

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

Л.И. Стефанович, Э.П. Фельдман

ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАК НЕИНВАЗИВНЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Статья поступила в редакцию 14 октября 2016 года

Теоретически проанализирована принципиальная возможность использования методов импедансной спектроскопии (ИС) для определения степени трещиноватости ископаемого угля непосредственно внутри забоя в процессе выемки угля с учетом внутрипластового давления газообразных флюидов, заполняющих полости трещин. С этой целью рассмотрен угольный пласт горизонтального залегания, содержащий систему параллельных трещин. Исследована ситуация, когда после быстрого сброса механической нагрузки имеет место эволюция магистральных трещин, которая происходит в два этапа. Выведено аналитическое выражение для коэффициента трещиноватости угля, связывающее его с эффективными электрофизическими характеристиками, которые могут быть найдены методами ИС. Проведена оценка коэффициента реальной трещиноватости газонасыщенного угольного пласта непосредственно в забое. Показано, что значение коэффициента в этих условиях в несколько раз превышает его величину, измеренную на лабораторных образцах угля.

Ключевые слова: газонасыщенный угольный пласт, импедансная спектроскопия, годограф импеданса, трещиноватость, магистральная трещина, кривая страгивания, внутрипластовое давление, газообразные флюиды

Теоретично проаналізовано принципову можливість використання методів імпедансної спектроскопії (ИС) щодо визначення ступеня тріщинуватості вугільного вугілля безпосередньо всередині забою в процесі виїмки вугілля з урахуванням внутрішньопластового тиску газоподібних флюїдів, що заповнюють порожнини тріщин. З цією метою розглянуто вугільний пласт горизонтального залягання, що містить систему паралельних тріщин. Досліджено ситуацію, коли після швидкого скидання механічного навантаження має місце еволюція магистральних тріщин, яка відбувається у два етапи. Виведено аналітичний вираз для коефіцієнта тріщинуватості вугілля, що пов'язує його з ефективними електрофізичними характеристиками, які можуть бути знайдені методами ИС. Проведено оцінку коефіцієнта реальної тріщинуватості газонасиченого вугільного пласта безпосередньо у забої. Показано, що значення коефіцієнта в цих умовах у декілька разів перевищує його величину, виміряну на лабораторних зразках вугілля.

Ключові слова: газонасичений вугільний пласт, імпедансна спектроскопія, годограф імпедансу, тріщинуватість, магістральна тріщина, крива зрушування, внутрішньопластовий тиск, газоподібні флюїди

Введение

Среди проблем геомеханики и горного производства особое место занимает проблема внезапных выбросов угля, породы и газа при отработке газонасыщенных угольных пластов. Она оказывается особенно актуальной с точки зрения обеспечения безопасной работы горняков. Несмотря на то, что данная проблема многофакторная, анализ и обработка статистических данных по выбросам [1,2] позволили выявить наиболее важные факторы, влияющие на подготовку и развитие внезапного выброса. В результате выяснилось, что основными и наиболее существенными факторами являются горное давление со стороны горных пород, окружающих угольный пласт, и внутрипластовое давление газов [3,4]. При определенных условиях под их воздействием имеющиеся в угольном пласте трещины начинают эволюционировать, т.е. расти как в продольном, так и в поперечном направлениях, что в ряде случаев приводит к быстрому разрушению краевого участка пласта.

Подобные представления развивали и уточняли многие исследователи [5,6]. Особенно выделяются представления школы Христиановича [7,8] о послойном разрушении призабойной части пласта.

Ранее в работе [9] нами был предложен способ определения трещиноватости угля в лабораторных условиях с использованием методов ИС. Однако на практике оказывается более важным измерить трещиноватость в призабойной части угольного пласта в условиях, когда в результате проведения горных работ произошло достаточно быстрое снятие внешней нагрузки, а дегазация угля как результат фильтрационных процессов еще не успела произойти. Опираясь на наши исследования [9], можно предположить, что изменение объема и формы трещин не только приводит к изменению сопротивления угля на постоянном токе, но и оказывает влияние на комплексное сопротивление (импеданс) угля при воздействии на него переменным электрическим напряжением. Тогда можно, используя электрофизические методы, неинвазивным способом определить степень трещиноватости ископаемого угля непосредственно внутри забоя в процессе выемки угля.

В данной работе покажем, как, применяя методы ИС, можно оценить реальную трещиноватость угля внутри забоя с учетом внутрипластового давления газообразных флюидов, заполняющих полости трещин.

1. Двухстадийный процесс эволюции магистральных трещин

Рассмотрим основной вид пустот, имеющих в угле, – это различного рода трещины, которые могут как располагаться хаотически, так и иметь определенную ориентацию. Заметим, что трещины, содержащиеся в нетронутом угольном пласте, с одной стороны, находятся под воздействием меха-

нических напряжений, обусловленных горным давлением σ_m , а с другой – испытывают внутрипластовое давление газа P_0 , содержащегося в полости трещин (рис. 1). Поскольку горное давление σ_m , как правило, в несколько раз превышает величину P_0 , первоначальное состояние трещин является «задавленным» по сравнению с их механически равновесным состоянием. Находясь в этом состоянии, трещины не могут развиваться в том смысле, что их размер (длина) и зияние (раскрытие) не изменяют своих значений со временем. Измерение трещиноватости угольного пласта в таком состоянии весьма проблематично, да и не представляет практического интереса.

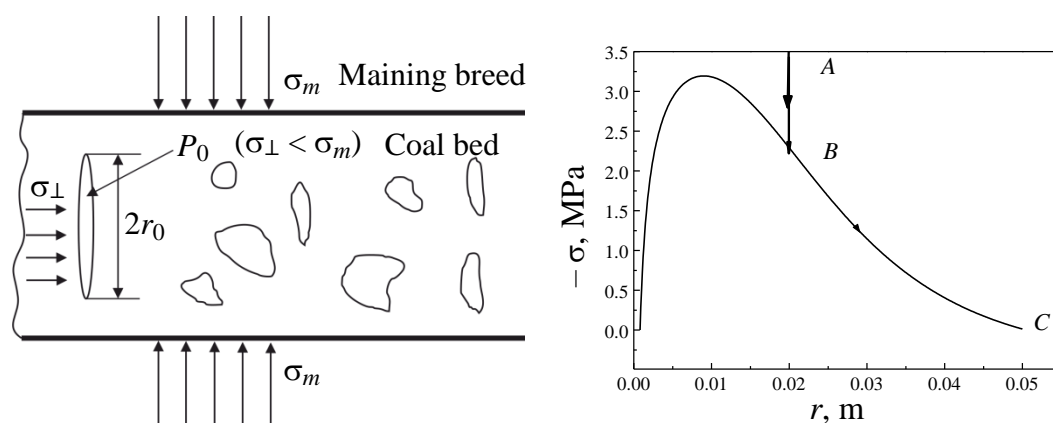


Рис. 1. Распределение напряжений в угольном пласте: P_0 – внутрипластовое давление газов в полости трещины, σ_m – горное давление, σ_{\perp} – поперечная составляющая горного давления

Рис. 2. Двухстадийный процесс эволюции трещины: этап AB – адиабатическое увеличение зияния трещины, этап BC – плавный рост объема трещины в целом

В работе [9] нами был предложен способ определения трещиноватости угля в лабораторных условиях, т.е. когда угольный образец вынут на поверхность и подвергнут дегазации. Здесь же мы выведем соотношения, связывающие трещиноватость угля с известными электрофизическими характеристиками угля и позволяющие методами ИС установить коэффициент трещиноватости угля в условиях забоя.

Для определенности рассмотрим угольный пласт горизонтального залегания. При его отработке действующее на него механическое напряжение перестает быть гидростатическим. Напряжения, продольные к обнаженной поверхности пласта, σ_{\parallel} остаются практически неизменными, а поперечные σ_{\perp} почти исчезают, т.е. имеет место разгрузка пласта от этой компоненты напряжений. Если в угольном пласте имеются трещины, плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности (рис. 1), то после снятия внешней нагрузки эти трещины начинают расти. В результате может начаться процесс разрушения угля за счет развития трещин вышеуказанной ориентации. Трещины иной ориентации остаются по-прежнему «задавленными»

сжимающим их горным давлением. Если предположить, что в состоянии механического равновесия трещины имеют форму сильно сплюснутого сфероида с радиусом экватора $r_0 \sim 10^{-2}$ м и полярной полуосью $\delta_0 \sim 10^{-4}$ м (полуоткрытие трещины), то объем внутренней полости трещины определяется объемом исходной полости и действующим напряжением на ее берегах. Упругие характеристики угля будем принимать, исходя из соображений, что ископаемый уголь с достаточной степенью точности можно считать упругоизотропной средой. Решение классической задачи теории упругости дает для объема трещины следующее выражение [10]:

$$V = V_e + \frac{16\pi(1-\nu^2)Tr_0^3}{3E}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга исследуемого угля, ν – коэффициент Пуассона, V_e – исходный (равновесный) объем трещины в отсутствие механических напряжений на ее берегах ($T = 0$), который определяется выражением

$$V_0 \equiv V_e = \frac{4}{3}\pi r_0^2 c_0. \quad (2)$$

В нетронутом угольном пласте напряжение T , действующее на берегах трещины, состоит из двух слагаемых: сжимающего напряжения P_m (горное давление) и внутрипластового давления газа P_0 , т.е. $T = P_m + P_0 = -|P_m| + P_0$ (так как $P_m < 0$). Состояние механического равновесия трещины реализуется в процессе разгрузки угольного пласта в момент, когда величина поперечного механического напряжения $|\sigma_{\perp}|$ сравнивается с внутрипластовым давлением газа P_0 . Тогда механическое напряжение T на берегах трещины обращается в нуль, и объем полости трещины сводится к равновесному, описываемому выражением (2). Это состояние угля (и трещины) естественно выбрать в качестве начального, так как именно оно реализуется в лабораторных условиях после полной дегазации угля.

При приложении к дискообразной трещине однородного поля напряжений в центральном сечении она принимает форму эллипса. Известно, что на первом этапе силы сцепления, действующие между ее берегами, особенно на ее заостренных концах, препятствуют распространению трещины, т.е. увеличению ее радиуса. Иными словами, на данном этапе увеличение объема трещины идет только за счет увеличения ее зияния, т.е. трещина как бы разбухает. Ее распространение начинается тогда, когда результирующее напряжение T , действующее на берегах трещины за счет давления наполняющих ее газов, достигнет (или превысит) некоторой предельной величины $T_c^{(1)} = P_B - |P_c|$, где P_B – давление в точке B (рис. 2), P_c – предельное поперечное критическое напряжение. Таким образом, условие начала роста (распространения) трещины следует из соотношения Гриффитса [11]:

$$T_c^{(1)} = \gamma, \quad (3)$$

где $\gamma = K/\sqrt{2r_0}$ (K – модуль сцепления угля, r_0 – начальный радиус трещины, отвечающий условию механического равновесия). До тех пор, пока трещина не начнет распространяться (на первом этапе), газ внутри нее расширяется. Характер процесса расширения газа зависит от скорости сброса внешней нагрузки σ_{\perp} . Если сброс происходит взрывным способом, т.е. мгновенно, то для поведения газа на данном этапе имеем адиабатический закон

$$PV^{\kappa} = P_0V_0^{\kappa}, \quad (4)$$

где P_0, V_0 – начальные, а P, V – текущие значения давления газа и объема трещины соответственно; κ – показатель адиабаты газа. Для удобства дальнейшего анализа поведения трещины построим кривую устойчивости (страгивания) трещины. Используя выражение (1) для изменения объема трещины, нагруженной по берегам однородным напряжением, из (3) и (4) находим значение критического напряжения P_c , при котором начинается рост трещины:

$$P_c = \frac{K}{\sqrt{2r}} - \frac{P_0}{\left[1 + (4\pi\beta/3V_0)r^{5/2}\right]^{\kappa}}, \quad (5)$$

где $\beta = 2\sqrt{2}(1-v^2)(K/\pi E)$. Если выражение (5) рассматривать как функцию радиуса трещины, то в координатах $(-\sigma)-r$ получаем так называемую кривую страгивания для трещин, имеющих начальный объем V_0 (рис. 2). Эта кривая отвечает быстрой разгрузке угольного пласта, т.е. адиабатическому расширению газа внутри полости трещины. Предполагается, что полость трещины заполнена метаном. Чтобы получить равновесный объем трещины, полагаем в выражении (2) $r_0 = 10^{-2}$ м; $\delta_0 = r_0/\xi$ (где $\xi = 100$). Тогда получаем $V_0 \approx 4.2 \cdot 10^{-8}$ м³.

Для механических характеристик угля в (5) примем следующие значения: $E = 2.5$ ГПа, $\nu = 0.3$, $K = 2 \cdot 10^5$ Н/м^{3/2}. Внутрипластовое давление газообразных флюидов примем равным $P_0 = 5$ МПа. Причем будем считать, что полости трещин заполнены в основном газом метаном, так что показатель адиабаты $\kappa = 4/3 \approx 1.33$.

С учетом этих значений на основе выражения (5) на рис. 2 изображена кривая страгивания для трещин, имеющих равновесный объем V_0 . Физический смысл имеет только та часть кривой, которая располагается в верхней полуплоскости. Исследование функции (5) на экстремум показывает, что кривая страгивания имеет максимум в некоторой точке r_* . В нашем случае $r_* = 0.009$ м. Полагая $P_c = 0$ в левой части равенства (5), получаем уравнение для нахождения точек пересечения кривой страгивания с осью абсцисс.

Численное решение этого уравнения дает два корня: $r_{\min} \approx 8 \cdot 10^{-4}$ м и $r_{\max} \approx 0.05$ м, которые определяют границы области неустойчивости трещины относительно увеличения ее радиуса (рис. 2). Данная кривая имеет важное значение при исследовании устойчивости трещин относительно их распространения. Она, в частности, показывает, что трещины очень малых и очень больших размеров не могут распространяться.

Опираясь на кривую страгивания, можно выделить четыре группы трещин в зависимости от их начальных радиусов. Трещины, начальный радиус которых $r_0 < r_{\min}$ и $r_0 > r_{\max}$, не будут распространяться даже при полном сбросе внешней нагрузки. В первом случае это связано с тем, что радиус трещины настолько мал, что всегда выполняется условие $T\sqrt{2r_0} < K$. Во втором случае он настолько велик, что при уменьшении внешнего сжимающего напряжения объем трещины согласно (1) увеличивается, а давление газа в ней соответственно уменьшается столь существенно, что также всегда выполняется аналогичное условие ввиду малости T .

Рассмотрим ситуацию, когда трещины расположены достаточно далеко друг от друга, т.е. взаимодействием трещин между собой можно пренебречь. Проследим за эволюцией отдельной трещины, начальный радиус которой $r_0 = 0.02$ м, т.е. лежит в интервале $r_* < r_0 < r_{\max}$. Как уже отмечалось ранее, в качестве начального состояния трещины мы принимаем состояние ее механического равновесия (точка A на рис. 2), когда результирующее напряжение, действующее на берегах трещины, обращается в нуль. При сбросе внешнего механического напряжения давление газов внутри полости трещины приводит к тому, что к ее берегам будет приложено поперечное растягивающее напряжение, стремящееся увеличить объем трещины.

Как уже указывалось ранее, рост трещины на первом этапе идет только за счет увеличения ее зияния при неизменном радиусе ($r_0 = \text{const}$) вплоть до точки B , где начинает выполняться равенство Гриффитса (3). Эволюция трещины при этом изображается отрезком AB , где точка B располагается на кривой страгивания (рис. 2). При этом за счет увеличения зияния трещины объем ее увеличивается ($V_0 \rightarrow V_B$), а полуоткрытие достигает значения $\delta_B = \delta_0 + w_B$, где w_B – приращение полуоткрытия. Давление же газов, распирающих трещину изнутри, уменьшается и становится равным P_B ($P_B < P_0$).

Подобные изменения объема трещин и их формы неизменно приведут к изменению электрофизических свойств угля. Выражения (1), (2) с учетом равенства (3) дают для объема трещины в точке B значение

$$V_B = V_0 + \frac{16\pi(1-\nu^2)r_0^3}{3E} = V_0 \left(1 + \frac{\Delta V_B}{V_0} \right) = V_0 \left(1 + \frac{w_B}{\delta_0} \right), \quad (6)$$

где ΔV_B , w_B – изменения объема трещины и ее полуоткрытия, которые выражаются соотношениями

$$\Delta V_B = \frac{4}{3} \pi \beta r_0^{5/2}, \quad (7)$$

$$w_B = \beta r_0^{1/2}. \quad (8)$$

Поскольку на первом этапе (AB) процесс расширения газа внутри полости трещины происходит быстро (адиабатически), фильтрацией газа внутрь трещины и изнутри ее в открытое пространство забоя можно пренебречь. Тогда давление газа внутри полости трещины в точке B можно найти, используя равенство (4). В результате получим

$$P_B = P_0 \left(1 + \frac{\Delta V_B}{V_0} \right)^{-\kappa} = P_0 \left(1 + \frac{w_B}{\delta_0} \right)^{-\kappa}. \quad (9)$$

Дальнейший процесс эволюции трещины происходит за счет энергии упругой деформации, накопленной в материале на предыдущем этапе при постоянном выполнении условия Гриффитса (3). Этот второй этап эволюции сопровождается как увеличением радиуса трещины ($r_0 \rightarrow r_C$), так и изменением ее полуоткрытия ($\delta_B \rightarrow \delta_C$). При этом, безусловно, изменяется и объем трещины ($V_B \rightarrow V_C$), следствием чего является дополнительное изменение электрофизических свойств угля. При этом радиус трещины в точке C фактически определяется граничной точкой кривой страгивания $r_C = r_{\max}$ и находится численным решением уравнения (5) относительно радиуса трещины при заданном фиксированном значении $P_c = 0$. Итак, фактически остается установить полное полуоткрытие трещины в точке C , которое можно представить в виде

$$\delta_B = \delta_0 + w_B + w_C, \quad (10)$$

где w_B определяется выражением (8), величина же w_C находится аналогично и фактически сводится к замене в выражении (8) радиуса r_0 на r_{\max} , т.е.

$$w_C = \beta r_{\max}^{1/2}. \quad (11)$$

С учетом (8), (10) и (11) конечный объем трещины в точке C можно представить выражением

$$V_f \equiv V_C = \frac{4}{3} \pi r_C^2 \delta_C = \frac{4}{3} \pi r_{\max}^2 \delta_0 \left[1 + \frac{\beta}{\delta_0} (\sqrt{r_0} + \sqrt{r_{\max}}) \right]. \quad (12)$$

2. Связь между трещиноватостью угля и его эффективными электрофизическими характеристиками

Проанализируем, как, используя методы ИС, провести измерения «истинной» трещиноватости газонасыщенного угольного пласта непосредственно в забое. Для этого следует внедрить в угольный пласт два одинаковых плос-

ких электрода известного сечения параллельно груди забоя и подать на них квазистационарное переменное напряжение гармонического вида

$$\tilde{U}(t) = U_m \cos \omega t, \quad (13)$$

где U_m – амплитуда напряжения (на практике $U_m \sim 10^{-2}$ V); $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, rad/s. Диапазон частот Δf , в котором производят измерения, обычно составляет 1 Hz–1 MHz.

Рассмотрим, каким образом трещины, имеющиеся в угле, влияют на его комплексное сопротивление (импеданс). В работах [12,13] было показано, что в случае постоянного напряжения ($U = \text{const}$) газонаполненные трещины не проводят электрический ток и могут создавать лишь дополнительное омическое сопротивление. В случае же переменного напряжения трещины с высоким сопротивлением среды внутри них, работая как электрические конденсаторы, за счет явлений поляризации будут проводить электрические токи смещения. При таких частотах, которые используются в импедансных измерениях углей, скин-эффектом можно пренебречь [14].

Уголь по своей природе является, вообще говоря, нерегулярной гетерогенной структурой с хаотически ориентированными трещинами и случайно распределенными порами, и потому он в среднем изотропен. В газонасыщенных угольных массивах наиболее выбросоопасными являются пласты с системами трещин, ориентированными параллельно груди забоя. Именно такую ситуацию мы и будем ниже анализировать, считая угольный пласт макроскопически однородной средой, которую можно охарактеризовать набором эффективных параметров, в том числе электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. Несмотря на то, что вышеупомянутые параметры являются лишь интегральными электрофизическими характеристиками материала, используя методы ИС, можно определить такие важные на практике свойства углей, как их трещиноватость и пористость.

Как было показано в [12], при одинаковых значениях пористости и трещиноватости изменение сопротивления угля за счет трещин существенно превосходит сопротивление, обусловленное порами. Поэтому в дальнейшем ограничимся рассмотрением влияния системы случайно расположенных в пространстве (но параллельных между собой) трещин на эффективный импеданс угольного образца с целью выяснения возможности определения коэффициента трещиноватости угольного пласта подобным способом. Если предположить, что образец угля, на котором проводятся импедансные исследования, не обладает заметной индуктивностью ($L = 0$), то эквивалентная электрическая схема замещения в данном случае может быть представлена параллельной RC -цепью (рис. 3). Здесь R_{eff} – эффективное активное сопротивление образца на постоянном токе, зависящее от трещиноватости угля, C_{eff} – эффективная емкость системы параллельно ориентированных трещин, которая также зависит от трещиноватости угля.

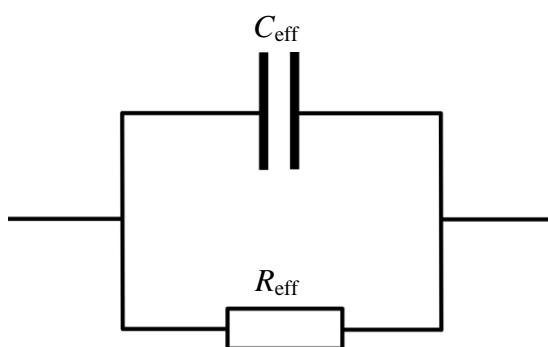


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения для измерения эффективного импеданса угля, содержащего трещины

Измерить зависимости эффективных сопротивления R_{eff} и емкости C_{eff} угля от степени его трещиноватости не представляется возможным. Однако, как будет показано ниже, эти зависимости можно найти теоретически из некоторых модельных представлений. При импедансных исследованиях на переменном токе с помощью компактного импедансного спектрометра измеряют частотные зависимости действительной и мнимой частей эффективного комплексного импеданса угля

$$\underline{Z}_{\text{eff}}(\omega) = Z'_{\text{eff}}(\omega) + iZ''_{\text{eff}}(\omega). \quad (14)$$

Для эквивалентной электрической схемы замещения, представленной на рис. 3, имеем

$$Z'_{\text{eff}}(\omega) = \frac{R_{\text{eff}}}{1 + (\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}})^2}, \quad Z''_{\text{eff}}(\omega) = \frac{-\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}}^2}{1 + (\omega C_{\text{eff}} R_{\text{eff}})^2}. \quad (15)$$

По измеренным частотным зависимостям действительной и мнимой частей импеданса необходимо построить диаграмму Найквиста (годограф) импеданса угля в переменных $(-Z''_{\text{eff}}) - Z'_{\text{eff}}$. В идеальном случае построенная кривая представляет полуокружность, расположенную в первой четверти. На годографе импеданса следует отыскать точку максимума, где выполняется равенство $Z'_{\text{eff}} = |Z''_{\text{eff}}|$.

Как следует из (15), для частоты ω_m , отвечающей максимуму годографа импеданса, будет выполняться соотношение

$$2\pi f_m C_{\text{eff}}(\nu) R_{\text{eff}}(\nu) = 1, \quad (16)$$

где ν – коэффициент трещиноватости исследуемого угля [13]. Трещиноватость горных пород характеризуют либо безразмерным коэффициентом трещиноватости ν , который определяют отношением объема трещин к объему породы, заключающей в себе эти трещины:

$$\nu = V_{\text{cr}}/V \quad (17)$$

(где V_{cr} – полный объем трещин в образце, V – объем образца), либо коэффициентом объемной трещиноватости γ , равным числу трещин в единице

объема горной породы. Эти коэффициенты связаны соотношением

$$\nu = \gamma V_0, \quad (18)$$

где V_0 – средний объем одной трещины. Нашей задачей будет выразить эффективное статическое сопротивление угля через коэффициент его трещиноватости. Как было показано в [14], эффективная статическая электропроводность образца в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, выражается соотношением

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_0}{(1 + 4\nu/3)^2}, \quad (19)$$

где σ_0 – статическая проводимость угольной матрицы. Тогда с учетом (19) эффективное статическое сопротивление в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, может быть выражено через коэффициент трещиноватости угля ν :

$$R_{\text{eff}}(\nu) \approx R_0(1 + 8\nu/3). \quad (20)$$

При получении выражения (20) мы использовали предположение, что для коэффициента трещиноватости обычно выполняется соотношение $\sigma \ll 1$. Следовательно, для расчета эффективного статического сопротивления угольного образца с трещинами необходимо знать его активное сопротивление в отсутствие трещин (сопротивление угольной матрицы), которое определяется выражением

$$R_0 = \frac{\rho_0 d}{S}, \quad (21)$$

где $\rho_0 = \rho(\omega)|_{\omega=0} = \rho(0)$ – статическое удельное сопротивление угольной матрицы, S – площадь измерительных электродов, d – расстояние между электродами (толщина образца). Чтобы определить величины ρ_0 или R_0 , достаточно измерить статическую проводимость образца при высоком гидростатическом давлении $\sigma_s(p_{\text{max}})$, когда трещиноватость угля практически подавлена. При давлении 2 ГПа удельное сопротивление угля уменьшается практически на порядок [15]. Тогда в выражении (21) можно положить $\rho_0 = \rho_s(p_{\text{max}})$ и таким образом рассчитать сопротивление угольной матрицы.

Ранее было указано, что для переменного напряжения (13) газонаполненные трещины в ископаемом угле играют роль емкостей. Следовательно, для всего исследуемого с помощью импедансного спектрометра объема угля как изотропной гетерогенной среды можно ввести полную эффективную электрическую емкость C_{eff} . Выразим ее через емкость отдельной изолированной трещины и коэффициент трещиноватости угля. Если предположить, что все трещины имеют примерно одинаковые размеры и форму сплюснутого сфероида, то после полного снятия с угольного пласта внешней механической

нагрузки емкость одной трещины можно найти по формуле (см. выражение (4) работы [9]):

$$C_f = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0 r_{\max}^2}{\delta_C}, \quad (22)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость газообразного флюида, заполняющего полость трещины ($\epsilon \approx 1$); r_{\max} , δ_C – соответственно радиус и полярная полуось трещины в точке C . При этом предполагается, что электрические поля и токи слабы, т.е. они не создают механических напряжений, которые бы могли заметно влиять на раскрытие трещины.

Выразим теперь эффективную емкость угольного образца через емкость отдельной изолированной трещины C_f . Поскольку всю совокупность трещин, расположенных в слое толщиной, меньшей, чем среднее расстояние между трещинами, можно отождествить с системой конденсаторов, соединенных параллельно, результирующая электрическая емкость такой системы оказывается равной

$$C_{\parallel} = C_f N_{\parallel} = C_f N_{\text{cr}}^{2/3}, \quad (23)$$

где N_{cr} – полное число трещин в исследуемом образце угля. Для нахождения полной эффективной емкости образца необходимо определить общую емкость всех слоев, соединенных последовательно. С учетом статистической пространственной однородности образца емкости всех этих слоев можно считать одинаковыми и равными C_{\parallel} . Тогда результирующая эффективная емкость образца оказывается равной

$$C_{\text{eff}}(\nu) = C_f (N_{\parallel} / N_{\perp}) = C_f N_{\text{cr}}^{1/3} = C_f \nu^{1/3} (V/V_f)^{1/3}, \quad (24)$$

где V_f – объем трещины после снятия механической нагрузки с угольного пласта, $V = Sd$ – объем угля, заключенный между электродами импедансного спектрометра. Подставляя в равенство (16) выражения (20) и (24) для эффективного активного сопротивления и эффективной емкости угля соответственно, получаем иррациональное уравнение для нахождения коэффициента трещиноватости угля ν :

$$2\pi f_m R_0 (1 + 8\nu/3) C_f \nu^{1/3} (V/V_f)^{1/3} = 1. \quad (25)$$

Возводя в куб обе стороны равенства (25) и учитывая, что $\nu \ll 1$, получаем квадратное уравнение

$$8\nu^2 + \nu - A = 0, \quad (26)$$

где константа A определяется соотношением

$$A = \frac{V_f}{8\pi^3 f_m^3 R_s^3(p_{\max}) C_f^3 V}. \quad (27)$$

Физический смысл имеет только положительное решение этого уравнения:

$$\nu = 0.5 \left(\sqrt{0.125^2 + A/2} - 0.125 \right). \quad (28)$$

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 [15]. Чтобы оценить константу A , необходимо предварительно найти объем трещины V_f и оценить емкость одной изолированной трещины C_f на правой границе кривой страгивания. При этом нам необходимо рассчитать величину β , введенную ранее, и полярную полуось δ_C трещины на правой границе кривой страгивания. С учетом принятых нами механических характеристик угля имеем $\beta \approx 0.65 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{1/2}$ и $\delta_C \approx 1.23 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Подставляя в выражение (12) эти значения, а также найденное ранее из кривой страгивания значение $r_C \equiv r_{\max} \approx 0.05 \text{ м}$, получаем объем распространившейся трещины $V_f \approx 1.29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Емкость же этой трещины согласно (22) оказывается равной $C_f \approx 5.39 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$.

Пусть электроды импедансного спектрометра имеют вид двух квадратных пластин площадью $S = 25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, расстояние между которыми $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для типичных значений удельной электропроводности угля средней стадии метаморфизма можно принять значение $10^{-6} \Omega^{-1}$ [16]. При этом измеренное при высоком гидростатическом давлении активное сопротивление образца $R_s(p_{\max}) = 1.6 \cdot 10^5 \Omega$. Частота f_m , отвечающая максимуму годографа импеданса, находится после измерений действительной и мнимой частей импеданса угля с помощью импедансного спектрометра. Предположим, что ее значение оказалось $f_m \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$. Тогда по формуле (27) получаем $A \approx 0.83$. Теперь легко найти «истинное» значение коэффициента трещиноватости угля ν , воспользовавшись уравнением (28). Получаем коэффициент трещиноватости угля в условиях забоя $\nu \approx 0.328 \approx 32.8\%$.

Для оценки трещиноватости лабораторного образца заметим, что исходная емкость трещины $C_0 \approx 1.12 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$, а исходный объем трещины $V_0 \approx 1.65 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$. После измерений действительной и мнимой частей импеданса и построения его годографа находим частоту, отвечающую максимуму годографа. В лабораторном образце она оказывается несколько большей, чем в забое, так как в забое эффективная емкость, создаваемая трещинами, имеет меньшую величину. Допустим, что $f_m^0 \sim 10^4 \text{ Hz}$. Тогда аналогично выражению (25) получаем соотношение

$$\omega_m^0 C_{\text{eff}}^0(\nu_0) R_{\text{eff}}^0(\nu_0) = 1. \quad (29)$$

Отсюда с учетом малости величины ν_0 ($\nu_0 \ll 1$) находим приближенное значение трещиноватости угля в лабораторных условиях

$$\nu_0 \approx A_0 = \frac{V_0}{8\pi^3 f_{0m}^3 R_s^3(p_{\text{max}}) C_0^3 V}. \quad (30)$$

Подстановка в формулу (30) соответствующих числовых значений величин дает $\nu_0 \approx 0.048 \approx 4.8\%$. Сравнивая значения коэффициентов трещиноватости ν и ν_0 , получаем $k = \nu/\nu_0 \approx 6.8$, т.е. трещиноватость угля внутри забоя в несколько раз выше, чем измеренная в лабораторных условиях. Причиной этого является наличие внутрипластового давления газообразных флюидов в нетронутом угольном пласте, которое приводит к «разбуханию» и распространению магистральных трещин в процессе проведения горных работ.

Заключение

Нами была поставлена задача разработать способ неинвазивного определения степени трещиноватости ископаемого угля непосредственно внутри забоя в процессе выемки угля с учетом внутрипластового давления газообразных флюидов, заполняющих полости трещин.

Был рассмотрен угольный пласт горизонтального залегания, содержащий систему параллельных трещин. Проанализирована ситуация, когда в результате быстрого снятия механической нагрузки эволюция магистральных трещин осуществляется в два этапа. Поскольку процесс расширения трещин происходит быстро, фильтрацией газа внутрь трещины и в свободное пространство забоя можно пренебречь. Выведено аналитическое выражение для коэффициента трещиноватости угля, связывающее его с эффективными электрофизическими характеристиками, которые могут быть найдены методами импедансной спектроскопии. Чтобы воспользоваться полученным выражением, достаточно измерить экспериментально активное сопротивление угольной матрицы на постоянном токе, а также на основе импедансных измерений найти частоту, отвечающую максимуму годографа импеданса угля.

На основе полученных выражений проведена оценка коэффициента реальной трещиноватости в газонасыщенном угольном пласте. Оказалось, что его значение внутри забоя может быть в несколько раз выше, чем в лабораторных условиях.

1. *T.L. Anderson*, Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, CRC Press, London (1995).
2. *A.D. Alexeev*, Physics of Coal and Mining Processes, CRC Press, London (2012).
3. *В.В. Ходот*, Внезапные выбросы угля, породы и газа, Госгортехиздат, Москва (1961).
4. *Г.А. Шевелев*, Динамика выбросов угля, породы и газа, Наукова думка, Киев (1989).

5. Zhenlei Li, Linming Dou, Wu Cai, Guifeng Wang, Jiang He, Siyuan Gong, Yanlu Ding, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. **70**, 192 (2014).
6. S. Wisetsaen, C. Walsri, V. Fuenkajorn, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. **73**, 10 (2015).
7. С.А. Христианович, Избранные работы, Изд-во МФТИ, Москва (2000), кн. 2, с. 121–142.
8. Ю.Ф. Коваленко, Препринт ИПМ АН СССР № 145 (1980).
9. Э.П. Фельдман, Л.И. Стефанович, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов, ФТВД **25**, № 3–4, 122 (2015).
10. И.Н. Снеддон, Преобразование Фурье, ИЛ, Москва (1955).
11. А.А. Griffith, Phil. Trans. of the Royal Soc. of London **A221**, 163 (1921).
12. Э.П. Фельдман, Е.А. Винник. Я.И. Грановский, Н.А. Калугина, Физико-технические проблемы горного производства: сб. научн. трудов, ИФГП НАН Украины, Донецк, (2011), вып. 14, с. 54.
13. И.И. Аммосов, И.В. Еремин, Трещиноватость углей, Наука, Москва (1961).
14. Р.Л. Салганик, ИФЖ **27**, 1069 (1974).
15. P.I. Polyakov, V.V. Slyusarev, in: Book of Abstracts of Int. Conf. of Functional Materials (ICFM-2007), Ukraine, Partenit, October 1–6, 2007, p. 284.
16. Геологический словарь, К.Н. Паффегольц (ред.), Недра, Москва (1978).

L.I. Stefanovich, E.P. Feldman

IMPEDANCE SPECTROSCOPY AS A NON-INVASIVE WAY OF MEASURING OF CRACKING OF GAS-BEARING COAL SEAMS

A principle possibility is analyzed theoretically, whether it is possible to apply the methods of impedance spectroscopy (IS) to determination of the cracking degree of fossil coal directly in a mine face in course of coal excavation with taking into account of intraformational pressure of gaseous fluids that fill the cavities of cracks. A coal layer of the horizontal bedding is considered, that contains the system of parallel cracks, for this purpose. A situation is investigational, when two-stage evolution of main cracks takes place after fast mechanical load loss. Analytical expression of the coefficient of coal cracking is derived that binds it with effective electrophysical characteristics to be found by the methods of IS. The estimation of the coefficient of real cracking of a gas saturated coal layer is performed directly in a mine face. It is shown that in these conditions, the value exceeds the coefficient of cracking of the laboratory examples of coal by several times.

Keywords: gas-saturated coal layer, impedance spectroscopy, hodograph of impedance, cracking, main crack, curve of tearing away, intraformational pressure, gaseous fluids

Fig. 1. Tension distribution in a coal bed: P_0 – intraformational pressure of gases in the cavity of the crack, σ_m – overburden pressure, σ_{\perp} – transversal component of overburden pressure

Fig. 2. Two-stage process of crack evolution. Stage *AB* is an adiabatic increase of crack gaping, *BC* stage is a smooth growth of volume of crack as a whole.

Fig. 3. Equivalent electric scheme of substitution for measuring effective impedance of crack-containing coal