

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

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

ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИСКОПАЕМОГО УГЛЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ТРЕЩИНЫ. II. ВЛАЖНЫЙ ОБРАЗЕЦ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2016 года

С использованием модели эффективной среды теоретически исследовано влияние трещиноватости влажного угля на его комплексное сопротивление (импеданс). Показано, что трещины, содержащие объемную влагу, способствуют повышению электропроводности угля на постоянном токе. В то же время сухие (газонаполненные) трещины оказывают двоякое влияние: с одной стороны, они препятствуют прохождению постоянного тока, создавая дополнительное активное сопротивление, с другой стороны, для переменного напряжения они играют роль конденсаторов, пропуская токи смещения благодаря поляризационным эффектам. В модели хаотически ориентированных трещин найден их вклад в мнимую часть импеданса образца на переменном токе. С учетом вышесказанного получены аналитические выражения для комплексного импеданса влагонасыщенного угля и тангенса угла его потерь. Показано, что, используя диаграмму Найквиста, можно получить простое уравнение для нахождения коэффициента трещиноватости угля. Решение этого уравнения позволяет найти явное выражение для коэффициента трещиноватости через характеристики угольного образца, экспериментально измеряемые методами импедансной спектроскопии. Проведена оценка коэффициента трещиноватости углей средней стадии метаморфизма.

Ключевые слова: трещиноватость угля, импедансная спектроскопия, эквивалентная электрическая схема замещения, эффективный импеданс, влажный образец, эффективная емкость, диаграмма Найквиста, частотные зависимости импеданса угля

З використанням моделі ефективного середовища теоретично досліджено вплив тріщинуватості вологонасиченого вугілля на його комплексний опір (імпеданс). Показано, що тріщини, які вміщують об'ємну вологу, сприяють підвищенню електропровідності вугілля на постійному струмі. У той же час сухі (газонаповнені) тріщини роблять двоякий вплив: з одного боку, вони перешкоджають проходженню постійного струму, створюючи додатковий активний опір, з іншого боку, для змінної напруги вони відіграють роль конденсаторів, пропускаючи струми зміщення завдяки поляризаційним ефектам. У моделі хаотично орієнтованих тріщин знайдено їхній внесок до мнімої частини імпедансу зразка на змінному струмі. З урахуванням вищесказаного отримано аналітичні вирази для комплексного імпедансу вологонасиченого вугілля й тангенса кута його втрат. Показано, що, використовуючи діаграму Найквіста, можна отримати просте рівняння для знаходження коефіцієнта тріщинуватості вугілля. Рішення цього рівняння дозволяє знайти явний вираз для коефіцієнта тріщинуватості через характеристики вугільного зразка, що експери-

ментально вимірювані методами імпедансної спектроскопії. Проведено оцінку коефіцієнта тріщинуватості вугілля середньої стадії метаморфізму.

Ключові слова: тріщинуватість вугілля, імпедансна спектроскопія, еквівалентна електрична схема заміщення, ефективний імпеданс, вологий зразок, ефективна ємність, діаграма Найквіста, частотні залежності імпедансу вугілля

1. Введение

В зависимости от стадии метаморфизма ископаемые угли имеют развитую систему как открытых, так и закрытых пор и трещин. От степени развитости пористости и трещиноватости угля будет зависеть интенсивность газовой выделенности и, следовательно, выбросоопасность угольного пласта. Ископаемые угли, содержащие трещины, поры, инородные включения и т.п., представляют собой, по сути, сложные гетерогенные структуры. Уголь по своей природе является нерегулярной гетерогенной структурой с хаотически ориентированными трещинами в матрице и случайно расположенными порами, и поэтому он в среднем изотропен. Причем наряду с газообразными флюидами часть из этих пустот содержит объемную влагу, которая заполняет открытые поры и трещины. В особенности это характерно для углей ранней и средней стадий метаморфизма.

Для определенности будем рассматривать угли средней стадии метаморфизма, электропроводность которых на постоянном токе σ_0 весьма мала, и ее значение составляет 10^{-8} – $10^{-6} \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Хотя наличие пор в угле и оказывает дополнительное сопротивление постоянному электрическому току [1], однако, как показано в [2], их относительная роль по сравнению с влиянием трещин оказывается незначительной. Поэтому в настоящей работе сосредоточим свое внимание на влиянии трещиноватости на электрофизические свойства угля.

Будем предполагать, что трещины не имеют преимущественной ориентации в пространстве и распределены в образце совершенно случайным образом. Влияние трещин на процессы переноса заряда в углях будем рассматривать в приближении их малой концентрации, когда среднее расстояние между трещинами достаточно велико, так что можно пренебречь их взаимодействием. Поскольку в ископаемых углях объемная доля трещин (трещиноватость), как правило, мала, то, как было показано в [3], чтобы они оказывали заметное влияние на электропроводность на постоянном токе, необходимо выполнение некоторых условий. Одним из них является следующее: свойства содержимого полости трещин должны существенно отличаться от свойств среды, в которой они распределены.

Поскольку закрытые трещины, как правило, заполнены газообразными флюидами, их проводимость ничтожно мала: $\sigma_{0g} \leq 10^{-12} \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, а открытые трещины, заполненные минерализованными подземными водами, имеют высокую статическую проводимость: $\sigma_{0w} \approx 10 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Для такой гетерогенной среды для электропроводности на постоянном токе будут выполняться следующие неравенства:

$$\sigma_{0w} \gg \sigma_{0c} \gg \sigma_{0g}, \quad (1)$$

где σ_{0c} – электропроводность угольной матрицы на постоянном токе.

При импедансных исследованиях амплитуда напряжений, прикладываемых к образцу, как правило, не превышает 0.1 V, поэтому явления пробоя и нелинейные явления можно не учитывать. Необходимо отметить, что трещины, которые содержат минерализованную подземную воду, следует, вообще говоря, рассматривать как электрохимические ячейки (с ионным типом проводимости), т.е. диффузионные элементы Варбурга. Однако, поскольку характерный размер полостей трещин, заполненных водой, мал, а частоты прилагаемого напряжения не слишком велики ($f < 10^6$ Hz), то это будут элементы Варбурга конечной толщины. Известно, что при низких частотах последние ведут себя практически как активные сопротивления. Поэтому для простоты трещины, заполненные влагой, можно рассматривать как проводящие включения, имеющие статическую проводимость, равную проводимости заполняющих их минерализованных подземных вод, т.е. σ_{0w} . Та часть трещин, которая содержит газообразные флюиды, будет создавать для постоянных токов дополнительное сопротивление. Для переменных же токов трещины, заполненные газообразными флюидами, благодаря поляризационным эффектам будут проводить токи смещения. Введем безразмерный коэффициент трещиноватости $\nu = V_{cr}/V$, где V_{cr} – суммарный объем трещин, а V – объем образца. Тогда для исследуемого угольного образца величину ν можно представить следующим образом:

$$\nu = \nu_w + \nu_g, \quad (2)$$

где ν_w – коэффициент трещиноватости для трещин, заполненных влагой, а ν_g – коэффициент трещиноватости для сухих трещин, заполненных газообразными флюидами. Последний можно представить в виде

$$\nu_g = (1-k)\nu, \quad (3)$$

где k – доля трещин, заполненных влагой.

Ввиду того, что трещины, заполненные влагой, составляют только некоторую долю от всех трещин исследуемого угольного образца, а коэффициент полной трещиноватости ν , как правило, невелик (порядка 0.1–0.3), каркас, образуемый системой проводящих трещин, сам по себе не может обеспечить прохождение сквозного электрического тока. Следовательно, система каналов, образуемых проводящими трещинами, находится вдали от порога протекания, и проводимость угля можно находить в рамках модели эффективной среды [4].

2. Влияние трещин на статическое сопротивление угля

Прежде чем изучать прохождение переменного тока через угольный образец, содержащий трещины, исследуем, какое влияние оказывают влагонасыщенные и сухие трещины на прохождение постоянного электрического тока.

Пусть исследуемый образец угля представляет собой пластинку площадью сечения S и толщиной d . Для простоты предположим, что все трещины примерно одинакового размера и имеют форму эллипсоида вращения с полярной осью c и радиусом экватора a . Величина c представляет собой половину максимального раскрытия трещины. В качестве ее характерного значения примем, что $c \sim 10^{-6}$ м. Параметр a есть не что иное как половина длины трещины. Будем предполагать, что величина a имеет значение $\sim 10^{-4}$ м. Таким образом, трещины имеют форму сплюснутого сфероида (диска), причем $c/a \sim 10^{-2}$, т.е. $c/a \ll 1$.

Если предположить, что угольный образец представляет собой изотропный твердотельный материал, то, как показано в работе [3], наличие в нем хаотически ориентированных непроводящих трещин понижает его электропроводность на постоянном токе. При выполнении соотношений

$$\sigma_{0g} / \sigma_{0c} \ll c/a \ll 1 \quad (4)$$

удельная электропроводность угля, содержащего только сухие трещины, оказывается равной

$$\sigma_{01} = \sigma_{0c} (1 - 8\nu/9), \quad (5)$$

где ν – коэффициент полной трещиноватости угля. В нашем случае $\nu \equiv \nu_g = (1 - k)\nu$, поэтому выражение (5) принимает вид

$$\sigma_{01} = \sigma_{0c} [1 - 8(1 - k)\nu/9]. \quad (6)$$

С другой стороны, как показано в [3], наличие в угольном образце хаотически ориентированных проводящих (влагонасыщенных) трещин повышает электропроводность угля на постоянном токе. При выполнении соотношений

$$\sigma_{0c} / \sigma_{0w} \ll c/a \ll 1 \quad (7)$$

удельная электропроводность угля, содержащего только влагонасыщенные трещины, оказывается равной

$$\sigma_{02} = \sigma_{0c} (1 + 32\nu/9), \quad (8)$$

где вместо ν в нашем случае следует подставить величину ν_w , т.е.

$$\sigma_{02} = \sigma_{0c} (1 + 32\nu_w/9). \quad (9)$$

Тогда с учетом выражений (6) и (9) результирующее влияние как сухих, так и влагонасыщенных трещин приводит к следующему выражению для статической электропроводности:

$$\sigma_0 = \sigma_{0c} [1 + (8/9)(5k - 1)v]. \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), наличие влаги в трещинах при прочих равных условиях оказывает более существенное влияние на электропроводность угля. Поэтому влажный уголь скорее всего будет иметь более высокую электропроводность, чем сухой. Тогда с учетом выражения (10) полное эффективное сопротивление всего образца на постоянном токе можно представить в виде

$$R_{\text{eff}} = \frac{d}{\sigma_{0c} S [1 + (8/9)(5k - 1)v]} = \frac{R_0}{1 + (8/9)(5k - 1)v}, \quad (11)$$

где R_0 – статическое сопротивление угольной матрицы, не содержащей трещин. Из (11) следует, что влажный уголь, как правило, будет иметь меньшее сопротивление, чем сухой.

3. Влияние трещин на импеданс угля на переменном токе

Изучение электрофизических характеристик угля методами импедансной спектроскопии предполагает наложение на образец угля квазистационарного переменного напряжения гармонического вида

$$\tilde{U}(t) = U_m \cos \omega t, \quad (12)$$

где U_m – амплитуда напряжения, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, rad/s. Частотный диапазон измерений Δf обычно принадлежит интервалу 1 Hz–1 MHz.

Чтобы учесть влияние газонаполненных (сухих) трещин на переменное напряжение, заметим, что в этом случае вследствие поляризационных явлений они будут представлять собой сеть случайно соединенных электрических конденсаторов, проводящих переменный электрический ток. Этот эффект рассмотрим 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 [5]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\sigma_0 f}}, \quad (13)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м – магнитная проницаемость вакуума, σ_0 – статическая удельная электропроводность угля, f – частота, на которой проводятся импедансные измерения. Электропроводность угля зависит от его марки, влажности и ряда других факторов. Для типичных значений электропроводности углей средней стадии метаморфизма можно принять значение $\sigma_0 \sim 10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ [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.

Если предположить, что образец угля не обладает заметной индуктивностью ($L = 0$), то эквивалентная электрическая схема замещения в данном случае может быть представлена параллельной RC-цепью (рис. 1), где R_{eff} – эффективное активное сопротивление образца на постоянном токе, определяемое выражением (11), C_{eff} – эффективная емкость всех хаотически ориентированных сухих трещин образца. Емкостью влажных трещин можно пренебречь. Из закона Ома для участка цепи с переменным напряжением (12) можно выразить комплексное сопротивление эквивалентной электрической схемы замещения, т.е. эффективный импеданс исследуемого угольного образца:

$$\underline{Z}_{\text{eff}} = \underline{U} / \underline{I}, \quad (14)$$

где \underline{U} – переменное напряжение, приложенное к образцу, \underline{I} – переменный ток, протекающий в цепи. Импеданс $\underline{Z}_{\text{eff}}$ параллельной RC-цепи (рис. 1) – величина, обратная эффективной комплексной проводимости (адмиттансу) $\underline{Y}_{\text{eff}}$, поэтому он выражается соотношением

$$\underline{Z}_{\text{eff}} = \frac{1}{\underline{Y}_{\text{eff}}} = \frac{1}{1/R_{\text{eff}} + i\omega C_{\text{eff}}} = \frac{R_{\text{eff}}}{1 + i\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}}}. \quad (15)$$

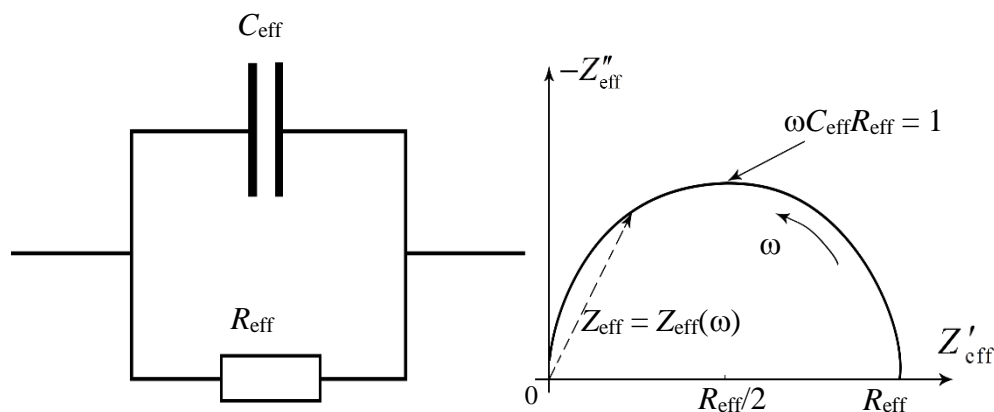


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения угольного образца, содержащего трещины

Рис. 2. Диаграмма Найквиста (годограф импеданса) влажного угольного образца, содержащего систему случайно ориентированных трещин

Выделяя действительную и мнимую части эффективного импеданса, получаем

$$\underline{Z}_{\text{eff}} = Z'_{\text{eff}} + iZ''_{\text{eff}}, \quad (16)$$

где

$$Z'_{\text{eff}} = \frac{R_{\text{eff}}}{1 + (\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}})^2}, \quad Z''_{\text{eff}} = \frac{-\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}}^2}{1 + (\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}})^2}. \quad (17)$$

Выражения (16) и (17) дают частотные зависимости действительной и мнимой частей импеданса угольного образца. Зная их, можно найти частотную зависимость тангенса угла потерь

$$\text{tg} \delta = Z''_{\text{eff}} / Z'_{\text{eff}} = -\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}}, \quad (18)$$

а также построить диаграмму Найквиста (годограф импеданса) угольного образца. Из выражений (17) следует связь

$$Z''_{\text{eff}} = -\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}} Z'_{\text{eff}}. \quad (19)$$

Используя выражения (17) и (19), можно показать, что годограф импеданса описывается уравнением

$$(Z'_{\text{eff}} - R_{\text{eff}}/2)^2 + (Z''_{\text{eff}})^2 = (R_{\text{eff}}/2)^2, \quad (20)$$

которое представляет собой уравнение окружности в координатах $Z'_{\text{eff}} - Z''_{\text{eff}}$. Физический смысл имеет только верхняя часть полуокружности, показанная на рис. 2 (годограф импеданса). Ее радиус равен $R_{\text{eff}}/2$, а центр расположен на оси Z'_{eff} на расстоянии $R_{\text{eff}}/2$ от начала координат. Если частота переменного тока ω растет (в пределе $\omega \rightarrow \infty$), то импеданс параллельной RC -цепи (см. рис. 1) стремится к нулю, т.е. емкость C_{eff} шунтирует резистор R_{eff} . При нулевой частоте ($\omega = 0$) емкостное сопротивление C_{eff} становится бесконечно большим, т.е. весь ток протекает через резистор, и соответственно $Z_{\text{eff}} \approx Z'_{\text{eff}} \approx R_{\text{eff}}$. Согласно (16), (17) имеем

$$\underline{Z}_{\text{eff}}^{\infty} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \underline{Z}_{\text{eff}}(\omega) = 0, \quad \underline{Z}_{\text{eff}}^0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} \underline{Z}_{\text{eff}}(\omega) = R_{\text{eff}}. \quad (21)$$

Чтобы воспользоваться полученными выражениями для импеданса (16), (17), необходимо найти эффективную емкость образца C_{eff} , которая будет функцией коэффициента трещиноватости v_g .

Поскольку мы предположили, что трещины имеют форму сплюснутого эллипсоида вращения с полярной полуосью c и радиусом экватора a , то легко показать, что каждая трещина, заполненная газообразным флюидом, обладает электрической емкостью

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0 a^2}{c} \approx \frac{\pi \epsilon_0 a^2}{c}, \quad (22)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная вакуума.

Рассмотрим отдельную изолированную газонаполненную трещину, находящуюся внутри проводящей угольной матрицы. Пусть напряженность \mathbf{E} переменного электрического поля и вызванная ею плотность тока \mathbf{j} в образце

направлены вдоль некоторой оси Oz (рис. 3). Если трещина ориентирована произвольным образом по отношению к направлению напряженности электрического поля \mathbf{E} , т.е. вектор нормали \mathbf{n} к плоскости трещины составляет угол θ с осью Oz , то ток смещения внутри трещины будет создаваться проекцией напряженности электрического поля, ортогональной плоскости трещины, т.е. $\mathbf{E}_\perp \parallel \mathbf{n}$, причем $E_\perp = E \cos \theta$. Проекция же электрического поля, параллельная плоскости трещины, т.е. $\mathbf{E}_\parallel \perp \mathbf{n}$, будет вызывать только токи проводимости, обтекающие трещину, которые были учтены нами в предыдущем разделе при рассмотрении сопротивления угля на постоянном токе.

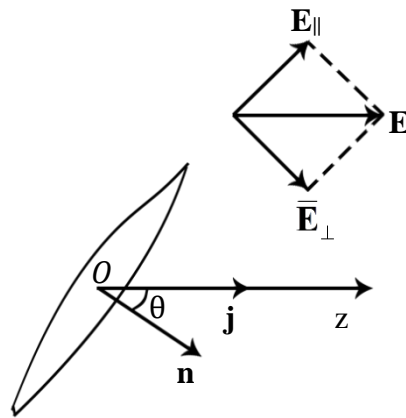


Рис. 3. Ориентация произвольной трещины относительно электрического поля

Найдем эффективную емкость, создаваемую всей совокупностью произвольно ориентированных трещин образца. Если предположить, что трещины являются примерно одинаковыми, имеющими емкость, равную C_0 , 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 трещин оказывается равной

$$C_{\parallel} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cr}}^{(d)}} C_0(\theta_i, \varphi_i) = C_0 \int_0^{2\pi} d\varphi \sum_{i=1}^{N_{\text{cr}}^{(d)}} \cos \theta_i = 2\pi C_0 \sum_{i=1}^{N_{\text{cr}}^{(d)}} \cos \theta_i. \quad (23)$$

Так как число сухих трещин в образце достаточно велико $N_{\text{cr}}^{(d)} \gg 1$, дискретную сумму в (23) можно заменить интегралом. С учетом симметрии трещин относительно плоскости их экватора из (23) получаем

$$C_{\parallel} = 4\pi C_0 (N_{\text{cr}}^{(d)})^{2/3} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta d\theta = 8\pi C_0 (N_{\text{cr}}^{(d)})^{2/3} = 8\pi(1-k)\nu^{1/3} C_0 \frac{V^{1/3}}{\nu_0^{1/3}}, \quad (24)$$

где ν – коэффициент трещиноватости угля, k – доля трещин, наполненных влагой, ν_0 – объем одной трещины, $V = Sd$ – полный объем образца. Чтобы определить полную эффективную емкость образца, следует найти общую емкость всех слоев, соединенных последовательно. С учетом статистической однородности образца емкости всех этих слоев можно считать одинаковыми и равными $C_{||}$. Тогда результирующая эффективная емкость образца оказывается равной

$$C_{\text{eff}} = (C_{||} / N_{\text{cr}}^{1/3}) = 8\pi(1-k)C_0 N_{\text{cr}}^{1/3} = 8\pi(1-k)C_0 \nu^{1/3} (V / \nu_0)^{1/3}. \quad (25)$$

Чтобы получить импеданс на переменном токе влагонасыщенного угля, содержащего трещины, следует выражение (25) подставить в формулы (17). Используя выражения (17), строим годограф импеданса угольного образца. Как известно, для частоты ω_m , отвечающей максимуму годографа (рис. 2), выполняется соотношение

$$2\pi f_m C_{\text{eff}}(\nu) R_{\text{eff}}(\nu) = 1. \quad (26)$$

Подставляя в уравнение (26) выражения (11) и (25), получаем неявное выражение для нахождения коэффициента трещиноватости исследуемого угольного образца

$$\frac{16\pi^2 (1-k) \nu^{1/3} f_m C_0 R_0 (V / \nu_0)^{1/3}}{1 + (8/9)(5k-1)\nu} = 1. \quad (27)$$

Отсюда следует, что коэффициент трещиноватости ν выражается соотношением

$$\nu = \frac{1}{16^3 \pi^6 (1-k)^3 f_m^3 C_0^3 R_0^3 V / \nu_0 - 8/3(5k-1)}. \quad (28)$$

Для численной оценки коэффициента ν необходимо знать параметры k, f_m, C_0, R_0 . Доля трещин, заполненных влагой, k обычно определяется открытой трещиноватостью (пористостью) образца и составляет 0.6–0.7. Частота f_m , отвечающая максимуму годографа, находится методами импедансной спектроскопии. Величину активного сопротивления угольной матрицы R_0 можно взять из эксперимента, измеряя статическое сопротивление $R_s(p_{\text{max}})$ высушенного образца угля в условиях высокого гидростатического давления вплоть до нескольких гигапаскалей, когда пористость и трещиноватость угля практически подавлены. Величину электрической емкости отдельной трещины C_0 можно рассчитать, используя формулу (22). Тогда получим $C_0 \approx 2.8 \cdot 10^{-13}$ Ф. Объем ν_0 изолированной трещины находим, используя формулу для объема эллипсоида вращения

$$\nu_0 = \frac{4}{3} \pi a^2 c \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^3. \quad (29)$$

Подстановка в формулу (28) этих значений физических величин, а также найденных из эксперимента величин f_m и R_0 дает возможность оценить численное значение коэффициента трещиноватости угля υ , которое оказывается приблизительно равным 0.2, или 20%. Если же известен коэффициент υ , то формула (28) позволяет найти величину k , т.е. долю трещин, заполненных влагой.

4. Заключение

Развитая выше теория позволяет выразить через коэффициент трещиноватости как статическое сопротивление угольного образца, так и его комплексное сопротивление (импеданс). Используя развитую теорию для расчета комплексного импеданса и проводя импедансные измерения, можно найти коэффициент трещиноватости ископаемого угля, содержащего влагу. Для этого необходимо на основе измерений действительной и мнимой частей импеданса построить диаграмму Найквиста (годограф импеданса) исследуемого образца и определить частоту f_m переменного напряжения, отвечающую максимуму годографа. Кроме того, необходимо измерить статическое сопротивление обезвоженного угольного образца при высоком гидростатическом давлении ($p \geq 1$ ГПа). Зная долю трещин, заполненных влагой, k и рассчитав электрическую емкость, создаваемую изолированной трещиной C_0 , можно по формуле (28) найти коэффициент трещиноватости ископаемого угля. Проведенная нами численная оценка коэффициента трещиноватости υ угля дает вполне разумную его величину.

1. Э.П. Фельдман, Е.А. Винник, Я.И. Грановский, Н.А. Калугина, Физико-технические проблемы горного производства. Сборник научных трудов, ИФГП НАН Украины, вып. 13, 39 (2010).
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. С.В. Хорьков, Письма в ЖТФ **31**, вып. 10, 35 (2005).
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика, Т.8. Электродинамика сплошных сред, Наука, Москва (1982).

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

IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF FOSSIL COAL INCLUDING CRACKS. II. THE MOISTURE SATURATED SAMPLE

The influence of the moist coal cracking on the complex resistance (impedance) is studied theoretically with using the model of effective medium. It is shown that the cracks with the volume moisture contained promote to increasing of the coal dc conductance. At the same

time, dry (gas-filled) cracks render the influence of two kinds: on the one hand, they obstruct the passage of direct current by producing the additional active resistance; on the other hand, they play the role of ac capacitors, by passing the displacement currents due to the polarization effects. In the model of randomly oriented cracks, the contribution of the cracks to the imaginary part of the ac impedance on the sample is found. Subject to aforesaid, the analytical expressions for the complex impedance of a water-saturated coal and the tangent of loss angle are obtained. It is shown that using the Nyquist diagram, one can obtain a simple equation for finding the coefficient of coal cracking. The solving of this equation allows an evident expression for the cracking coefficient through the characteristics of coal measured by the methods of impedance spectroscopy. The evaluation of the cracking coefficient for coals of an average metamorphism stage is carried out.

Keywords: coal cracking, impedance spectroscopy, equivalent electric scheme, effective impedance, moist sample, effective capacity, Nyquist diagram, frequency dependences of coal impedance

Fig. 1. The equivalent electric chart of substitution for coal example containing cracks

Fig. 2. The Nyquist diagram (the hodograph of impedance) for the moist coal sample containing the system of randomly oriented cracks

Fig. 3. The orientation of an arbitrary crack with respect to the electric field