

УДК 537.868.3: 53.043

А.Д. Алексеев<sup>1</sup>, Т.Е. Константинова<sup>2</sup>, А.К. Кириллов<sup>1</sup>,  
А.С. Дорошкевич<sup>2</sup>, А.В. Сапрыкина<sup>2</sup>

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕЙ В ИНТЕРВАЛЕ ЧАСТОТ ДО 1 МГц

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины

<sup>2</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины

*Представлены результаты исследования зависимости от частоты диэлектрических характеристик четырех марок углей Донецкого угольного бассейна, полученных методом импедансной спектроскопии в области частот ниже 1 МГц. Делается вывод о перспективности использования этой методики для изучения структурных и электрофизических особенностей углей в зависимости от степени углефикации и при физических воздействиях.*

**Ключевые слова:** диэлектрические свойства, импедансная спектроскопия, неоднородная среда, поляризация, уголь

Уголь является сложной гетерогенной системой, включающей набор молекулярных соединений. Углерод, основная составляющая угля, входит в ароматическую часть, образуя циклически полимеризованные пачки углерода, называемые ламелями. Алифатическая составляющая угольного вещества включает длинные молекулярные цепи линейно полимеризованных углеродных атомов. Структура углей определяется способом их образования в результате углефикации органических остатков растительности под действием высоких температур и давлений в течение длительного по геологическим масштабам времени. В зависимости от стадии метаморфизма угли имеют развитую систему как открытых, так и закрытых пор. Структуру угольного вещества исследуют, применяя различные физические методы: рентгеноструктурный анализ, малоугловое рентгеновское и нейтронное рассеяние, инфракрасную спектроскопию и др. [1].

Все особенности структуры углей, включающих флюиды в виде воды и газов (метан, двуокись углерода и др.), определяют их электрофизические свойства. Традиционно ископаемые угли относят к полупроводникам, поскольку их электропроводность при постоянном токе  $\gamma_0$  и комнатной температуре находится в интервале  $10^{-8}$ – $10^{-6}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> [2, 3]. В достаточно большом интервале температур до 200°C  $\gamma_0$  увеличивается с повышением температуры, что характерно для полупроводников.

Метод импедансной спектроскопии получил широкое распространение при изучении жидкостей и гетерогенных сред [4, 5]. Исследование диэлектрической проницаемости, электропроводности и тангенса потерь дает представление о механизмах переноса в пористых средах. Изменение условий поляризации на поверхности пор при послойном заполнении горных пород водой влияет на их диэлектрические характеристики [6]. Измерение комплексной диэлектрической проницаемости является еще одним инструментом, позволяющим определить фрактальные свойства пористой среды [5, 7]. Имеются исследования электрических свойств углей на отдельных частотах [8, 9], однако данные для широкого интервала частот, включающих радиочастотный и СВЧ-диапазоны, до сих пор не получены. Такие исследования являются актуальными для СВЧ-диапазона в связи с разработкой геофизического радара, позволяющего изучать горные породы на больших глубинах и определять содержание воды в пористых средах [10, 11].

Спектральные характеристики электрических свойств углей на низких частотах, как и для других пористых сред, определяются поляризационными процессами на границах гранул неоднородной структуры и в пограничных областях пор, наполненных водой. При увеличении частоты электромагнитных колебаний заряды в поверхностном слое не успевают следовать за изменением электрической компоненты воздействующего на образец электромагнитного поля. Поэтому начинают в большей степени проявляться эффекты ориентационной поляризации [6].

Необходимо учитывать, что электрические свойства углей и других горных пород определяют одновременно эффекты поляризации и сквозной проводимости электрического тока. Граничная циклическая частота, полученная из равенства диэлектрических потерь и диссипации токов проводимости, равна  $\omega_c = \gamma/\epsilon_0\epsilon_r$ , где  $\gamma$  – электропроводность,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф·м<sup>-1</sup> – диэлектрическая постоянная вакуума,  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая постоянная среды. При  $\epsilon_r = 4$  и  $\gamma = 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>  $\omega_c = 280$  рад/с. Это означает, что уже на частотах  $f > \omega_c/2\pi = 45$  Гц рассеяние электромагнитных колебаний будет определяться только диэлектрическими потерями. Однако для антрацитов, имеющих наиболее высокую электропроводность среди углей  $\gamma = 10^{-1}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>  $\omega_c = 2.8 \cdot 10^9$  рад/с, т. е. смещается в область радиочастот. Поэтому представляет интерес исследование электрических характеристик углей различной степени углефикации в зависимости от частоты.

Измерения электрических свойств углей проводились с помощью измерителя-анализатора импеданса RLC-2004 в интервале частот 500 Гц – 1 МГц при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. На комплексной плоскости импеданс  $Z$  представляется в виде вектора  $Z = \text{Re}(Z) - j\text{Im}(Z)$ , где  $j$  – мнимая единица. При вычислении активной и диссипативной составляющих импеданса использовалась модель последовательного соединения, в которой комплексное удельное сопротивление  $\rho^* = Z(A/d)$ , где  $A$  – площадь поперечного сечения образца,  $d$  – толщина. Тогда активное сопротивление образца  $R = \text{Re}(Z)$ , а для емкости выполняется равенство  $\text{Im}(Z) =$

$= 1/\omega C$ . При анализе диэлектрических свойств углей использовались: а) диаграмма Коула–Коула в координатах  $\text{Im}(Z) - \text{Re}(Z)$  [12]; б) тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}(\delta)$ , в) закон Дебая–Гюккеля–Онзагера.

Рассмотрим возможности использования модели Коула–Коула диэлектрической среды, в которой комплексная диэлектрическая проницаемость определяется выражением  $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ , где  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – соответственно действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости. Зависимости  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  от частоты с учетом токовой проводимости  $\gamma$  при одном времени релаксации  $\tau$  в теории Дебая имеют вид

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \varepsilon'' = \frac{4\pi\gamma}{\omega} + \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_0)\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_c, \varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость соответственно статическая и на оптических частотах. При достаточно высоких частотах первым слагаемым в выражении для  $\varepsilon''$  можно пренебречь. Тангенс потерь, включающий все виды диссипации электромагнитных колебаний, определяется равенством

$$\text{tg}(\delta) = \varepsilon'' / \varepsilon'. \quad (2)$$

На диаграмме Коула–Коула, которая строится в координатах  $\varepsilon' - \varepsilon''$  (или  $\text{Re}(Z) - \text{Im}(Z)$ ) для случая, когда имеется одно время релаксации, связь между  $\varepsilon''$  и  $\varepsilon'$  описывается уравнением окружности  $(\varepsilon'_c - \varepsilon'_n)^2 + (\varepsilon'')^2 = R^2$ , где центр окружности находится на оси абсцисс в точке  $\varepsilon'_n = \varepsilon'_0 + (\varepsilon_c - \varepsilon_0)/2$ , радиус окружности  $R = (\varepsilon_c - \varepsilon_0)/2$  и максимальное значение  $\varepsilon''_{\text{max}} = (\varepsilon_c - \varepsilon_0)/2$ . Максимум достигается при критической частоте  $\omega_m = 1/\tau_c$  или критической длине волны  $\lambda = 2\pi c\tau_c$ , где  $c$  – скорость света [13, с. 271].

Если имеется несколько времен релаксации, вид зависимости Коула–Коула усложняется. Влияние распределения времен релаксации по частоте можно учесть введением функции Коула–Коула

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (3)$$

где  $0 < \alpha < 1$ . В этом представлении максимальное значение  $\varepsilon''_{\text{max}}$  на диаграмме Коула–Коула достигает величины  $\varepsilon''_{\text{max}} = (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \cdot \cos(\pi\alpha)/2 \{1 + \sin(\pi\alpha/2)\}$ , которая меньше, чем максимальная величина  $\varepsilon''$  при одном времени релаксации. В случае  $\alpha \neq 0$  окружность пересекает горизонтальную ось  $\varepsilon'$  в точках  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_c$  с радиусом  $R = (\varepsilon_c - \varepsilon_0)/2\cos(\pi\alpha/2)$ , и центром, лежащим ниже оси  $\varepsilon'$  на величину  $\varepsilon'_n = (\varepsilon_c - \varepsilon_0)/2 \cdot \text{tg}(\pi\alpha/2)$ . На диаграмме Коула–Коула при  $\alpha \neq 0$  радиус, проведенный из центра окружности в точки  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_c$ , составляет угол  $\pi\alpha/2$  [14, 15].

Тангенс диэлектрических потерь имеет частотную зависимость согласно выражению (2). Величина  $\text{tg}(\delta)$  в максимуме достигает значения

$$\operatorname{tg}(\delta)_{\max} = \sqrt{\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \cdot \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{2\varepsilon_c}} \quad (4)$$

при значении частоты  $\omega_0$ , которая определяется из равенства  $\omega_0\tau = \sqrt{\varepsilon_c / \varepsilon_0}$  дифференцированием (2).

Представление о механизме электропроводности дает также закон Дебая–Гюккеля–Онзагера, который определяет вид зависимости импеданса от частоты  $Z \propto \omega^{-p}$  и получен для ионной проводимости электролитов.

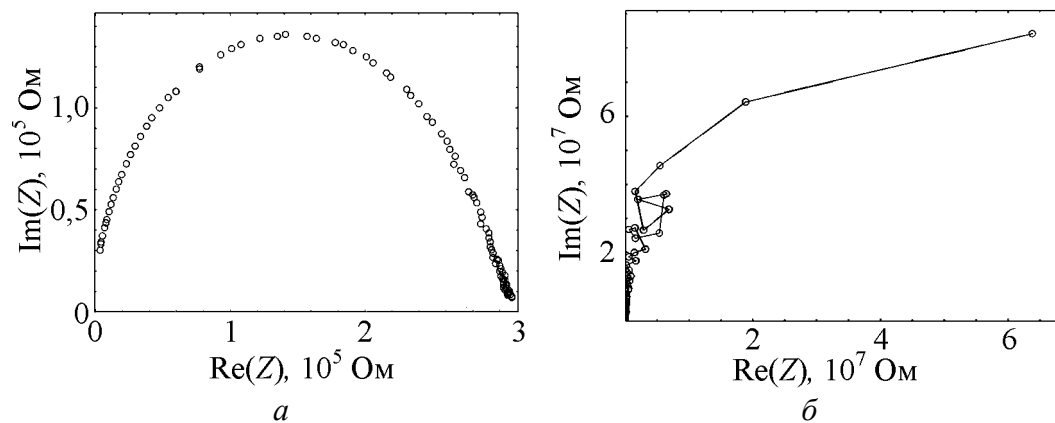
В настоящем исследовании проводились измерения образцов различных марок углей: Д (шахта «Трудовская»), КЖ (им. А. А. Скочинского), Ж («Горецкая») и антрацит (№ 2-2-бис ш/у «Шахтерскантрацит»). В ряду метаморфизма эти угли занимают последовательное положение. Уголь Д находится в самом начале ряда, характеризуется большими открытыми порами. Структура его наименее упорядочена среди каменных углей. По своим диэлектрическим характеристикам образцы этих углей заметно отличаются. В антраците, имеющем наиболее упорядоченную углеродную сетку, наблюдается преобладание токовой проводимости по сравнению с углями других стадий метаморфизма. Диаграмма Коула–Коула имеет наиболее простой вид, близкий к классическому, что соответствует однокомпонентной релаксации теории Дебая (рис. 1). Максимум графика соответствует частоте  $f_c = \omega_c/2\pi = 9.5 \cdot 10^5$  Гц. Наличие этой критической частоты выражено также на графиках для  $\operatorname{Re}(Z)$  и  $\operatorname{Im}(Z)$ . В области  $f_c$  изменяется вид зависимости электропроводности от частоты (рис. 2,а). При  $f < f_c$   $\operatorname{Re}(Z)$  остается практически постоянной величиной, что выражается зависимостью

$$\lg(\operatorname{Re} Z) = -0.028 \lg(f) + 5.57. \quad (5)$$

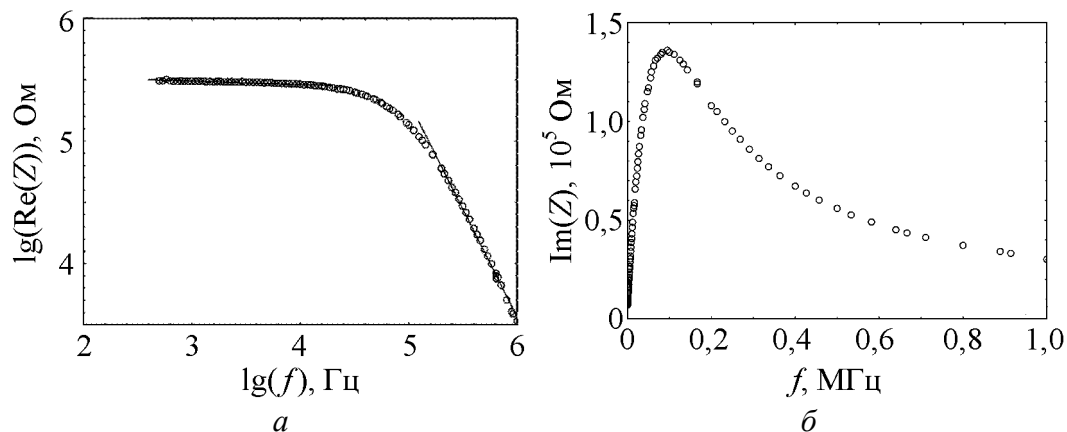
В области  $f > f_c$  вплоть до максимальной измеряемой частоты 1 МГц электрическое сопротивление антрацита уменьшается согласно зависимости

$$\lg(\operatorname{Re} Z) = -1.76 \lg(f) + 14.1 \quad (6)$$

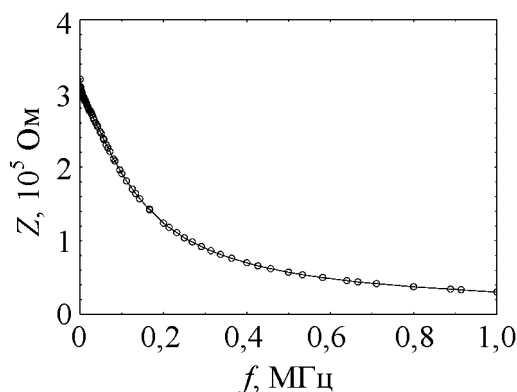
с коэффициентом вариации  $V = r^2 = 0.996$ .



**Рис. 1.** Диаграмма Коула–Коула для антрацита (а) и угля КЖ (б). Максимальному значению  $\text{Im}(Z)$  на рис. 1,а соответствует частота  $f_c = 9.52 \cdot 10^5$  Гц. Самая правая точка на рис. 1,б соответствует  $f = 500$  Гц



**Рис. 2.** Зависимость  $\text{Re}(Z)$  (а) и  $\text{Im}(Z)$  (б) от частоты для антрацита



**Рис. 3.** Зависимость импеданса от частоты для антрацита

Максимальные диэлектрические потери соответствуют частоте  $f_c$  (рис. 2,б). Для  $\text{Im}(Z)$  получены следующие показатели степенной зависимости  $\text{Im}(Z) \propto f^p$ : в низкочастотной области  $p = +0.7$ , в области  $f > f_c$   $p = -0.7$ .

Модуль импеданса уменьшается с частотой так же, как в законе Дебая–Гюккеля–Онзагера  $Z \propto f^{-p}$ . Для антрацита показатель  $p = 0.864$  степенной зависимости (рис. 3) получен при двойном логарифмировании как тангенс угла наклона графика:  $\lg(Z) =$

$= -0.864 \cdot \lg(f) + 9.68$ . Вид зависимости подтверждает правомерность использования эквивалентной схемы с последовательным соединением активного и реактивного элементов электрической цепи при анализе измерений ископаемых углей с помощью импедансной спектроскопии.

Рассмотрим теперь данные для угля средней стадии метаморфизма КЖ. Из диаграммы Коула–Коула (см. рис. 1,б) следует, что максимальное значение  $\text{Im}(Z)$  расположено в области низких частот  $f < 500$  Гц. Значения реальной и мнимой составляющих импеданса на низких частотах близки. Однако уже при  $10^3$  Гц величина  $\text{Im}(Z)$  превосходит на порядок  $\text{Re}(Z)$  и на два порядка – в интервале  $f > 4 \cdot 10^4$  Гц. При низких частотах ( $f < 10^3$  Гц) импеданс имеет большую дисперсию в зависимости от частоты (рис. 4). Однако в высокочастотной области его можно аппроксимировать степенной зависимостью с показателем  $p = 0.993$ . Если рассмотреть отдельно компоненты импеданса, то

становится понятным, что на высоких частотах  $f > 10^3$  Гц все потери определяются диэлектрической диссипацией, так как для  $\text{Im}(Z)$  в логарифмических координатах выполняется зависимость (рис. 5,б)  $\lg(\text{Im}Z) = -0.992 \cdot \lg(f) + 10.5$  с тем же показателем  $p = 0.992$ , что и для модуля импеданса.

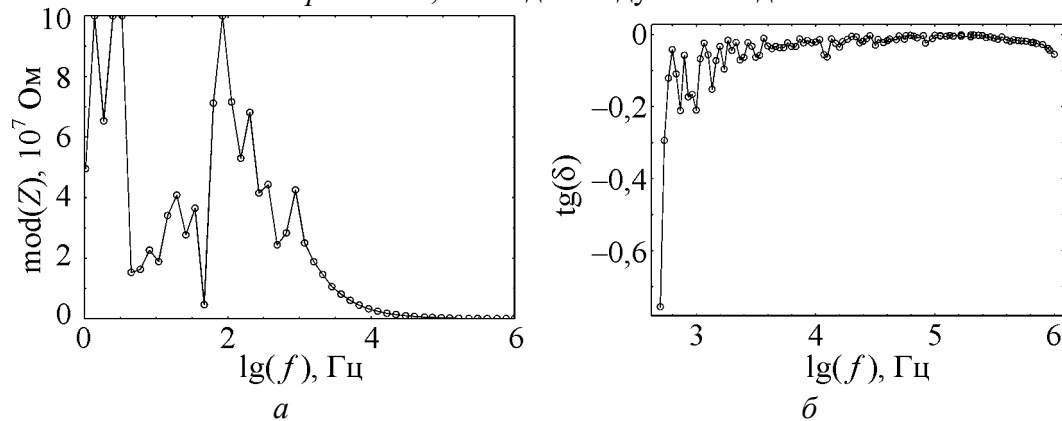


Рис. 4. Зависимость импеданса (а) и тангенса диэлектрических потерь (б) от частоты для угля КЖ

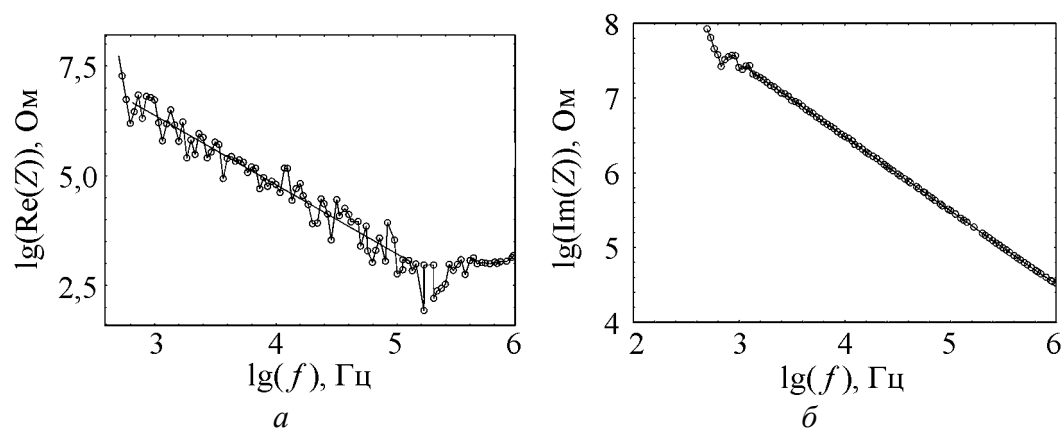


Рис. 5. Зависимость  $\text{Re}(Z)$  (а) и  $\text{Im}(Z)$  (б) от частоты в двойных логарифмических координатах для угля КЖ

Близкими к углям КЖ диэлектрическими характеристиками обладает уголь Ж ш. «Торецкая», для которого также были проведены измерения с помощью RLC-спектрометра. Сравнение данных для углей КЖ и Ж показывает, что в интервале  $10^3$ – $10^5$  Гц имеется область, в которой  $\text{Re}(Z)$  зависит от частоты по степенному закону с показателями  $p$ , заметно отличающимися по величине ( $p = -1.58$  для КЖ и  $p = -1.44$  для Ж). Для  $\text{Im}(Z)$  показатели степени совпадают для этих марок углей. Поскольку  $\text{Im}(Z) \gg \text{Re}(Z)$ , модуль импеданса имеет такие же показатели в частотной зависимости. В отличие от угля КЖ максимум  $\text{tg}\delta$  приходится на область частот  $f \approx 2 \cdot 10^5$  Гц. Зависимость от частоты для  $\text{tg}\delta$  на фазах подъема и спада определяется показателем  $p$ , близким к 1.5. Отличительной особенностью марки Ж является наличие области возрастания потерь на низких частотах при  $f < 2 \cdot 10^3$  Гц (рис. 6).

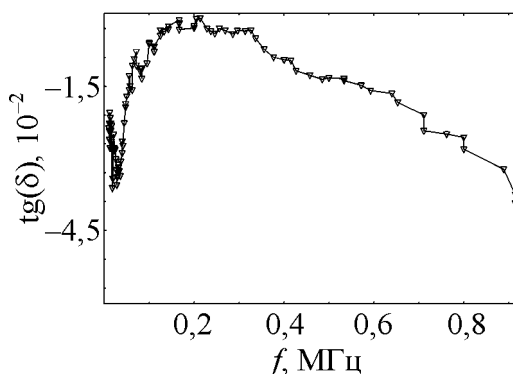


Рис. 6. Зависимость тангенса потерь от частоты для угля Ж

Диэлектрические свойства угля Д, расположенного на начальном этапе метаморфизма, в значительной мере совпадают с представленными выше характеристиками угля КЖ. Однако наличие более развитой структуры пор и менее упорядоченная организация твердой матрицы образцов угля Д сдвигают область большой дисперсии характеристик импеданса к более высоким частотам (рис. 7,а). Так, на диаграмме Коула–Коула

трудно выделить область достаточно упорядоченного изменения  $Z$ . Кроме того, имеется две области степенной зависимости  $\text{Re}(Z)$  от частоты, которые в двойных логарифмических координатах выглядят как отрезки линейных зависимостей с соответствующими коэффициентами наклона к оси абсцисс (рис. 7,а). При низких частотах  $f < 32$  кГц показатель степени  $p = -1.09$ . В интервале  $(32 < f < 178)$  кГц эта зависимость удовлетворяет линейному уравнению с наклоном  $p = -2.55$ . Для  $\text{Im}(Z)$  выполняется зависимость вида (5) с коэффициентом при логарифме  $-0.99$  в интервале частот  $f > 10^3$  Гц. Для тангенса диэлектрических потерь наблюдается достаточно широкий максимум в зависимости от частоты в интервале  $(1-2) \cdot 10^5$  Гц. В двойных логарифмических координатах в интервале  $f > 10^3$  Гц до максимума и после максимума получены коэффициенты в степенной зависимости  $\text{tg} \delta \sim f^p$ . На первом отрезке  $p = 1.06$ , на втором  $-p = -1.6$ , что отличается от показателей в теории Дебая.

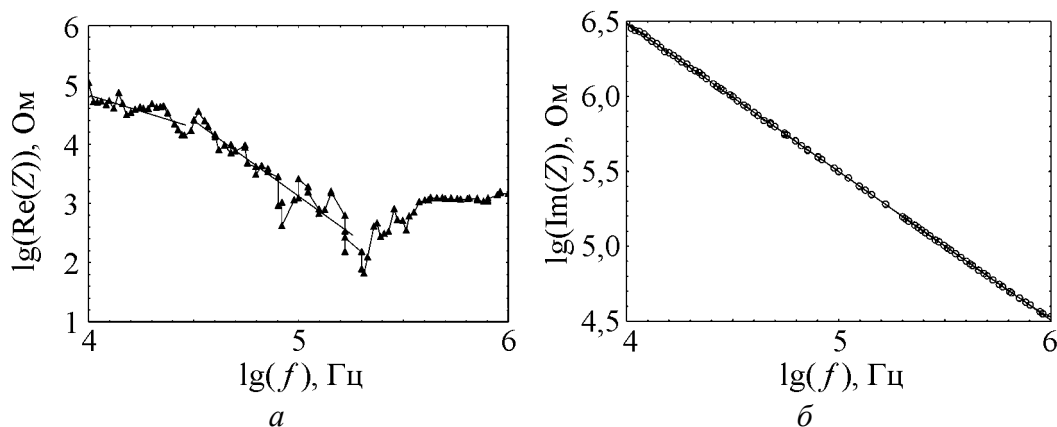
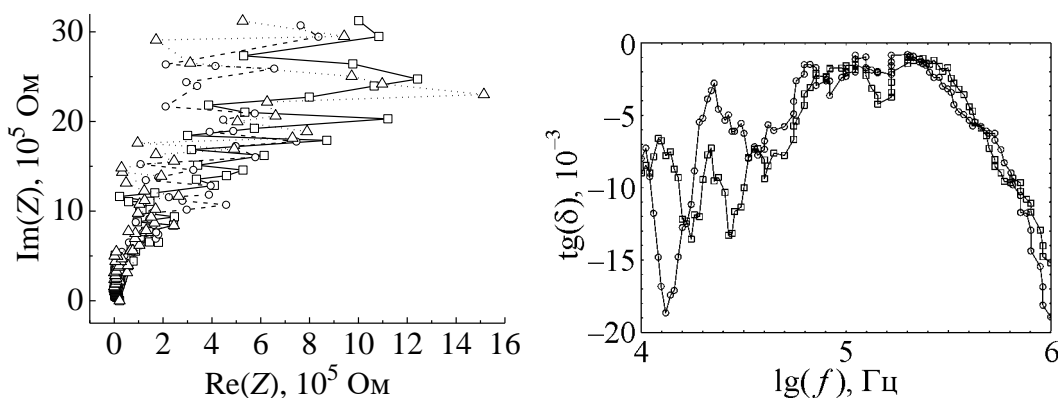


Рис. 7. Зависимость  $\text{Re}(Z)$  (а) и  $\text{Im}(Z)$  (б) от частоты в двойных логарифмических координатах для угля Д

Для угля Д была расширена программа измерений. Образец после измерения RLC-спектра подвергался термообработке при температуре  $100^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. Далее измерения повторялись непосредственно после термообработки и через 24 ч. Изменение диэлектрических характеристик хорошо заметно на диа-

грамме Коула–Коула (рис. 8), где точки в верхней части графика соответствуют области низких частот от нижней границы  $f = 10^4$  Гц. Эффект теплового воздействия более заметно проявил себя в низкочастотной области  $f < 10^5$  Гц и практически не оказал воздействия на диэлектрические свойства в интервале частот больше максимума в частотной зависимости  $\text{tg}\delta$  (рис. 9). Тем не менее при вычислении методом наименьших квадратов тангенса угла наклона зависимости  $\text{tg}\delta$  от  $\lg(f)$  получены отличия, превышающие статистическую погрешность. Непосредственно после термовоздействия коэффициент  $a$  в линейном уравнении  $\lg(\text{tg}\delta) = a\lg(f) + b$  равен  $-0.0193$ , а для образца, измеренного через 24 ч, он изменился так, что составил величину  $-0.0231$ .



**Рис. 8.** Диаграмма Коула–Коула для угля Д в интервале частот ( $500\text{--}10^6$ ) Гц до ( $-\square-$ ), после ( $-\circ-$ ) и через 24 ч после ( $-\Delta-$ ) термовоздействия при температуре  $100^\circ\text{C}$  в течение 30 мин

**Рис. 9.** Изменение тангенса диэлектрических потерь угля Д при термической обработке образца при  $100^\circ\text{C}$  в течение 30 мин:  $-\circ-$  – измерения непосредственно после термообработки,  $-\square-$  – через 24 ч после термовоздействия

Мы считаем, что все изменения диэлектрических характеристик, полученных в этих измерениях, можно объяснить наличием воды в порах угля. При просушивании изменяются условия среды, приводящие к изменению электропроводности и условий поляризации на межфазных границах пор [7, 11, 12]. Накопление влаги в объеме пор в течение суток привело к изменению диэлектрических характеристик угля и возвращению их к исходным значениям.

### Выводы

Импедансная спектроскопия является перспективным методом для анализа диэлектрических свойств углей в зависимости от стадии метаморфизма.

На достаточно большом интервале частот  $f = (10^3\text{--}10^6)$  Гц для углей наблюдается степенная зависимость импеданса и, следовательно, диэлектрической проницаемости и электропроводности от частоты. Показатель степени характеризует структурные особенности углей в зависимости от стадии метаморфизма.



Тепловое воздействие на образцы углей приводит к изменению их диэлектрических свойств, особенно в области низких частот. Этот эффект связан с изменением влажности образцов и условий поляризации на межфазных границах поверхности пор.

1. *Алексеев А.Д.* Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – К.: Наук. думка, 2010. – 423 с.
2. *Агроскин А.А.* Физические свойства углей / А.А. Агроскин. – М.: ГНТИЛ по черн. и цветн. металлургии, 1961. – 308 с.
3. *Podder J.* A study on thermal and electrical characterization of Barapukuria coal of northwestern Bangladesh / J. Podder, S. Majumder // *Thermochimica Acta.* – 2001. – V. 372. – P. 113-118.
4. *Amaral F.* Dielectric relaxation and morphologic properties of  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  doped with  $\text{GeO}_2$  / F. Amaral, L.C. Costa, M.A. Valente, F. Henry // *J. Non-Crystalline Solids.* – 2009. – V. 355. – P. 2160–2164.
5. *Chelidze T.L.* Electrical spectroscopy of porous rocks: a review – II. Experimental result and interpretation / T.L. Chelidze, Y. Gueguen, C. Ruffet // *Geophys. J. Int.* – 1999. – V. 137. – P. 16–34.
6. *Gomaa M.M.* Relation between electric properties and water saturation for hematic sandstone with frequency / M.M. Gomaa // *Annals Geophys.* – 2008. – N 5/6. – P. 801–811.
7. *Ruffet C.* Complex conductivity measurements and fractal nature of porosity / C. Ruffet, Y. Guegue, M. Darot // *Geophysics.* – 1991. – V. 56. – P. 758–768.
8. *Арш Э.И.* Исследование частотных характеристик электрических свойств углей и вмещающих пород Западного Донбасса / Э.И. Арш, Л.А. Красин, Г.Р. Носов // *ФТПРПИ.* – 1969. – № 1. – С. 83–88.
9. *Miyasita I.* Dielectric investigation on coals. I. Dielectric Properties of Japan Coals / I. Miyasita, K. Higasi // *Chem. Soc. Japan.* – 1957. – V. 30. – P. 513–517.
10. *Loeffler O.* Ground Penetrating Radar Measurements in a Controlled Vadose Zone: Influence of the Water Content / O. Loeffler, M. Bano // *Vadose Zone J.* – 2004. – Nov. – P. 1082–1092.
11. *Knight R.* Rock/water interaction in dielectric properties: experiments with hydrophobic sandstones / R. Knight, A. Abad // *Geophysics.* – 1995. – V.60, N 2. – P. 431–436.
12. *Cole K.S.* Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics / K.S. Cole, R.H. Cole // *J. Chem. Phys.* – 1941. – V. 9. – P. 341–351.
13. *Хиппель А.Р.* Диэлектрики и волны / А.Р. Хиппель. – М: Изд-во Иностранной литературы, 1960. – 438 с.
14. *Богородицкий Н.П.* Теория диэлектриков / Н.П. Богородицкий, Ю.М. Волокобинский, А.А. Воробьев, Б.М. Тареев. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 344с.
15. *Chelidze T.L.* Electrical spectroscopy of porous rocks: a review – I. Theoretical models / T.L. Chelidze, Y. Gueguen // *Geophys. J. Int.* – 1999. – V. 137. – P. 1–15.

А.Д. Алексеєв, Т.Е. Константінова, А.К. Кірілов, А. С. Дорошкевіч,  
А.В. Саприкіна

## ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛІВ В ІНТЕРВАЛІ ЧАСТОТ ДО 1 МГц

*Представлено результати дослідження залежності від частоти діелектричних характеристик чотирьох марок вугілля Донецького вугільного басейну, отриманих методом імпедансної спектроскопії в області частот до 1 МГц. Робиться висновок про перспективність використання цієї методики для вивчення структурних та електрофізичних особливостей вугілля в залежності від ступеня углефікації і під час фізичних впливів.*

**Ключові слова:** діелектричні властивості, імпедансна спектроскопія, неоднорідне середовище, поляризація, вугілля

A.D. Alexeev, T.E. Konstantinova, A.K. Kirillov, A.S. Doroshkevich,  
A.V. Saprykina

## DIELECTRIC PROPERTIES OF COAL IN THE FREQUENCY RANGE UP TO 1 MHz

*Results of studying the frequency dependence of dielectric characteristics up to 1 MHz using impedance spectroscopy are presented for four coals of Donets Basin. It is concluded that impedance spectroscopy is a promising method of studying effects of coalification and physical factors on structural and electrical characteristics of coals.*

**Keywords:** dielectric properties, impedance spectroscopy, inhomogeneous medium, polarization, coal

*Стаття поступила в редакцію 14 мая 2010 года*