеет различные электрические реакции на магнитоимпульсное воздействие.

Установлено, что наибольшие изменения удельной электропроводности происходят на частотах $f > 10^4$ Гц. Эквивалентные электрические схемы позволяют количественно определить характерные времена релаксации магнитоиндуцированной поляризации молекул флюида и твердой матрицы углей. Наибольшие изменения происходят на межфазных границах образца. При длительных релаксационных процессах не происходит полного возвращения всех электрофизических характеристик к исходному состоянию. Изменение электрофизических параметров в процессе релаксации носит знакопеременный характер.

Авторы выражают искреннюю благодарность Т.Е. Константиновой и Б.И. Перекрестову за консультации и полезное обсуждение результатов экспериментов.

1. *Алексеев А.Д.* Патент на корисну модель № 48639. Украина, МПК E21F 7/00/ Спосіб дії на вугільний пласт [Текст] / А.Д. Алексеев, В.Г. Гриньов, А.К. Кірілов, О.М. Брюханов, А.Г. Мнухин. Заявл 19.10.2009. Опубл. 25.03.2010. – Бюл. № 6. – 3 с.
2. *Агамалов Ю.З.* Виртуальные измерители–анализаторы параметров импеданса [Текст] / Ю.З. Агамалов, Д.Ф. Бобылев, В.Ю. Кнеллер // Датчики и системы. – 2004. – № 5. – С.14–18.
3. *Константинова Т.Е.* Влияние импульсных магнитных полей на структуру пироэлектриков на основе LaBSiO₅ и LaBGeO₅ [Текст] / Т.Е. Константинова, А.С. Дорошкевич, И.А. Даниленко, Г.К. Волкова, В.А. Глазунова, Т.А. Рюмшина, М.С. Васильев // Актуальные проблемы прочности, Материалы XLIII международной конференции, 27 сентября – 1 октября 2004 г., Витебск, Беларусь. – Часть 1. – С. 191–196.
4. *Дрокин Н.А.* Импедансная спектроскопия высокомолекулярного полиэтилена с углеродными нанотрубками [Текст] / Н.А. Дрокин, А.В. Федотова, Г.А. Глушенко, Г.Н. Чурилов // Физика твердого тела. – 2010. – Том 52. – Вып. 3. – С. 607–611.
5. <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>; <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/> – Программа для анализа и моделирования спектров импеданса.
6. *Wong P.Z.* Fractal surfaces in porous media [Текст] / P.Z. Wong // Physics and Chemistry of Porous Media Vol. 2, eds. Bahavar J.P., Koplik J. & Winkler K.W., 1987. – Am. Inst. Phys., Vol. 154. – P. 304–318.
7. *Агроскин А.А.* Физические свойства углей [Текст] / А.А. Агроскин. – Москва: ГНТИ Литература по черной и цветной металлургии, 1961. – 308 с.
8. *Miyasita I.* Dielectric Properties of Japan Coals. I. Dielectric Properties of Japan Coals [Текст] / I. Miyasita, K. Higasi // J. Chem. Soc. Japan. – 1957. – Vol. 30. – P. 513–517.
9. *Podder J.* A study on thermal and electrical characterization of Barapukuria coal of northwestern Bangladesh [Текст] / J. Podder, S. Majumder // Thermochimica Acta. – 2001. – Vol. 372. – P. 113–118.

10. *Арш Э. И.* Исследование частотных характеристик электрических свойств углей и вмещающих пород Западного Донбасса [Текст] / Э.И. Арш, Л.А. Красин, Г.Р. Носов // ФТПРПИ. – 1969. – № 1. – С. 83–88.
11. *Chelidze T.L.* Electrical spectroscopy of porous rocks: a review – II. Experimental results and interpretation [Текст] / T. L. Chelidze, Y. Gueguen and C. Ruffet // *Geophys. J. Int.* – 1999. – Vol. 137. – P. 16–34.
12. *Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment, and Applications. Second ed.* [Текст] / Ed. E. Barsoukov, J.R. Macdonald / Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. Publ., 2005. – 595 p.
13. *Popova A.* AC and DC study of temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives [Текст] / A. Popova, E. Sokolova, S. Raicheva, M. Chiristov // *Corrosion science.* – 2003. – Vol. 45. – P. 33–58.
14. *Гнеденков С.В.* Импедансная спектроскопия в исследовании процессов переноса зарядов [Текст] / С.В. Гнеденков, С.Л. Синебрюхов // *Вестник ДВО РАН*, 2006. – № 5. – С. 6–16.

Т.А. Василенко, А.К. Кірілов, А.С. Дорошкевич, А.В. Шило

ЗМІНА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАМ'ЯНОГО ВУГІЛЛЯ ПРИБАГНІТОІМПУЛЬСНОМУ ВПЛИВІ

Досліджувалося вугілля ранньої стадії метаморфізму методом електрохімічного імпедансу. Представлені залежності від частоти відносної діелектричної проникності, питомої електропровідності і тангенса втрат для початкового, зволоженого і просушеного зразка. Показано, що дія на зразки імпульсним магнітним полем низької частоти призводить до зміни цих величин в окремих інтервалах частот.

Т.А. Vasilenko, A.K. Kirillov, A.S. Doroshkevych, A.V. Shylo

CHANGE OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF COAL BY EFFECT OF MAGNETIC PULSES

Coal of the early rank was investigated by the method of electrochemical impedance. The frequency dependences of relative electric permittivity, specific conductivity and loss tangent for the initial, water-wet and dried specimens are presented. It is pointed that influence by the impulsive magnetic field of LF causes the change of these parameters in certain frequency regions.