

PACS: 72.80.-r, 72.90.+y, 81.70.Ex

Э.П. Фельдман, Л.И. Стефанович, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов

ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАК СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ УГЛЯ.

I. СУХОЙ ОБРАЗЕЦ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Статья поступила в редакцию 21 октября 2015 года

В рамках модели эффективной среды теоретически исследовано влияние трещиноватости сухого угля на его комплексное сопротивление (импеданс). На основе результата исследования влияния изолированной трещины на импеданс угля найден эффективный импеданс ансамбля случайно расположенных параллельных трещин близкого размера на комплексный импеданс угольного образца. Получено аналитическое выражение для комплексного импеданса такой системы. Построена серия годографов для образцов угля разной степени трещиноватости, которая показывает, что возрастание последней приводит к увеличению радиуса кривых годографов. Найден частотные зависимости действительной и мнимой частей эффективного импеданса и проанализировано влияние трещиноватости угля на их форму. Получено аналитическое выражение, согласно которому для нахождения коэффициента трещиноватости угля ν достаточно экспериментально определить частоту, соответствующую максимуму мнимой части импеданса, а также измерить экспериментально статическое электрическое сопротивление угольной матрицы.

Ключевые слова: трещиноватость угля, импедансная спектроскопия, эквивалентная электрическая схема замещения, эффективный импеданс, статическое сопротивление угольной матрицы, эффективная емкость, диаграмма Найквиста, частотные зависимости импеданса угля

У рамках моделі ефективного середовища теоретично досліджено вплив тріщинуватості сухого вугілля на його комплексний опір (імпеданс). На основі результату дослідження впливу ізольованої тріщини на імпеданс вугілля знайдено ефективний імпеданс ансамблю випадково розташованих паралельних тріщин близького розміру на комплексний імпеданс вугільного зразка. Отримано аналітичний вираз для комплексного імпедансу подібної системи. Побудовано серію годографів для вугільних зразків різного ступеня тріщинуватості, яка свідчить про те, що зростання ступеня останньої призводить до збільшення радіуса кривих годографів. Знайдено частотні залежності дійсної та мнімої частин ефективного імпедансу та проаналізовано вплив тріщинуватості вугілля на їх форму. Отримано аналітичний вираз, згідно з яким для знаходження коефіцієнта тріщинуватості вугілля ν достатньо експериментально визначити частоту, яка

відповідає максимуму мнімої частини імпедансу, а також виміряти експериментально статичний електричний опір вугільної матриці.

Ключові слова: тріщинуватість вугілля, імпедансна спектроскопія, еквівалентна електрична схема заміщення, ефективний імпеданс, статичний опір вугільної матриці, ефективна ємність, діаграма Найквіста, частотні залежності імпедансу вугілля

Введение

Одними из основных показателей выбросоопасности при разработке угольных месторождений являются ориентация трещин в пласте и его трещиноватость. Наличие в материале трещин существенно влияет на его физические свойства, в частности на прохождение электрического тока. Ископаемые угли, содержащие трещины, поры, инородные включения и т.п., представляют собой по сути сложные гетерогенные структуры (ГС). Уголь по своей природе является нерегулярной ГС с хаотически ориентированными трещинами в матрице и случайно расположенными порами и поэтому он в среднем изотропен. В силу малости размеров неоднородностей и их случайного распределения по объему V образца в нем можно выделить некоторые объемы l^3 (так называемые представительные объемы), свойства которых одинаковы и соответствуют свойствам всего образца как целого [1]. Иными словами, на масштабах $L \gg l$ уголь как гетерогенную систему можно считать макроскопически однородным и характеризовать набором эффективных параметров, в том числе электропроводностью и диэлектрической проницаемостью.

Несмотря на то, что вышеупомянутые параметры являются лишь интегральными электрофизическими характеристиками материала, используя методы импедансной спектроскопии (ИС), можно выявить такие важные на практике свойства угля, как его трещиноватость и пористость.

Как было показано в [2], изменение сопротивления угля за счет трещин существенно превосходит сопротивление, обусловленное порами, при одинаковых значениях пористости и трещиноватости. Настоящая работа посвящена рассмотрению влияния отдельной изолированной трещины на частотную зависимость комплексного электрического сопротивления (импеданса) угольного образца, а также влияния системы случайно расположенных параллельных трещин на импеданс угольного образца. Наше рассмотрение будет базироваться на нахождении эффективных электрофизических характеристик угольного образца с целью выяснения принципиальной возможности определения коэффициента трещиноватости угольного пласта.

Влияние изолированной трещины на импеданс угля

Пусть угольный образец имеет форму плоскопараллельной пластины с площадью поперечного сечения S и толщиной d , заключенной между двумя

плоскими параллельными электродами, на которые подается квазистационарное переменное напряжение гармонического вида

$$\tilde{U}(t) = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где U_m – амплитуда напряжения (на практике $U_m \sim 10^{-2}$ V), $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота (rad/s). Частотный диапазон измерений Δf обычно составляет 1 Hz–1 MHz.

Рассмотрим, как влияют трещины, имеющиеся в угле, на комплексное сопротивление (импеданс) образца. В случае статического напряжения ($U = \text{const}$) газонаполненные трещины не проводят электрический ток и, как было показано в [2,3], могут создавать лишь дополнительное омическое сопротивление. В случае же переменного напряжения трещины с высоким сопротивлением среды внутри них, работая как электрические конденсаторы, станут пропускать электрический ток. Этот эффект будет рассмотрен для условий, когда частота изменения электрических полей, будучи достаточной для его проявления, в то же время не слишком велика, так что распределение электрического поля вокруг трещин в каждый момент времени можно считать удовлетворяющим стационарным уравнениям (т.е. для расстояний порядка размеров трещины скин-эффектом можно пренебречь). Глубина проникновения поля в уголь (глубина скин-слоя) может быть выражена формулой [4]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma_0 f}}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – магнитная проницаемость вакуума; f – частота, на которой проводится измерение импеданса; σ_0 – статическая электропроводность угля, зависящая от его марки, влажности и ряда других факторов.

Для типичных значений электропроводности угля средней стадии метаморфизма можно принять значение $10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ [5]. Если в качестве частоты f взять верхнюю границу измеряемого диапазона $f = 10^6$ Hz, то из (2) находим, что глубина скин-слоя $\delta = 500$ м, т.е. достаточно велика для исследуемого образца.

Рассмотрим вначале ситуацию, когда образец угля содержит одну единственную изолированную трещину дискообразной формы, т.е. в виде эллипсоида вращения, с полярной осью c и радиусом экватора a (причем эллипсоид сплюснут, т.е. $c/a \ll 1$). Учитывая, что полуоткрытие трещины определяется выражением

$$w(r) = \frac{c}{a} \sqrt{a^2 - r^2}, \quad (3)$$

где $r^2 = x^2 - y^2$, а внутри трещины находится газ при атмосферном давлении (относительная диэлектрическая проницаемость которого $\varepsilon \simeq 1$), для емкости трещины получаем выражение

$$C_i = \frac{\pi \varepsilon \varepsilon_0 a^2}{c}, \quad (4)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость газообразного флюида, заполняющего полость трещины ($\varepsilon \approx 1$). При этом мы предполагаем, что электрические поля и токи слабы, т.е. они не создают механических напряжений, которые могли бы заметно влиять на раскрытие трещины.

Активное сопротивление образца в отсутствие трещин (сопротивление угольной матрицы) будет иметь вид

$$R_0 = \frac{d}{\sigma_0 S}, \quad (5)$$

где $\sigma_0 = \sigma(\omega)|_{\omega=0} = \sigma(0)$ – статическая электропроводность угольной матрицы, d – толщина образца, S – площадь его поперечного сечения.

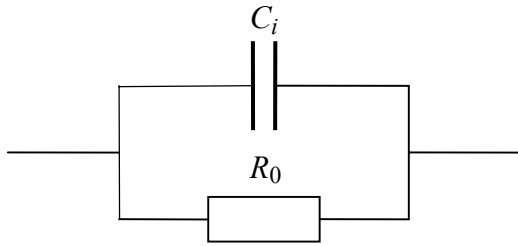


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения угольного образца, содержащего одну трещину

образец угля не обладает заметной индуктивностью ($L = 0$), то эквивалентная электрическая схема замещения в данном случае может быть представлена параллельной $R_0 C_i$ -цепью (рис. 1), где C_i – емкость трещины в предположении, что статическая проводимость газа внутри трещины близка к нулю, а R_0 – это активное сопротивление угольной матрицы, представленное выражением (5). Из закона Ома для участка с переменным напряжением $\tilde{U}(t)$ (выражение (1)) имеем

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\underline{U}(\omega)}{\underline{I}(\omega)}, \quad (6)$$

где $\underline{Z}(\omega)$ – комплексное сопротивление (импеданс) всей цепи. Так как конденсатор C_i и резистор R_0 соединены параллельно, их адмиттансы складываются, и тогда адмиттанс всей цепи оказывается

$$Y(\omega) = i\omega C_i + 1/R_0. \quad (7)$$

Импеданс $\underline{Z}(\omega)$ всей цепи вычислим как величину, обратную адмиттансу $\underline{Y}(\omega)$:

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{1}{\underline{Y}(\omega)} = \frac{1}{1/R_0 + i\omega C_i} = \frac{R_0}{1 + i\omega C_i R_0}. \quad (8)$$

Выделяя действительную и мнимую части импеданса $\underline{Z}(\omega)$, получаем

$$\underline{Z}(\omega) = Z'(\omega) + iZ''(\omega), \quad (9)$$

где

$$Z'(\omega) = \frac{R_0}{1 + (\omega C_i R_0)^2}, \quad Z''(\omega) = \frac{-\omega C_i R_0^2}{1 + (\omega C_i R_0)^2}. \quad (10)$$

Можно заметить, что они связаны друг с другом простым соотношением

$$Z'' = -\omega C_i R_0 Z'. \quad (11)$$

Используя (11) в виде $\omega C_i R_0 = -Z''/Z'$, можно из первого выражения (10) исключить частоту ω :

$$Z'' = \frac{R_0}{1 + (Z''/Z')^2}. \quad (12)$$

Легко показать, что выражение (12) можно преобразовать к виду

$$(Z' - R_0/2)^2 + Z'' = (R_0/2)^2, \quad (13)$$

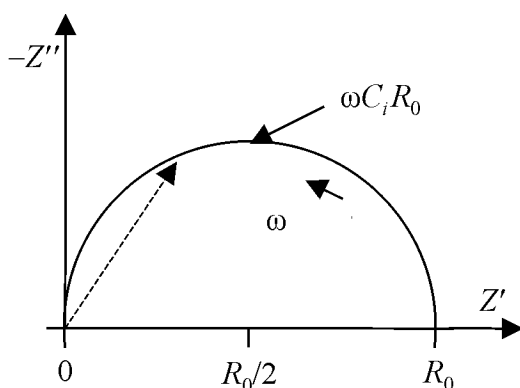


Рис. 2. Диаграмма Найквиста (годограф импеданса) угольного образца с трещиной

что представляет собой уравнение окружности в координатах $Z'-Z''$. Физический смысл имеет только верхняя полуокружность, показанная на рис. 2 (диаграмма Найквиста или годограф импеданса). Ее радиус равен $R_0/2$, а центр расположен на оси Z' на расстоянии $R_0/2$ от начала координат. Если частота переменного тока ω увеличивается (в пределе $\omega \rightarrow \infty$), то импеданс параллельной RC -цепи (рис. 1) стремится к нулю, т.е. конденсатор шунтирует резистор. При нулевой частоте импеданс конденсатора бесконечно велик, т.е. весь ток протекает через резистор и соответственно $\underline{Z} \approx Z' \approx R_0$. Согласно (10) имеем

конденсатора бесконечно велик, т.е. весь ток протекает через резистор и соответственно $\underline{Z} \approx Z' \approx R_0$. Согласно (10) имеем

$$Z(\infty) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z(\omega) = 0, \quad Z(0) = \lim_{\omega \rightarrow 0} Z(\omega) = R_0. \quad (14)$$

Как видно из выражений (10) и рис. 2, мнимая часть импеданса, создаваемая емкостным сопротивлением трещины, имеет максимальное абсолютное значение, равное $|Z''(\omega)| = Z'(\omega) = R_0/2$, при частоте, удовлетворяющей условию $\omega = 1/C_i R_0$.

**Эффективный импеданс угля,
содержащего систему параллельных трещин**

Основной интерес представляют эффективные электрические характеристики, выражающие связь между средними по объему (см., напр., [4]) значениями тока и напряжения в образце угля, содержащем большое количество трещин. В общем виде решение данной задачи сопряжено с большими трудностями. Поэтому для ее решения можно воспользоваться простыми модельными представлениями. Предположим, что в исследуемом образце угля имеется система N параллельных одинаковых дискообразных (в виде сплюснутых эллипсоидов вращения) трещин, распределенных случайным образом по объему. Рассмотрим случай малой концентрации трещин, когда их взаимодействием можно пренебречь. Тогда закон Ома для всего образца можно записать в виде

$$\underline{Z}_{\text{eff}} = \frac{\langle \tilde{U} \rangle}{\langle \tilde{I} \rangle}, \quad (15)$$

где угловыми скобками обозначены средние значения по объему образца. Здесь $\underline{Z}_{\text{eff}}$ – эффективный импеданс угольного образца. Ввиду случайного расположения трещин образец можно считать статистически однородным. Для характеристики горной породы, содержащей трещины, вводят коэффициент трещиноватости ν [6], который определяют отношением объема трещин к объему породы, заключающей в себе эти трещины:

$$\nu = V_{\text{cr}}/V \quad (16)$$

(где V_{cr} – полный объем трещин в образце, V – объем образца), либо пользуются величиной γ – коэффициентом объемной трещиноватости, равным числу трещин в единице объема горной породы. Эти величины связаны соотношением

$$\nu = \gamma \nu_0, \quad (17)$$

где ν_0 – средний объем одной трещины. Как было показано в [3], эффективная статическая электропроводность образца в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, выражается соотношением

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_0}{(1 + 4\nu/3)^2}. \quad (18)$$

Тогда с учетом соотношения (18) активное сопротивление образца в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, может быть выражено через коэффициент трещиноватости угля ν :

$$R(\nu) \approx R_0(1 + 8\nu/3). \quad (19)$$

При получении выражения (19) мы использовали предположение, что коэффициент трещиноватости угля обычно мал, т.е. выполняется соотношение $\nu \ll 1$.

Поскольку для переменного напряжения газонаполненные трещины играют роль емкостей, можно ввести полную эффективную емкость угольного образца. Если предположить, что трещины являются примерно одинаковыми, имеющими емкость, равную C_i , которая определяется выражением (4), то полную эффективную емкость образца угля, содержащего трещины, можно определить следующим образом. Поскольку трещины, расположенные в слое толщиной, меньшей, чем среднее расстояние между трещинами, можно отождествить с системой конденсаторов, соединенных параллельно, то их емкости складываются, и результирующая емкость такой системы оказывается равной

$$C_{\parallel} = C_i N_{\parallel} = C_i N_{cr}^{2/3}. \quad (20)$$

Чтобы определить полную эффективную емкость образца, необходимо найти общую емкость всех слоев, соединенных последовательно. С учетом статистической однородности образца емкости всех этих слоев можно считать одинаковыми и равными C_{\parallel} . Тогда результирующая эффективная емкость образца оказывается

$$C(\gamma) = C_i (N_{\parallel} / N_{\perp}) = C_i N_{cr}^{1/3} = C_i \gamma^{1/3} V^{1/3} = C_i \nu^{1/3} (V / \nu_0)^{1/3}, \quad (21)$$

где ν_0 – объем трещины, $V = Sd$ – объем образца. Полный эффективный импеданс всего угольного образца с коэффициентом трещиноватости ν можно найти, проведя в выражениях (9) и (10) замены $R_0 \rightarrow R(\nu)$ и $C_i \rightarrow C(\nu)$. Тогда получим

$$\underline{Z}_{eff}(\omega, \nu) = Z'(\omega, \nu) + iZ''(\omega, \nu), \quad (22)$$

где действительная и мнимая части импеданса образца могут быть представлены соответственно выражениями

$$Z'(\omega, \nu) = \frac{R(\nu)}{1 + (\omega C(\nu) R(\nu))^2}; \quad (23)$$

$$Z''(\omega, \nu) = \frac{-\omega C(\nu) R^2(\nu)}{1 + (\omega C(\nu) R(\nu))^2}. \quad (24)$$

Поскольку левые части выражений (23), (24) легко измерить, используя методы импедансной спектроскопии, найденные соотношения определяют в неявном виде трещиноватость угольного образца. Решая эти уравнения относительно величины ν , можно найти трещиноватость исследуемого угля. Но проще всего найти коэффициент трещиноватости, построив годограф импеданса образца угля с трещинами (рис. 3). Легко заметить, что для частоты, при которой наблюдается максимум годографа импеданса, выполняется тождество

$$\omega C(\nu) R(\nu) = 1, \quad (25)$$

которое в неявном виде определяет коэффициент трещиноватости ν образца. Подставляя из (19) и (21) в (25) явные выражения для $R(\nu)$ и $C(\nu)$, получаем уравнение для определения коэффициента ν

$$2\pi f_m R_0 (1 + 8\nu/3) C_i \nu^{1/3} (V/\nu_0)^{1/3} = 1. \quad (26)$$

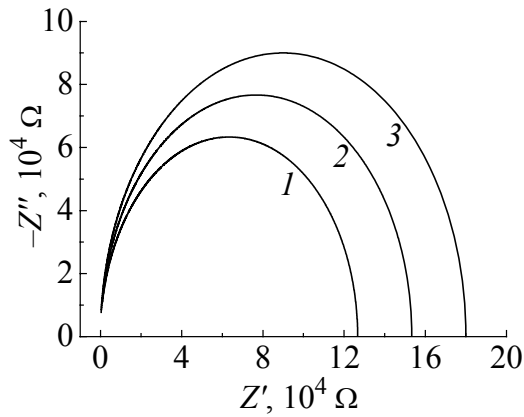


Рис. 3. Годограф импеданса угля при различных коэффициентах трещиноватости ν : 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.3

Для численных оценок трещиноватости угольного образца сопротивление угольной матрицы на нулевой частоте R_0 можно заменить на экспериментально измеряемое статическое сопротивление образца при высоком гидростатическом давлении $R_s(p_{\max})$, когда трещиноватость угля практически подавлена. С учетом того, что на практике величина $\nu \ll 1$, из уравнения (26) легко найти коэффициент трещиноватости угля

$$\nu \approx \frac{\nu_0}{8\pi^3 f_m^3 R_s^3(p_{\max}) C_i^3 V}. \quad (27)$$

Для того чтобы воспользоваться формулой (27), необходимо предварительно найти объем трещины ν_0 и оценить емкость одной изолированной трещины. Учитывая, что мы считаем трещину сфероидом, получаем

$$\nu_0 = \frac{4}{3} \pi a^2 c \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3.$$

Воспользовавшись формулой (4) и полагая в ней $a \sim 10^{-4} \text{ м}$, а $c \sim 10^{-6} \text{ м}$, получаем емкость одной трещины $C_i \approx 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}$. Пусть образец имеет вид квадратной пластины площадью $S = 10^{-4} \text{ м}^2$ и толщиной $d = 10^{-3} \text{ м}$, а измеренное статическое сопротивление $R_s(p_{\max})$ образца оказалось равным $10^5 \Omega$. Тогда для частоты $f \sim 105 \text{ с}^{-1}$ по формуле (27) для коэффициента трещиноватости угля получаем значение $\nu \approx 0.07 \approx 0.1 \approx 10\%$, что представляет собой вполне разумную величину.

Частотные зависимости импеданса угля

Используя выражения (24) и (25), мы построили серию годографов эффективного импеданса в переменных $Z' - Z''$ (рис. 3), а также спектральные зависимости действительной (рис. 4,а) и мнимой (рис. 4,б) частей импеданса для образцов угля, имеющих различную степень трещиноватости. Как видно из рис. 3, кривые годографа импеданса представляют собой части полуокружностей. При возрастании частоты изображающая точка движется вдоль этих кривых против часовой стрелки. Заметим, что повышение степени трещиноватости угля увеличивает радиусы этих кривых, смещая максимумы кривых вправо.

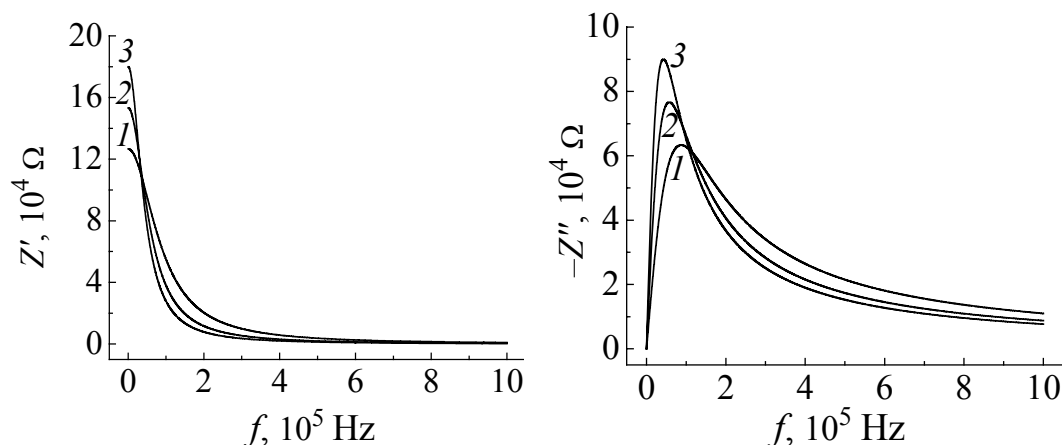


Рис. 4. Частотная зависимость действительной $Z'(f)$ (а) и мнимой $-Z''(f)$ (б) частей импеданса при различных коэффициентах трещиноватости ν : 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.3

Представляет интерес проанализировать частотные зависимости действительной и мнимой частей импеданса угольного образца. Из рис. 4,а видно, что частотные зависимости вещественной части импеданса представляют собой монотонно спадающие зависимости с максимумом на минимальной частоте, причем повышение степени трещиноватости угольного образца приводит к возрастанию максимумов кривых по высоте. По мере роста трещиноватости угля скорость спадания кривых существенно увеличивается. Что же касается мнимых частей импеданса, то, как видно из рис. 4,б, они представляют собой кривые с максимумом. Причем повышение степени трещиноватости угольного образца приводит к возрастанию максимумов кривых по высоте и сдвигу их в сторону низких частот. Как следует из рис. 4, частотные зависимости действительной и мнимой частей импеданса качественно описывают аналогичные зависимости импеданса, полученные экспериментально в работе [8] для антрацитового угля.

Заключение

В работе теоретически рассмотрено влияние трещиноватости угля на его электрохимический импеданс. На основе результатов исследования влияния изолированной трещины на импеданс угольного образца изучено воздействие ансамбля случайно расположенных параллельных трещин примерно равного размера на комплексный импеданс угольного образца. Построена серия годографов для образцов разной степени трещиноватости, которая показывает, что рост степени трещиноватости приводит к увеличению радиуса кривых годографов. Кроме того, проанализировано влияние степени трещиноватости угля на частотные зависимости действительной и мнимой частей эффективного импеданса.

Показано, что для нахождения коэффициента трещиноватости угля ν достаточно теоретически оценить величину емкости C_i , создаваемую отдельной изолированной трещиной. Измеряя экспериментально статическое сопро-

тивление образца при высоком гидростатическом давлении $R_s(p_{\max})$, по формуле (19) можно найти активное сопротивление R_0 угольной матрицы на постоянном токе. Используя метод импедансной спектроскопии, строим годограф эффективного импеданса образца и определяем частоту, соответствующую максимуму мнимой части импеданса $Z''(\omega, \gamma)$. Затем, используя экспериментальные данные и выражение (27), находим коэффициент трещиноватости угольного образца ν .

1. *Н.А. Поклонский, Н.И. Горбачук*, Основы импедансной спектроскопии композитов, Изд-во БГУ, Минск (2005).
2. *Э.П. Фельдман, Е.А. Винник, Я.И. Грановский, Н.А. Калугина*, Физико-технические проблемы горного производства. Сборник научных трудов, ИФГП НАН Украины, вып. 14, 54 (2011).
3. *Р.Л. Салганик*, ИФЖ **27**, 1069 (1974).
4. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*. Теоретическая физика, Т.8. Электродинамика сплошных сред, Наука, Москва (1982).
5. *Геологический словарь*: в 2-х томах, К.Н. Паффегольц и др. (ред.), Недра, Москва (1978).
6. *V.V. Slyusarev, P.I. Polyakov*, Int. conf. «Functional materials», Abstracts, Ukraine, Partenit, Oct. 1–6, 2007, p. 284.
7. *И.И. Аммосов, И.В. Еремин*, Трещиноватость углей, Наука, Москва (1961).
8. *А.Д. Алексеев, Т.Е. Константинова, А.К. Кириллов, А.С. Дорошкевич, А.В. Сапрыкина*, Физико-технические проблемы горного производства. Сборник научных трудов, ИФГП НАН Украины, вып. 13, 22 (2010).

E.P. Feldman, L.I. Stefanovich, T.A. Vasilenko, A.K. Kirillov

IMPEDANCE SPECTROSCOPY AS A DETERMINATION METHOD FOR COAL JOINTING.

I. DRY SAMPLE

Within the frameworks of the effective medium model, the effect of the dry coal jointing on the complex resistance (impedance) has been studied. The result of the modeling of the effect of a single crack on the coal impedance allowed finding of the effective impedance of the ensemble of randomly-positioned parallel cracks of similar size on the complex impedance of a coal sample. An analytical expression for the complex impedance of the described system has been derived. A series of hodographs of coal of varied jointing has been drawn that demonstrates how an increase in jointing results in an increment in the radius of the hodograph curves. Frequency dependences of the real and imaginary components of the effective impedance have been found and the influence of the coal jointing on their shape has been analyzed. The found analytical expression states that in order to find the coefficient of coal jointing ν , it is sufficient to determine the frequency associated with the maximum of the imaginary component of the impedance and to measure the static electric resistance of the coal matrix.

Keywords: coal jointing, impedance spectroscopy, equivalent electrical drawing of substitution, effective impedance, static resistance of the coal matrix, effective capacitance, Nyquist diagram, frequency dependences of coal impedance

Fig. 1. Equivalent electrical drawing of substitution of a coal sample containing a single crack

Fig. 2. Nyquist diagram (impedance hodograph) of a coal sample containing a single crack

Fig. 3. Hodograph of coal impedance at varied jointing coefficient ν : 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.3

Fig. 4. Frequency dependence of the real $Z'(f)$ (a) and imaginary $-Z''(f)$ (b) component as of impedance at varied jointing coefficient ν : 1 – 0.1, 2 – 0.2, 3 – 0.3