

УДК 622.2, 537.31

Л.И. Стефанович¹, В.В. Соболев², А.Н. Молчанов¹, Н.В. Билан²,
А.А. Камчатный¹, Е.А. Пронский¹

ПРИМЕНЕНИЕ ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАБОЯ

¹ Институт физики горных процессов НАН Украины,
49600, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а.

² Государственное ВУЗ «НГУ»,
49005 г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19.

Теоретически проанализирована принципиальная возможность, использования методов импедансной спектроскопии 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 три этапа. 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 величину активного сопротивления угольной матрицы на постоянном токе, а также на основе импедансных измерений найти частоту, отвечающую максимуму годографа импеданса угля.

Проведена оценка коэффициента реальной трещиноватости газонасыщенного угольного пласта непосредственно в забое, которая показывает, что его значение в этих условиях в несколько раз превышает коэффициент трещиноватости, измеренный на лабораторных образцах угля.

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

Введение

Как известно, определяющую роль в возникновении явлений неожиданного разрушения углей и горных пород и внезапных выбросов играет работа

расширяющихся газов, заполняющих полости трещин. Поэтому проблема внезапных выбросов угля, породы и газа при отработке газонасыщенных угольных пластов занимает особое место среди проблем геомеханики и горного производства. Особенно актуальной она оказывается в связи с обеспечением безопасной работы горняков. Несмотря на то, что данная проблема является многофакторной, анализ и обработка статистических данных по выбросам [1, 2] позволили выявить наиболее важные факторы, влияющие на подготовку и развитие внезапного выброса. В итоге, выяснилось, что большую роль в подготовке и развитии выброса играет рост трещин при совместном воздействии горного и газового давлений [3]. При разгрузке угольного пласта под их воздействием имеющиеся в угольном пласте трещины начинают эволюционировать, т.е. расти как в продольном, так и в поперечном направлении, что в ряде случаев приводит к быстрому разрушению краевого участка пласта.

Подобные представления развивались и уточнялись многими исследователями [4, 5], среди которых особенно выделяются представления научной школы Христиановича [6, 7] о послойном разрушении призабойной части пласта.

Ранее в работе [8] нами был предложен способ определения трещиноватости угля в лабораторных условиях, который базируется на методах импедансной спектроскопии (ИС). Однако на практике оказывается более важным измерить реальную трещиноватость в призабойной части угольного пласта, когда в результате проведения горных работ произошло достаточно быстрое снятие внешней нагрузки, а дегазация угля, как результат фильтрационных процессов, ещё не успела произойти. Опираясь на наши исследования [8], можно предположить, что изменение объема и формы трещин приводит не только к изменению сопротивления угля на постоянном токе, но и оказывает влияние на комплексное сопротивление (импеданс) угля при пропускании через него переменного электрического тока. Следовательно, измеряя электрофизические характеристики угля, можно определить степень его трещиноватости непосредственно внутри забоя.

Целью данной работы является показать, как, используя методы импедансной спектроскопии, можно реально оценить трещиноватость угля внутри забоя с учетом внутрипластового давления газообразных флюидов, заполняющих полости трещин.

1. Процесс эволюции магистральных трещин

Помимо пор и фильтрационных каналов, основной вид пустот, содержащихся в угле – это различного рода трещины, плотность и пространственная ориентация которых зависят от многих факторов. В нетронutom угольном пласте трещины находятся, с одной стороны, под воздействием механических напряжений, обусловленных горным давлением σ_m , а с другой – испытывают внутрипластовое давление газов P_0 , содержащихся в полости тре-

щин (рис. 1). Поскольку горное давление σ_m , как правило, в несколько раз превышает величину газового давления P_0 , то первоначальное состояние трещин является несколько «задавленным», по сравнению с механически равновесным их состоянием. Следовательно, в ненарушенном угольном пласте размер и форма трещин остаются неизменными. Измерение коэффициента трещиноватости угольного пласта в этом состоянии весьма проблематично, да и не представляет практического интереса.

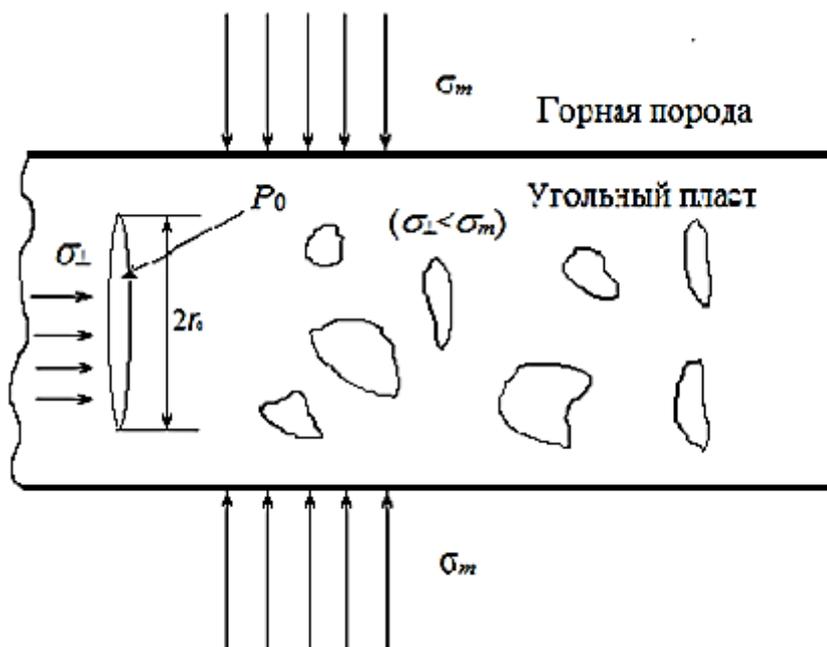


Рис.1. Распределение напряжений в угольном пласте. P_0 - внутрипластовое давление газов в полости трещины, σ_m – горное давление, σ_{\perp} – напряжение бокового распора

Ранее в работе [8] нами уже был предложен способ определения трещиноватости угля в лабораторных условиях, когда образец извлечен на поверхность и подвергнут дегазации. В данном исследовании мы выведем соотношения, связывающие коэффициент трещиноватости угля с известными электрофизическими характеристиками угля, что позволит определить коэффициент трещиноватости угля в условиях забоя, используя методы импедансной спектроскопии.

Для простоты рассмотрим пласт горизонтального залегания. В процессе добычи угля происходит нарушение целостности угольного пласта, так что механическое напряжение, действующее на угольный пласт, становится негидростатическим. Напряжения, продольные к обнаженной поверхности пласта σ_{\parallel} , остаются практически неизменными, а поперечные напряжения σ_{\perp} почти исчезают, т.е. имеет место разгрузка пласта от этой компоненты напряжений. Таким образом, если угольный пласт содержит трещины, плос-

кость залегания которых параллельна груди забоя (рис. 1), то после снятия внешней нагрузки они начнут со временем разрастаться. В результате, за счет неконтролируемого роста трещин вышеуказанной ориентации может начаться процесс разрушения угля в виде выброса газугольной смеси. При этом трещины иной ориентации либо мало меняются, либо остаются по-прежнему «задавленными» сжимающим их горным давлением σ_m .

Для определенности будем предполагать, что в состоянии механического равновесия трещины имеют форму сильно сплюснутого сфероида с радиусом экватора r_0 и полярной полуосью c_0 (полураскрытие трещины). Тогда объем внутренней полости трещины определяется объемом исходной полости и действующим напряжением на её берегах. Упругие характеристики угля мы будем принимать, исходя из соображений, что ископаемый уголь с достаточной степенью точности можно считать упругоизотропной средой. Тогда решение классической задачи теории упругости дает для объема трещины следующее выражение [9]:

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

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 ненарушенном угольном пласте напряжение T , действующее на берегах трещины, состоит из двух слагаемых: сжимающего напряжения σ_m (горное давление) и внутрипластового давления газа P_0 , т.е. $T = \sigma_m + P_0 = P_0 - |\sigma_m|$ (так как $\sigma_m < 0$).

Состояние механического равновесия для трещин реализуется в тот момент, когда величина напряжения бокового распора $|\sigma_{\perp}|$ в процессе разгрузки угольного пласта сравнивается с внутрипластовым давлением газа P_0 . Тогда механическое напряжение T на берегах трещины обращается в нуль и объем полости трещины сводится к равновесному объему, 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. Обратившись к работе [7] (рис. 2), мы видим, что подобное состояние трещины отвечает точке А. Если приложить к дискообразной трещине однородное поле напряжений в центральном сечении, то она примет форму эллипса. Известно, что на первом этапе силы сцепления, действующие между её берегами, особенно на заостренных концах трещины, препятствуют распространению трещины, т.е. увеличению её

радиуса. Следовательно, на этом этапе увеличение объема трещины идёт только за счёт увеличения её зияния, т.е. трещина как бы «разбухает».

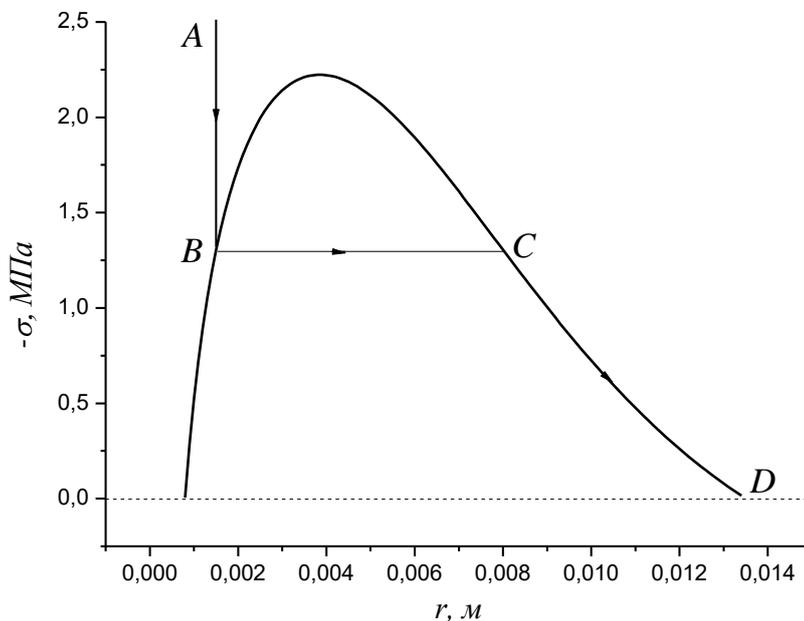


Рис.2. Трёхстадийный процесс эволюции трещины. Кривая страгивания трещины отвечает быстрой разгрузке угольного пласта и соответствует следующим размерам трещины: $r_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $c_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $V_0 = 4.71 \cdot 10^{-10}$ м³. Этап АВ – адиабатическое увеличение зияния трещины, этап ВС – резкое увеличение размера трещины за счет скачкообразного увеличения её радиуса, этап CD – плавный рост объема трещины в целом

Распространение трещины начнется только тогда, когда результирующее напряжение T , действующее на берегах трещины за счет давления газов, наполняющих трещину, превысит некоторую предельную величину $T_{кр}^{(1)} = P_B - |\sigma_m|$, где P_B - давление газов внутри трещины в точке B (т.е. после её разбухания), $T_{кр}^{(1)}$ - предельное поперечное напряжение на кривой страгивания. Таким образом, условие начала распространения трещины следует из соотношения Гриффитса [10]

$$T_{кр}^{(1)} = \gamma. \quad (3)$$

Здесь $\gamma = K/\sqrt{2r_0}$, где K - модуль сцепления угля, r_0 - начальный радиус трещины, отвечающий условию механического равновесия. На первом этапе, т.е. до тех пор, пока трещина не начнет распространяться, газ внутри полости трещины расширяется. Причём характер расширения газа зависит от

скорости уменьшения внешней нагрузки σ_{\perp} . Если этот сброс напряжения происходит достаточно быстро, то теплообмен между газообразным флюидом внутри трещины и угольной матрицей отсутствует. Следовательно, для поведения газа внутри трещины на этом этапе выполняется адиабатический закон

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

где P_0, V_0 начальные, а P, V - текущие значения давления газа и объёма трещины соответственно; κ - показатель адиабаты газа. Для удобства дальнейшего анализа эволюции трещины, следуя [7], построим кривую устойчивости (страгивания) трещины. Используя выражение (1) для изменения объёма трещины, нагруженной по берегам однородным напряжением, из (3) и (4) находим значение критического напряжения $\sigma = \sigma_c$, при котором начинается рост трещины

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

где $\beta = 2\sqrt{2}(1 - \nu^2)(K/\pi E)$. Если выражение (5) рассматривать как функцию радиуса трещины, то в координатах $-\sigma -r$ мы получаем так называемую «кривую страгивания» [7] для трещин, имеющих начальный объём V_0 (рис.2). Чтобы получить равновесный объём трещины мы полагаем в выражении (2) $r_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м; $c_0 = r_0/\xi = 5 \cdot 10^{-5}$ м, где $\xi = 30$, тогда получим $V_0 \approx 4.71 \cdot 10^{-10}$ м. Для механических характеристик угля в (5) примем следующие значения: модуль Юнга $E = 2.5$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, модуль сцепления $K = 2 \cdot 10^5$ Н/м^{3/2}. Внутрипластовое давление газообразных флюидов примем равным $P_0 = 5$ МПа. Будем предполагать, что полости трещин заполнены в основном газом метаном, так что показатель адиабаты в (5) $\kappa = 4/3 \approx 1.33$. С учетом этих значений на основе выражения (5) на рис.2 представлена кривая страгивания для трещин, имеющих равновесный объём V_0 . Отметим, что 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 это значение оказывается равным $r_* \approx 3.8 \cdot 10^{-3}$ м. Полагая в левой части равенства (5) $\sigma_c = 0$, получаем уравнение для нахождения точек пересечения кривой страгивания с осью абсцисс. Численное решение этого уравнения даёт два значения $r_{\min} \approx 8.1 \cdot 10^{-4}$ м и $r_{\max} \equiv r_D \approx 1.38 \cdot 10^{-2}$ м, которые определяют границы области неустойчивости трещины относительно увеличения её радиуса (рис. 2) при полном сбросе внешнего напряжения σ_{\perp} с угольного пласта. При исследовании устойчивости трещин относительно их распространения кривая страгивания трещин приобретает особую актуальность. Она, в частности, показывает, что трещины очень малых и очень больших размеров не могут распространяться. Опи-

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

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 $r_0 = 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, т.е. лежит в интервале $r_{\min} < r_0 < r_*$. Как уже отмечалось ранее, в качестве начального состояния трещины мы принимаем состояние её 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 берегам трещины будет приложено поперечное растягивающее напряжение, стремящееся увеличить её объем. Как уже указывалось ранее, рост трещины на первом этапе идет только за счет увеличения её зияния при неизменном радиусе ($r_0 = const$) вплоть до точки B , где начинает выполняться равенство Гриффитса (3). Эволюция трещины при этом изображается вертикальным отрезком AB (рис. 2), где точка B располагается на кривой страгивания. При этом за счет увеличения зияния трещины объем её увеличивается ($V_0 \rightarrow V_B$), а полузияние достигает значения $c_B = c_0 + \delta_B$, где δ_B приращение полузияния. Давление же газов, распирающих трещину изнутри, уменьшится и станет равным P_B ($P_B < P_0$). Подобные изменения объема трещин и их формы неизбежно приведут к изменению электрофизических характеристик угля. Выражения (1), (2) с учетом равенства (3) дают для объема трещины в точке B значение

$$V_B = V_0 + \frac{16T(1-\nu^2)r_0^3}{3E} = V_0 \left(1 + \frac{\Delta V_B}{V_0}\right) = V_0 \left(1 + \frac{\delta_B}{c_0}\right), \quad (6)$$

где ΔV_B , δ_B - приращения объема трещины и её полузияния соответственно, которые выражаются соотношениями

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

$$\delta_B = \beta r_0^{1/2}, \quad (8)$$

где величина β была введена ранее. Поскольку на первом этапе (AB) процесс расширения газа внутри полости трещины происходит быстро (адиабатически)

тически), то фильтрацией газа внутрь трещины и изнутри трещины в открытое пространство забоя можно пренебречь. Тогда давление газа внутри полости трещины в точке B можно найти, используя равенство (4)

$$P_B = P_0 \left(1 + \frac{\Delta V_B}{V_0}\right)^{-\kappa} = P_0 \left(1 + \frac{\delta_B}{c_0}\right)^{-\kappa}. \quad (9)$$

Дальнейший процесс эволюции трещины будет происходить за счет энергии упругой деформации, накопленной в материале на предыдущем этапе при постоянном выполнении условия Гриффитса (3). Этот второй этап эволюции описывается горизонтальной прямой BC и сопровождается как увеличением радиуса трещины ($r_0 \rightarrow c_0$) (рис. 2), так и изменением её полуширины ($c_B \rightarrow c_C$) при неизменной внешней нагрузке ($\delta_C = \delta_B$). При этом, безусловно, будет изменяться и объем трещины ($V_B \rightarrow V_C$). Следствием этого будет дополнительное изменение электрофизических свойств угля. Для нахождения радиуса трещины в точке C в выражении (5) следует положить $r_B \equiv r_0 = 0.0015$ м. Этому значению радиуса трещины отвечает напряжение $\sigma_B = 1.3$ МПа. Так как $\sigma_C = \sigma_B$, то, подставляя это значение в левую часть выражения (5), получаем уравнение для нахождения радиуса трещины в точке C , т.е. r_C . Численное решение этого уравнения дает значение $r_C \approx 0.008$ м. Таким образом, видно, что радиус трещины в результате её распространения увеличивается в несколько раз. Объем трещины в точке C изменяется как за счет увеличения её радиуса, так и за счёт изменения её раскрытия и оказывается равным

$$V_C = \frac{4}{3} \pi r_C^2 c_C = \frac{4}{3} \pi r_C^2 (c_0 + \delta_B + \delta_C), \quad (10)$$

где

$$\delta_C = \beta r_C^{1/2} \quad (11)$$

– увеличение раскрытия трещины при переходе её из точки B в точку C . И наконец, при последующей разгрузке угольного пласта, т.е. уменьшении напряжения от значения $\sigma_C = 1.3$ МПа до $\sigma_D = 0$, происходит дальнейшая медленная эволюция трещины от точки C до точки D вдоль кривой страгивания. В результате третьего (заключительного) этапа эволюции трещины конечный объём трещины оказывается равным

$$V_f \equiv V_D = \frac{4}{3} \pi r_{\max}^2 c_D = \frac{4}{3} \pi r_{\max}^2 (c_0 + \delta_B + \delta_C + \delta_D), \quad (12)$$

где

$$\delta_D = \beta r_D^{1/2} \quad (13)$$

– увеличение раскрытия трещины при переходе её из точки C в точку D . При этом радиус трещины в точке D фактически определяется граничной

точкой кривой страгивания $r_D = r_{\max}$ и находится численным решением уравнения (5) относительно радиуса трещины при заданном фиксированном значении $\sigma_c = 0$. Итак, фактически остается определить полное полузияние трещины в точке D , которое можно представить в виде

$$c_D = c_0 + \delta_B + \delta_C + \beta_D, \quad (14)$$

где δ_B определяется выражением (8), а величина δ_C – выражением (11). Что касается величины δ_D , то она находится аналогично и фактически сводится к замене в выражении (8) радиуса r_0 на r_{\max}

$$\delta_D = \beta r_{\max}^{1/2}. \quad (15)$$

С учетом (8), (11) и (15) конечный объем трещины в точке D можно представить выражением

$$V_f \equiv V_D = \frac{4}{3} \pi r_{\max}^2 c_D = \frac{4}{3} \pi r_{\max}^2 c_0 \left[1 + \frac{\beta}{c_0} (\sqrt{r_0} + \sqrt{r_C} + \sqrt{r_{\max}}) \right]. \quad (16)$$

Имея в точке D выражения для полного объема трещины V_f и для полного полузияния трещины C_D после её эволюции можно проанализировать трещиноватость угля в реальных условиях забоя

2. Связь между трещиноватостью угля и его эффективными электрофизическими характеристиками

Проанализируем как, используя методы импедансной спектроскопии, осуществить на практике измерения «истинной» трещиноватости газонасыщенного угольного пласта непосредственно в забое. Для этого следует внедрить в угольный пласт два одинаковых плоских электрода известного сечения параллельно груди забоя и подать на них квазистационарное переменное напряжение гармонического вида

$$\tilde{U}(t) = U_m \cos \omega t, \quad (17)$$

где U_m – амплитуда напряжения (на практике $U_m \sim 10^2$ В), $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота (рад/с). Диапазон частот Δf , в котором производят измерения, обычно составляет 1 Гц ÷ 1 МГц.

Рассмотрим, как влияют трещины, имеющиеся в угле, на его комплексное сопротивление (импеданс). Как было показано в [11], 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, за счёт явлений поляризации, работая как электри-

ческие конденсаторы, будут проводить электрические токи смещения. Как было показано в [12], при таких частотах, которые используются в импедансных измерениях углей, скин-эффектом можно пренебречь.

Уголь по своей природе является, вообще говоря, нерегулярной гетерогенной средой 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 характеризовать набором эффективных параметров, в том числе электропроводностью и диэлектрической проницаемостью. Несмотря на то, что вышеупомянутые параметры являются всего лишь интегральными электрофизическими характеристиками материала, используя методы импедансной спектроскопии (ИС), можно определить такие важные на практике свойства углей, как их трещиноватость и пористость.

Как было показано в [11], при одинаковых значениях пористости и трещиноватости изменение сопротивления угля за счет трещин существенно превосходит сопротивление, обусловленное порами. Поэтому в дальнейшем мы 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. Как правило, образец угля, на котором проводятся импедансные исследования, не обладает заметной индуктивностью ($L=0$). Поэтому эквивалентная электрическая схема замещения в данном случае может быть представлена параллельной RC – цепью (рис. 3), где R_{eff} – эффективное активное сопротивление образца на постоянном токе, зависящее от трещиноватости угля, C_{eff} – эффективная ёмкость системы параллельно ориентированных трещин, которая также зависит от трещиноватости угля.

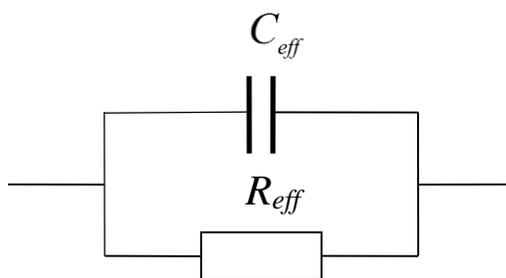


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения для измерения эффективного импеданса угля, содержащего трещины

Измерить непосредственно зависимости эффективных сопротивления R_{eff} и ёмкости 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

$$\underline{Z}_{eff}(\omega) = Z'_{eff}(\omega) + iZ''_{eff}(\omega). \quad (18)$$

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

$$Z'_{eff}(\omega) = \frac{R_{eff}}{1+(\omega C_{eff}R_{eff})^2}, \quad Z''_{eff}(\omega) = \frac{-\omega C_{eff}R_{eff}^2}{1+(\omega C_{eff}R_{eff})^2}. \quad (19)$$

По измеренным частотным зависимостям действительной и мнимой частей импеданса можно построить диаграмму Найквиста (годограф импеданса) угля в переменных $-Z''_{eff} - Z'_{eff}$. В идеальном случае построенная кривая представляет собой полуокружность, расположенную в первой четверти. На годографе импеданса следует отыскать точку максимума, где выполняется равенство $Z'_{eff} = |Z''_{eff}|$. Как следует из (15), для частоты ω_m , отвечающей максимуму годографа импеданса будет выполняться соотношение

$$2\pi f_m C_{eff}(v) R_{eff}(v) = 1, \quad (20)$$

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

$$v = V_{cr}/V, \quad (21)$$

где V_{cr} – полный объем трещин в образце, V – объем образца. Нашей задачей будет выразить эффективное статическое сопротивление угля через коэффициент его трещиноватости v . Как было показано в [12], эффективная статическая электропроводность образца в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, выражается соотношением

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_0}{(1+4v/3)^2}, \quad (22)$$

где σ_0 – статическая проводимость угольной матрицы. Тогда с учетом (22) эффективное статическое сопротивление в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, может быть выражено через коэффициент трещиноватости угля ν

$$R_{eff}(\nu) \approx R_0(1 + 8\nu/3). \quad (23)$$

При получении выражения (23) мы использовали предположение, что для коэффициента трещиноватости обычно выполняется соотношение $\nu \ll 1$. Следовательно, для расчета эффективного статического сопротивления угольного образца с трещинами необходимо знать его активное сопротивление в отсутствие трещин (сопротивление угольной матрицы), которое определяется выражением

$$R_0 = \frac{\rho_0}{S}, \quad (24)$$

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 $\sigma_s(p_{max})$, когда трещиноватость угля практически подавлена. Как показано в [14], при давлении 2 ГПа удельное сопротивление угля уменьшается практически на порядок. Тогда в выражении (24) можно положить $\rho_0 = \rho_s(p_{max})$ и таким образом рассчитать сопротивление угольной матрицы.

Как было указано ранее, для переменного напряжения (17) газонаполненные трещины в ископаемом угле играют роль ёмкостей. Следовательно, для всего объёма угля, как изотропной гетерогенной среды, можно ввести полную эффективную электрическую ёмкость C_{eff} . Выразим её через ёмкость отдельной изолированной трещины C_f и коэффициент трещиноватости угля ν . Если предположить, что все трещины имеют примерно одинаковый размер и форму сплюснутого сфероида, то после полного снятия с угольного пласта внешней механической нагрузки ёмкость одной трещины можно найти по формуле (см. выражение (4) работы [8])

$$C_f = \frac{\pi \epsilon \epsilon_0 r_{max}^2}{C_D}, \quad (25)$$

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

Выразим эффективную ёмкость угля через ёмкость отдельной изолированной трещины C_f . Поскольку всю совокупность трещин, расположенных в слое толщиной меньшей, чем среднее расстояние между трещинами, можно отождествить с системой конденсаторов, соединённых параллельно, то результирующая электрическая ёмкость такого слоя оказывается равной

$$C_{\parallel} = C_f N_{\perp} = C_f N_{cr}^{2/3}, \quad (26)$$

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

$$C_{eff}(v) = C_f (N_{\parallel}/N_{\perp}) = C_f N_{cr}^{1/3} = C_f v^{1/3} (V/V_f)^{1/3}, \quad (27)$$

где V_f – конечный объем трещины после снятия механической нагрузки с угольного пласта, $V = Sd$ – объем угля, заключенный между электродами импедансного спектрометра. Подставляя в равенство (20) выражения (23) и (27) для эффективного активного сопротивления и эффективной ёмкости угля соответственно, получаем иррациональное уравнение для нахождения коэффициента трещиноватости угля v

$$2\pi f_m R_0 (1 + 8v/3) C_f v^{1/3} (V/V_f)^{1/3} = 1. \quad (28)$$

Возводя в куб обе стороны равенства (28) и, учитывая, что $v \ll 1$, получаем квадратное уравнение

$$8v^2 + v - A = 0 \quad (29)$$

где константа A определяется соотношением

$$A = \frac{V_f}{8\pi^3 f_m^3 R_s^3 (p_{\max}) C_f^3 V}. \quad (30)$$

Физический смысл имеет только положительное решение этого уравнения, которое имеет вид

$$v = 0.5(\sqrt{0.125^2 + A/2}) - 0.125. \quad (31)$$

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 [14]. Чтобы оценить константу A необходимо предварительно найти объем трещины V_f и оценить ёмкость одной изолированной трещины C_f на правой границе кривой страгивания (точка D). При этом нам необходимо рассчитать величину β , введенную ранее, и полярную полуось C_D , трещины на правой границе кривой страгивания. С учетом принятых нами механических характеристик угля имеем $\beta \approx 6.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1/2}$ и $CD \approx 6.6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$. Подставляя в выражение (12), (13) эти значения, а также найденное ранее из кривой страгивания значение $r_D \equiv r_{max} \approx 0.0138 \text{ м}$, получаем объём распространившейся трещины $V_f \approx 5.25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$. Ёмкость же этой трещины, согласно (25), оказывается равной $C_f \approx 8.02 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$. 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 $10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ [15]. При этом измеренное при высоком гидростатическом давлении активное сопротивление образца оказалось равным $1.6 \cdot 10^5 \text{ Ом}$. Частота f_m , отвечающая максимуму годографа импеданса, находится после измерений действительной и мнимой частей импеданса угля с помощью импедансного спектрометра. Предположим, что её значение оказалось равным $f_m \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$. Тогда по формуле (30) мы получаем $A \approx 0.1$. Теперь легко найти «истинное» значение коэффициента трещиноватости угля v после снятия нагрузки, воспользовавшись уравнением (31). Тогда получаем коэффициент трещиноватости угля в условиях забоя $v \approx 0.0656 \approx 6.6 \%$.

Для оценки трещиноватости лабораторного образца заметим, что исходная ёмкость трещины $C_0 \approx 1.25 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$, а исходный объём трещины $V_0 \approx 4.71 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$. После измерений действительной и мнимой частей импеданса и построения его годографа находим частоту, отвечающую максимуму годографа. Допустим, что она оказалась равной $f_m^0 \sim 10^3 \text{ Гц}$. Тогда, аналогично выражению (28), получаем соотношение

$$\omega_m^0 C_{eff}^0(v_0) R_{eff}^0(v_0) = 1. \quad (32)$$

Откуда с учетом малости значения $v_0 \ll 1$ получаем приближенное значение трещиноватости угля в лабораторных условиях

$$v_0 \approx A_0 = \frac{V_0}{8\pi^3 f_m^3 R_s^3(p_{max}) C_0^3 V} \quad (33)$$

Подстановка в формулу (33) соответствующих числовых значений величин даёт $v_0 \approx 0.021 \approx 2.1\%$. Сравнивая значения коэффициентов трещинова-

тостей v и v_0 , получаем $k = v/v_0 \approx 3.14$, т.е. трещиноватость угля внутри забоя в несколько раз превышает его трещиноватость, измеренную 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

В работе 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.

Рассматривается угольный пласт горизонтального залегания, содержащий систему параллельных трещин. Проанализирована ситуация, когда в результате быстрого снятия механической нагрузки эволюция магистральных трещин происходит в три этапа. Поскольку рассматривается быстрая разгрузка угольного пласта, то 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. Проведено сравнение с коэффициентом трещиноватости угля, извлеченного на поверхность. Оказалось, что в условиях забоя его значение в несколько раз превышает коэффициент трещиноватости угля, измеренный в лабораторных условиях.

1. *Anderson T.L.* Fracture Mechanics. Fundamental and Applications / T.L. Anderson. - London: CRC Press, 1995. – 669 p.
2. *Alexeev A.D.* Physics of Coal and Mining Processes / A.D. Alexeev. - London: CRC Press, 2012. – 369 p.
3. *Петухов И.М.* Механика горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.М. Линьков. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
4. *Zhenlei Li.* Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars / Li Zhenlei, Dou Linming, Cai Wu [et al.] // Int. J of Rock Mech. and Mining Sci. – 2014. – Vol. 70. – P. 192–200.
5. *Wisetsaen S.* Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt / S. Wisetsaen, C. Walsri, V. Fuenkajorn // Int. J of Rock Mech. And Mining Sci. – 2015. – Vol. 73. – P. 10–14.

6. Христианович С.А. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса / С.А. Христианович, Р.Л. Салганик // Христианович С.А. Избранные работы. Кн.2, с. 121 – 142. М.: Изд-во МФТИ, 2000. – 270 с.
7. Коваленко Ю.Ф. Элементарный акт явления внезапного выброса. Выброс в скважину / Ю.Ф. Коваленко // Препринт ИПМ АН СССР. 1980. – № 145.
8. Фельдман Э.П. Импедансная спектроскопия как способ определения трещиноватости угля. I. Сухой образец / Э.П. Фельдман, Л.И. Стефанович, Т.А. Василенко, А.К. Кириллов // Физика и техника высоких давлений. – 2015. – Т. 25, №3/4. – С. 122–132.
9. Снеддон И.Н. Преобразование Фурье / И.Н. Снеддон. – М.: ИЛ, 1955. – 667 с.
10. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Phil. Trans. of the Royal Soc. of London. – 1921. – Vol. A221. – P. 163–198.
11. Фельдман Э.П. Электросопротивление проводящего материала, содержащего трещины / Э.П. Фельдман, Е.А. Винник, Я.И. Грановский, Н.А. Калугина // Фізико-технічні проблеми горного виробництва. Донецк: ИФГП НАН України, 2011. – Вып.14. – С. 54–59.
12. Салганик Р.Л. Процессы переноса в телах с большим числом трещин / Р.Л. Салганик // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т.27, №6. – С. 1069–1075.
13. Аммосов И.И. Трещиноватость углей / И.И. Аммосов, И.В. Ерёмин // М.: Наука, 1961. – 108 с.
14. Slyusarev V.V. Structure and properties of anthracite under pressure up to 2 GPa / V.V. Slyusarev, P.I. Polyakov // Abstracts of Int. Conf. “Functional materials”. – Ukraine, Partenit, 2007. – P. 284.
15. Геологический словарь: в 2-х томах / под ред. К.Н. Паффенгольца Л.И. Боровикова, А.И. Жамойды [и др.]. – М.: Недра, 1978. – 486 с.

*Л.І. Стефанович, В.В. Соболев, О.М. Молчанов, Н.В. Білан, О.А. Камчатний,
С.О. Пронський*

ЗАСТОСУВАННЯ ІМПЕДАНСНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТРІЩИНУВАТОСТІ ГАЗОНАСИЧЕНИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ У РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ВИБОЮ

Теоретично проаналізовано принципову можливість використання методів імпедансної спектроскопії щодо визначення ступеня тріщинуватості викопного вугілля безпосередньо усередині забою в процесі виїмки вугілля з урахуванням внутрішньопластового тиску газоподібних флюїдів, що заповнюють порожнини тріщин. З цією метою розглянутий вугільний пласт горизонтального залягання, що містить систему паралельних тріщин.

Досліджено ситуацію, коли після швидкого скидання механічного навантаження має місце еволюція магістральних тріщин, яка відбувається у три етапи. Виведено аналітичний вираз для коефіцієнта тріщинуватості вугілля, що пов'язує його з ефективними електрофізичними характеристиками, які можуть бути знайдені методами імпедансної спектроскопії. Щоб скористатися отриманим виразом досить вимі-

ряти величину активного опору вугільної матриці на постійному струмі, а також на основі імпедансних вимірів знайти частоту, що відповідає максимуму годографа імпедансу вугілля.

Проведена оцінка коефіцієнта реальної тріщинуватості газонасиченого вугільного пласта безпосередньо у забої, яка показує, що його значення в цих умовах у декілька разів перевищує коефіцієнт тріщинуватості, виміряний на лабораторних зразках вугілля.

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

*L.I. Stefanovich, V.V. Sobolev, A.N. Molchanov, N.V. Bilan, A.A. Kamchatniy,
E.A. Pronsky*

APPLICATION OF IMPEDANCE SPECTROSCOPY FOR DETERMINATION OF CRACKING OF GAS-SATURATED COAL BEDS IN THE REAL CONDITIONS OF BACKWALL

The principle possibility is analysed theoretically, using of methods of impedance spectroscopy for determination of cracking degree for fossil coal directly into a backwall in the process of coulisse of coal taking into account intralayer pressure gaseous fluids, fillings the cavities of cracks.

The coal layer of the horizontal bedding, containing the system of parallel cracks, for this purpose is considered.

A situation is investigated, when the evolution of main cracks, takes place after the rapid throwing down of the mechanical loading, proceeds in three stages.

Analytical expression is shown out for the coefficient of coal cracking, relating him with effective electrophysics characteristics which can be found by the methods of impedance spectroscopy.

To take advantage of the obtained expression it is sufficiently to measure the value of active resistance of coal matrix on a direct current, and also on the basis of the impedance measurings to find frequency, answering a maximum of hodograph of coal impedance.

The estimation of coefficient of real cracking of gas saturated coal layer is performed directly in a backwall, which shows that his value in these conditions exceeds in several times the coefficient of cracking, measured on the laboratory examples of coal.

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