

Раздел 1. Физика угля и горных пород

УДК 537.868: 53.043

Т.А. Василенко¹, А.К. Кириллов¹, А.С. Дорошкевич², А.В. Сапрыкина²

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ОТКЛИКА АНТРАЦИТА НА ТЕПЛОВОЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

¹Институт физики горных процессов НАН Украины

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

Рассмотрено изменение электрофизических свойств антрацита в интервале частот 500 Гц – 1 МГц в зависимости от температуры и воздействия импульсов магнитного поля частотой 1 Гц. Показано, что тип электропроводности в антраците (полупроводниковый или металлический) зависит от интервала температур и частоты. Релаксация компонент комплексного импеданса после импульсного воздействия связана с изменением электрической емкости поляризованных границ поверхности пор и влажности образца.

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

Введение

Ископаемые угли Донецкого угольного бассейна отличаются многообразием физико-химических свойств. В зависимости от стадии метаморфизма угли имеют развитую систему как открытых, так и закрытых пор. Необходимость изучения структурных особенностей углей определяется зависимостью интенсивности газовыделения и, следовательно, безопасности труда при разработке угольных пластов от сорбционных свойств углей, что, в свою очередь, определяется развитой системой пор и сорбционными свойствами их поверхности. Для изучения структурных особенностей угольного вещества применяют различные физические методы: рентгеноструктурный анализ, малоугловое рентгеновское и нейтронное рассеяние, инфракрасную и ЯМР-спектроскопию и др. [1]. При изучении структуры таких сложных систем, как ископаемый уголь, диэлектрическая спектроскопия имеет свои преимущества, поскольку современные диэлектрические спектрометры позволяют проводить непрерывные измерения в широком температурно-частотном диапазоне. При этом появляется возможность получить уникальную информацию о релаксационной динамике исследуемого образца.

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 σ_0 и комнатной температуре находится в интервале 10^{-8} – 10^{-6} Ом⁻¹·м⁻¹ [2, 3]. В достаточно большом интервале температур до 200°C с ростом температуры σ_0 увеличивается, что характерно для полупроводников.

Метод импедансной спектроскопии получил распространение при изучении жидкостей и гетерогенных сред и в отличие от метода ЯМР не является резонансным. Исследование диэлектрической проницаемости, электропроводности и тангенса потерь в широком диапазоне частот дает представление о механизмах переноса в пористых средах [4, 5].

Угольные пласты Донецкого бассейна содержат угли всего ряда метаморфизма, поэтому представляет интерес рассмотрение электрофизических характеристик углей различных стадий углефикации. Однако в ряду метаморфизма антрацит занимает особое положение, поскольку в нем содержание углерода достигает 94–97%, а кислорода содержится только 1–1,5%. Возрастает также степень ароматизации углерода до 0,88, что приближает его к чистому углероду. Поэтому для изучения электрофизических свойств антрацит наиболее удобен. Действительно, 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 $\omega_c = \sigma/\epsilon_0\epsilon_r$, где σ – электропроводность, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м⁻¹ – диэлектрическая постоянная вакуума, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды. При $\epsilon_r = 4$ и $\sigma = 10^{-8}$ ом⁻¹·м⁻¹ $\omega_c = 280$ рад/с, что характерно для углей более ранних стадий метаморфизма. Поэтому 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 $\sigma_0 = 10^{-1}$ Ом⁻¹·м⁻¹, $\omega_c = 2,8 \cdot 10^9$ рад/с, т. е. граничная частота смещается в область радиочастот.

Методика эксперимента

Измерения проводили с помощью измерителя-анализатора комплексного импеданса RLC-2004 в интервале частот 500 Гц–1 МГц при амплитуде напряжения сигнала между электродами 50 мВ. Регистрировали частотные зависимости мнимой $\text{Im}Z(\omega)$ и реальной $\text{Re}Z(\omega)$ составляющих комплексного сопротивления $Z(\omega)$ при заданной температуре от 30 до 100°C с шагом 10°C. На комплексной плоскости (диаграмма Найквиста) импеданс Z представляется в виде вектора: $\mathbf{Z} = \text{Re}(Z) - j \text{Im}(Z)$ (где j – мнимая единица), называемого годографом. При вычислении активной и диссипативной составляющих импеданса использовалась модель последовательного соедине-

ния, 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 $\text{Im}(Z) = 1/\omega C$.

Изучение отклика угольных образцов на электромагнитное воздействие проводили на образцах антрацита (шахта им. К.И. Киселева, ГХК «Горезантрацит», г. Торез Донецкой области) при комнатной температуре. Образцы размером 7×8 мм и толщиной 2 мм разделяли на две серии, одну из которых обрабатывали магнитным полем, а вторую использовали в качестве контрольной. Осуществлялось воздействие однополярными экспоненциально-нарастающими импульсами слабого (10^5 – 10^6 А/м) магнитного поля (ИМП) с частотой 1 Гц в течение одного часа. При этом с целью выяснения механизма ИМП-воздействия на исследуемые материалы использовались два вида индукторов – с постоянным (образцы №2, 3) и изменяющимся вдоль оси (образец №1) диаметром обмотки. Детальное описание установки представлено в работе [6]. Импульс имеет несимметричный вид с длиной переднего фронта 30 мкс и более протяженной затухающей частью.

После экспозиции ИМП-образец помещали между электродами импеданс-спектрометра. Импедансные спектры регистрировали непосредственно после обработки, в течение первых 6 ч с интервалом 15–60 мин и последующих 48 ч с интервалом 8 ч. Температурные зависимости импеданса исследовали в области температур от 30 до 180°C , поддерживаемой с точностью $0,5^\circ\text{C}$. Анализировали зависимости диаграмм Найквиста, тангенса потерь $\text{tg } \delta$ и импеданса от частоты для различных температур.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Температурные зависимости. Вид диаграмм Найквиста отличается от классической полуокружности для теории Дебая и при $t > 100^\circ\text{C}$ во всем интервале измеряемых частот практически не меняется, за исключением низкочастотной области (рис. 1).

В интервале до 100°C имеется возможность определить по экспериментальным точкам частоту f_m , соответствующую максимуму $\text{Im}Z$. Критическая частота $\omega_m = 2\pi f_m$ связана с электропроводностью σ линейной зависимостью [7, 8]:

$$\sigma = \left(Nq^2 \langle l^2 \rangle / 4\pi k_B T \right) \omega_m, \quad (1)$$

где N – концентрация; q – заряд мобильных частиц, в качестве которых в гетерогенных пористых средах могут выступать электроны, ионы или дефекты; $\langle l^2 \rangle$ – среднеквадратическое смещение; k_B – постоянная

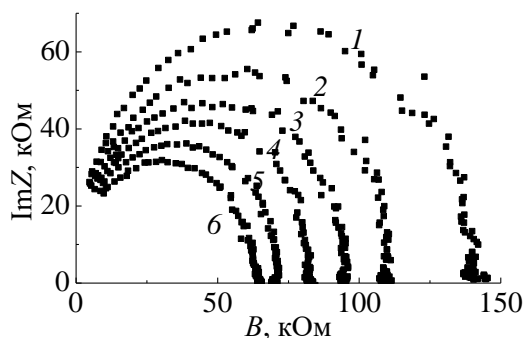


Рис. 1. Диаграмма Найквиста для антрацита при различных температурах, $^\circ\text{C}$: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 – 70; 5 – 80; 6 – 90

Больцмана; T – абсолютная температура. При частотах $\omega > \omega_m$ электрическая компонента колебаний электромагнитного поля изменяется настолько быстро, что носители заряда не успевают изменить свое положение. При $\omega < \omega_m$ возможен перенос зарядов на большие расстояния. С учетом выражения (1) энергия активации E_a , полученная из аррениусовой зависимости для f_m , должна совпадать с E_a для σ . Частота ω_m , входящая в функцию Коула–Коула для комплексной диэлектрической проницаемости, совпадает с частотой максимума для тангенса диэлектрических потерь.

Частоты f_m , определенные из диаграмм Найквиста при различных температурах, представлены в табл. 1. Характерное время релаксации вычисляется из равенства $\tau = 1/\omega_c = 1/2\pi f_c$. Для значения $f_m = 3 \cdot 10^5$ Гц имеем $\tau = 5,3 \cdot 10^{-7}$ с, что близко по величине временам корреляции, полученным методом ЯМР спин-эхо для воды в ископаемых углях [9].

Таблица 1

Зависимость частоты f_m от температуры для антрацита

Температура, °С	30	40	50	60	70	80	90	100
$f_m, 10^5$ Гц	1,42	2,0	2,6	3,1	3,5	3,6	4,3	8,0

Полученная в аррениусовых координатах энергия активации $E_a = 19,4$ кДж/моль в интервале (30–70)°С близка к E_a , измеренной в экспериментах по десорбции метана и воды в каменных углях [9, 10] (рис. 2). При более высоких температурах $E_a \approx 70$ кДж/моль (0,7 эВ). Первое значение сравнимо с энергией водородных связей в молекуле воды [11]. Поэтому диффузионные и электрические свойства в интервале температур $t < 70$ °С определяются подвижностью протонов воды, в то время как при более высоких температурах они, по-видимому, зависят от подвижности электронов при их обмене в ОН-связях бахромы углеродной сетки антрацита, что характерно для графита [12]. Это определяется связями атома углерода: в кристаллической решетке графита каждый атом углерода связан только с тремя соседними атомами. Четвертый электрон атома углерода не локализован, что и обуславливает хорошую электрическую проводимость графита.

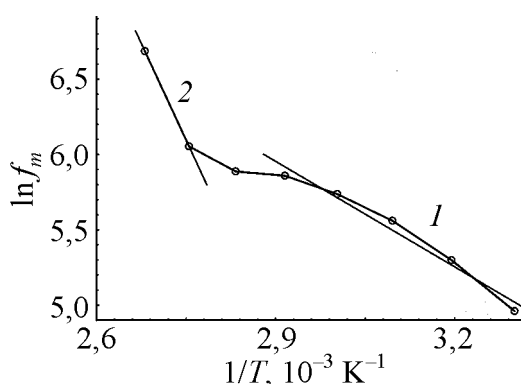


Рис. 2. Температурная зависимость частоты $f_m = \omega_m/2\pi$ (кГц) в интервале температур (30–100)°С в аррениусовых координатах; E_a , кДж/моль: 1 – 19,4, 2 – 71,0

Исходя из линейного уравнения, аппроксимирующего зависимость $\ln(f_m)$ от обратной величины температуры $1/T$ (рис. 2), получим значение предэкспоненциального множителя Ω_0 в выражении аррениусовой зави-

симости для ω_m :

$$\omega_m(T) = \Omega_0 \exp(-E_a / k_B T), \quad (2)$$

Так как в уравнении $\ln(f_m) = a/T + b$ коэффициент $b = 12,7$, то $\Omega_0 = 2\pi \exp(b) = 2,06 \cdot 10^9$ рад/с. В области более высоких температур для энергии активации $E_a \approx 70$ кДж/моль имеем $\Omega_0 = 4,5 \cdot 10^{16}$ рад/с. Последнее значение указывает на прыжковый механизм электропроводности в результате переноса электронов.

Механизм электропроводности для антрацита на различных частотах может изменяться при увеличении температуры. Действительно, из рис. 3 следует, что на частотах $f < 100$ кГц сохраняется полупроводниковый тип проводимости с энергией активации $E_a < 18$ кДж/моль. Для частоты $f = 800$ кГц этот тип электропроводности сохраняется только при температурах $t > 100^\circ\text{C}$.

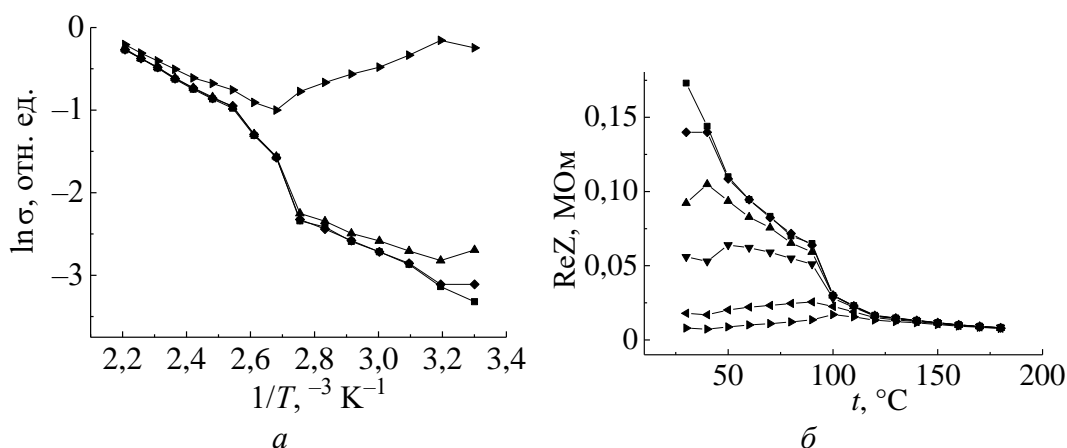


Рис. 3. Температурная зависимость электропроводности в аррениусовых координатах (а) и $\text{Re}(Z)$ (б) антрацита на избранных частотах: ■ – 0,5 кГц, ♦ – 10, ▲ – 100, ▼ – 20, ◀ – 500, ▶ – 800

При более низких температурах наблюдается металлический тип электропроводности, когда σ уменьшается при возрастании температуры и выполняется аррениусова зависимость вида

$$\sigma = \sigma_0 \exp(E_a / k_B T), \quad (3)$$

где $E_a = 0,12$ эВ (11,3 кДж/моль). Подобный результат для антрацита означает, что на низких частотах так же, как для постоянного электрического тока, велика роль аморфного углерода, который определяет полупроводниковый тип электропроводности. При больших частотах и температурах ниже 100°C реализуется полуметаллический тип проводимости, который так же, как для других углеродных материалов [12], определяется упорядоченными структурами (кристаллитами). Для последних характерно уменьшение электропроводности при росте температуры. Термообработка графита при высоких

температурах приводит к уменьшению количества аморфного углерода, что усиливает его полуметаллические свойства. Известно, что при этом минимум удельного электросопротивления графита сдвигается в область более низких температур [13]. Поэтому чем выше степень метаморфизма углей, тем в большей степени проявляются свойства полуметалла, и тем существеннее роль ароматического углерода в электропроводности. Заметный вклад в электропроводность могут вносить флюиды (вода и метан), наполняющие поры угольного вещества.

ИМП-воздействие. Во всех случаях не удалось обнаружить релаксацию всех электрофизических характеристик к начальным значениям, которые они имели до импульсного воздействия, однако прослеживалась тенденция их изменения в одном направлении. Примеры таких зависимостей показаны на рис. 4 и рис. 5. Вид кривых практически не меняется, эквивалентной электрической схемой может служить последовательное соединение активного и реактивного сопротивлений. В основном наблюдаются изменения для реальной части импеданса ReZ .

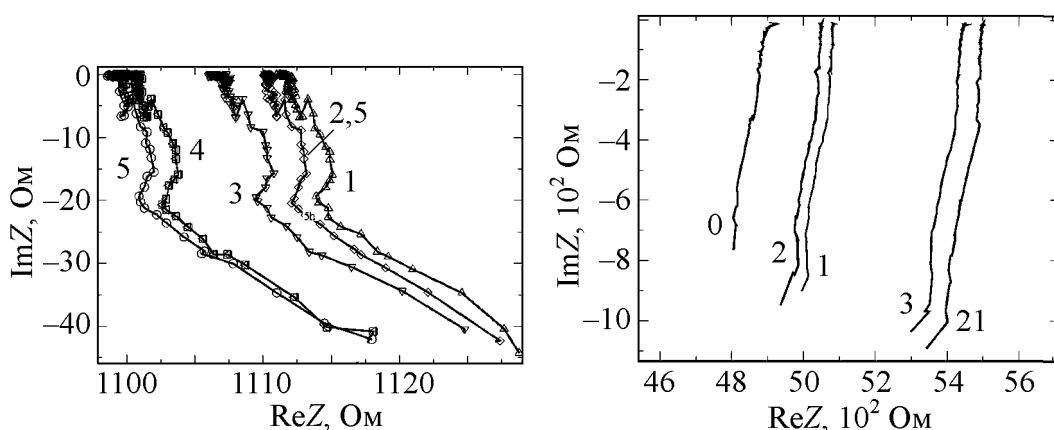


Рис. 4. Изменение диаграммы Найквиста в течение пяти часов после ИМП-воздействия в градиентном магнитном поле для образца №1. Числа соответствуют времени после ИМП-воздействия (ч)

Рис. 5. Изменение со временем диаграммы Найквиста после ИМП-воздействия для образца №2. Точки, соответствующие высоким частотам, расположены в нижней части кривых. Числа соответствуют времени после ИМП-воздействия (ч)

В экспериментах для образцов №1 и 2 после воздействия наблюдалась релаксация ReZ в сторону уменьшения значений со временем. Немонотонность этой зависимости для образца №2 связана с изменением влажности в помещении лаборатории (рис. 6). Если предположить, что уменьшение ReZ происходит с экспоненциальным затуханием, т.е. $ReZ(t - t_0) = a \exp\{-b(t - t_0)\}$, то в полулогарифмических координатах из уравнения вида $\ln[ReZ(t - t_0)] = \ln(a) - b(t - t_0)$ можно получить значения коэффициента b , которые для образца №2 (рис. 6) принимали значения $0,00476 < b < 0,00544$ в течение 1 ч и $0,00368 < b < 0,00433$ в интервале 5 ч после ИМП. Это означает, что харак-

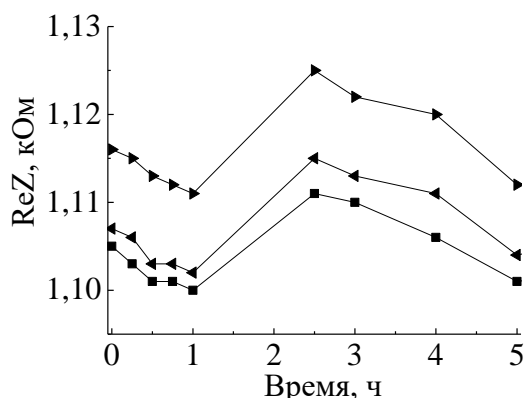
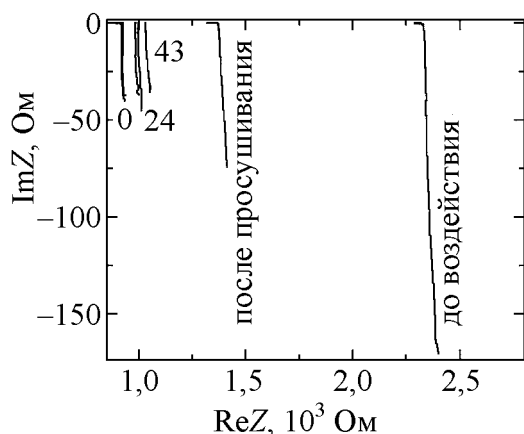


Рис. 6. Изменение ReZ образца №2 со временем на избранных частотах после импульсного ИМП-воздействия: ■ – 0,5 кГц, ◀ – 500, ▶ – 800

образца №2 происходило увеличение ReZ после воздействия (рис. 5). В последнем случае исходные образцы имели значения $ReZ \sim 2,5$ кОм во всем интервале частот непосредственно перед их размещением в соленоид, но после воздействия в течение длительного времени (до 21 ч) величина ReZ возрастала от 4700 до 5300 кОм, хотя релаксация электрофизических параметров к исходным значениям не происходила. Поскольку для данного образца справедлива эквивалентная схема с последовательным соединением активного и реактивного сопротивлений, это означает, что со временем возрастало удельное сопротивление ρ образца.

Подобные изменения происходили с образцом №3 (рис. 7), который предварительно насыщался в эксикаторе во влажной атмосфере в течение 7 дней. После ИМП-воздействия происходила релаксация электрофизических характеристик к исходным значениям, но даже после просушивания при температуре 105°C значения ReZ не достигли значений, которые были у влагонасыщенного образца до ИМП-воздействия. Поэтому объяснить характер изменения удельного сопротивления только изменением влагосодержания пор угольных образцов не представляется возможным.



терные постоянные времени релаксации $\tau = 1/b$ для электрофизических характеристик антрацита составляли $180 < \tau < 270$ ч (7,5–11,5 сут.). Подобные медленные процессы деполаризации угольного вещества изучались ранее методом инфранизочастотной диэлектрической спектроскопии для углей различных стадий метаморфизма [14].

Обнаружено противоположное направление смещения годографов после ИМП-воздействия. Если для образца №1 наблюдалось уменьшение ReZ со временем (рис. 4), то для

Рис. 7. Изменение со временем диаграммы Найквиста после ИМП-воздействия для увлажненного образца №3. Цифрами указано время после ИМП-воздействия (ч)

Зависимость от частоты тангенса потерь $\text{tg}\delta$ показывает, что наибольшие изменения происходят в низкочастотной области (рис. 8,а). После ИМП-воздействия $\text{tg}\delta$ уменьшается в три раза на частотах около 10 кГц и практически не изменяется на частотах, близких к 1 МГц.

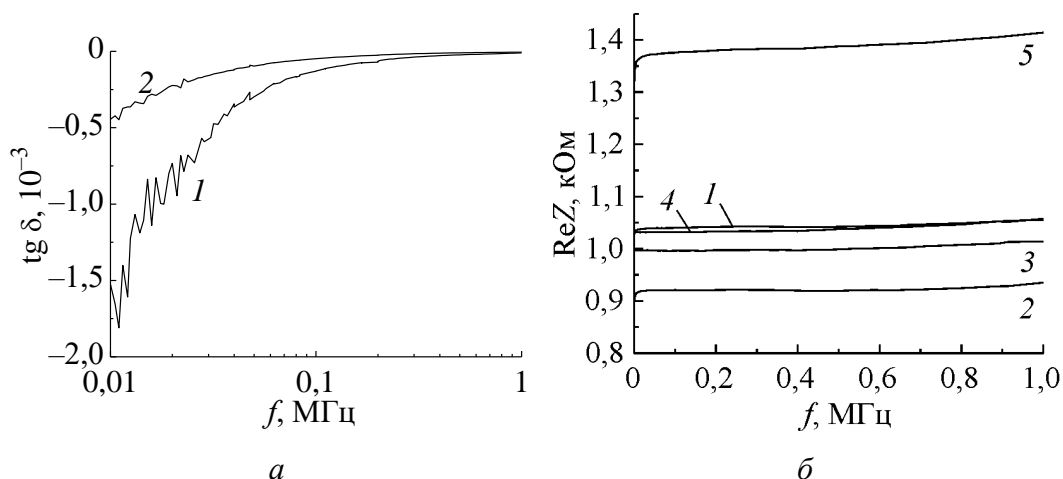


Рис. 8. Зависимость $\text{tg}(\delta)$ (а) и $\text{Re}Z$ (б) от частоты для образца №3. Приняты обозначения: 1 – до, 2 – непосредственно после ИМП-воздействия, 3 – через 20 ч, 4 – через 43 ч, 5 – после просушивания при 105°C

Представляет интерес изменение от частоты реальной части импеданса при ИМП-воздействии (рис. 8,б). После ИМП-воздействия $\text{Re}Z$ уменьшается, что означает увеличение электропроводности угля. Затем происходит релаксация к исходным данным (через 20 ч). Приведенная кривая для просушенного при 105°C образца показывает, что ИМП-воздействие приводит к противоположному эффекту по сравнению с тепловым воздействием, при котором происходит потеря влаги пористой структурой образца, предварительно насыщенного в парах воды. Действительно, согласно импедансной спектроскопии просушивание образца вызывало увеличение удельного сопротивления, в то время как ИМП-воздействие имело противоположный эффект.

Остается рассмотреть зависимость от частоты для мнимой части импеданса, поскольку эта величина обратно пропорциональна емкости: $\text{Im}Z = 1/\omega C$. Анализ результатов ИМП-воздействия показал, что для влагонасыщенного антрацита происходят изменения частотной зависимости $\text{Im}Z$. После просушивания образца на частотах $f < 20$ kHz величина $\text{Im}Z$ практически не зависит от частоты (рис. 9), т. е. в этом случае емкость $C \sim \omega^{-1}$. То же самое наблюдается для образца через 43 ч после ИМП-воздействия. Отклик $\text{Im}Z$ состоит в увеличении отклонения зависимости $\text{Im}Z(f)$ от горизонтальной линии, т.е. имеет место зависимость $C \sim \omega^{-(1+p)}$, где $p > 0$. Непосредственно после воздействия и через 2 ч состояние образца практически не изменилось, однако через 20 ч значения $\text{Im}Z(f)$ релаксировали к исходным.

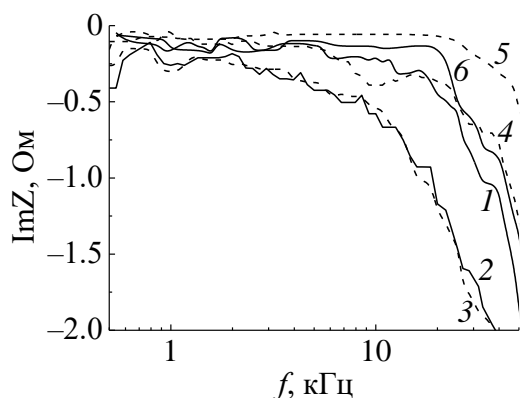


Рис. 9. Изменения $\text{Im}Z$ образца №3 в области частот $f < 50$ кГц со временем после ИМП-воздействия. Приняты обозначения для $\text{Im}Z(f)$: 1 – до воздействия, 2 – после воздействия, 3 – через 2 ч, 4 – через 20 ч, 5 – через 43 ч, 6 – после просушивания образца при 105°C

Такая же тенденция наблюдается в высокочастотной области спектра для емкости. Действительно, вычисления методом наименьших квадратов показали, что в двойных логарифмических координатах тангенс угла наклона (коэффициент a_1) зависимости $\lg(C) = a_0 + a_1 \lg(f)$ изменяется в соответствии с данными, представленными в табл. 2. Коэффициент $a_1 = p + 1$ релаксирует к исходному значению $a_1 = -2,06$ через 20 ч после ИМП-воздействия.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения $\lg(C) = a_0 + a_1 \lg(f)$ при ИМП-воздействии на влагонасыщенный антрацит (образец №3)

Этапы измерения	a_0	a_1
До воздействия	3,88	-2,06
После воздействия:		
непосредственно после воздействия	2,85	-1,87
через 2 ч	2,88	-1,88
через 20 ч	4,16	-2,09
через 43 ч	5,79	-2,37
После просушивания	4,86	-2,25

Выводы

Из данных, полученных методом импедансной спектроскопии для антрацита в интервале частот 500 Гц – 1 МГц, следует, что механизм электропроводности угля в зависимости от температуры и области частот определяется полупроводниковым (ионным) или металлическим (электронным) типом проводимости. При возрастании частоты электромагнитных колебаний в области температур $t < 100^\circ\text{C}$ удельное электросопротивление антрацита уменьшается, что увеличивает область прозрачности при электромагнитном воздействии на угольный пласт.

При ИМП-воздействии на образец с частотой 1 Гц происходят изменения электрофизических свойств антрацита. Если тепловое воздействие при температуре 105°C , когда удаляется влага из объема пор и трещин, приводит к увеличению удельного электросопротивления образца, то ИМП-воздействие способствует повышению электропроводности с последующей медленной

релаксацией σ к исходным значениям. На основании изменения зависимости мнимой компоненты импеданса $\text{Im}Z$ и емкости от частоты можно сделать заключение о том, что эффект ИМП-воздействия заключается в поляризации границ неоднородной пористой структуры антрацита с последующей релаксацией электрически заряженных границ, происходящей с различной скоростью в зависимости от размера неоднородностей. Такое поведение электрических свойств межфазных границ согласно [15] может быть обусловлено процессами десорбции, в частности, гидроксильных групп.

1. *Алексеев А.Д.* Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – Киев: Наук. думка, 2010. – 423 с.
2. *Агроскин А.А.* Физические свойства углей / А.А. Агроскин – Москва: 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. – Vol. 372. – P. 113–118.
4. *Amaral F.* Dielectric relaxation and morphologic properties of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ doped with GeO_2 / F. Amaral, L.C. Costa, M.A. Valente, F. Henry // *J. Non-Crystalline Solids.* – 2009. – Vol. 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.* – Vol. 137. – P. 16–34.
6. *Константинова Т.Е.* Влияние импульсных магнитных полей на структуру пироэлектриков на основе LaBSiO_5 и LaBGeO_5 / Т.Е. Константинова, А.С. Дорошкевич, И.А. Даниленко и др. // Актуальные проблемы прочности. Материалы XLIII Международной конференции, 27 сентября – 1 октября 2004 г., Витебск, Беларусь. – Часть 1. – С. 191–196.
7. *Digas J.R.* Dielectric function of ionic conductors studied by impedance spectroscopy / J.R. Digas // *Solid State Ionics.* – 2005. – Vol. 176. – P. 2065–2078.
8. *Cales B.* Dielectric properties of ionic conductors: Yttria stabilized zirconia and forsterite / B. Cales, P. Abelard // *J. Physique.* – 1980. – Т. 41, N7. – P. C6-462–C6-464.
9. *Алексеев А.Д.* Изменение динамических параметров флюидов в объеме пор ископаемых углей в зависимости от температуры / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов и др. // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 133–142.
10. *Алексеев А.Д.* Температурная зависимость диффузионных процессов в пористых средах: подвижность метана в углях / А.Д. Алексеев, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов и др. // Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 3. – С. 143–153.
11. *Stuerga D.* Microwave–Material Interactions and Dielectric Properties, Key Ingredients for Mastery of Chemical Microwave Processes in Microwaves in Organic Synthesis / D. Stuerga, Second edition. Edited by A. Loupy. Weinheim: WILEY–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. – P. 1–61.
12. *Свойства* конструкционных материалов на основе графита // Справочник под ред. В.П. Соседова. – М.: Мир, 1975. – 336 с

13. Буряков Т.И. Температурная зависимость электропроводности углерода луковичной структуры в газовых средах / Т.И. Буряков, Е.Н. Ткачев, А.И. Романенко, и др. // Вестник НГУ, Серия: Физика. – 2008. – Вып. 3. – С. 100–104.
14. Зайцев П.П. Электрические свойства выбросоопасных каменных углей и прогнозирование выброса угля и газа / П.П. Зайцев, Г.В. Малова, Е.М. Панченко и др. // Химия твердого топлива. – 1992. – № 5. – С. 88–92.
15. Алексеенко В.И. Воздействие импульсного магнитного поля на процесс термического разложения гидроксида циркония / В.И. Алексеенко, Т.Е. Константинова, И. А. Даниленко и др. // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 36, № 9. – С. 1087–1091.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ ІМПЕДАНСНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ВІДГУКУ АНТРАЦИТУ НА ТЕПЛОВУ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ ДІЮ

Розглянуто зміну електрофізичних властивостей антрациту в інтервалі частот 500 Гц – 1 МГц в залежності від температури та впливу імпульсів магнітного поля частотою 1 Гц. Показано, що тип електропровідності в антрациті (напівпровідниковий або металевий) залежить від інтервалу температур і частоти. Релаксація компонент комплексного імпедансу після імпульсного впливу пов'язана зі зміною електричної ємності поляризованих меж поверхні пір і вологості зразка.

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

Vasilenko T.A., Kirillov A. K., Doroshkevich A.S., Saprukina A.V.

THE STUDY BY IMPEDANCE SPECTROSCOPY RESPONSE OF ANTHRACITE ON THE THERMAL AND ELECTROMAGNETIC EFFECTS

The change in the electrical properties of anthracite in the frequency range 500 Hz – 1 MHz depending on temperature and exposure to magnetic field pulses at 1 Hz is considered. Shown that the type of electrical conductivity (semiconductor or metallic) of anthracite depends on the temperature and frequency range. Relaxation of the complex impedance components after pulsed exposure related with the change in capacitance of the polarized boundary surface of the pores and the moisture content of the specimen.

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