

УДК 622.2, 537.31

**ИМПЕДАНСНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ МЕДЛЕННОЙ ЕГО РАЗГРУЗКИ****<sup>1</sup>Стефанович Л.И., <sup>1</sup>Молчанов А.Н., <sup>1</sup>Камчатный А.А.  
<sup>2</sup>Соболев В.В., <sup>2</sup>Билан Н.В.**<sup>1</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины, <sup>2</sup>НТУ «Днепровская политехника» МОН Украины**ІМПЕДАНСНА СПЕКТРОСКОПІЯ ГАЗОНАСИЧЕНОГО ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА В УМОВАХ ПОВІЛЬНОГО ЙОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ****<sup>1</sup>Стефанович Л.І., <sup>1</sup>Молчанов О.М., <sup>1</sup>Камчатний О.А.  
<sup>2</sup>Соболев В.В., <sup>2</sup>Білан Н.В.**<sup>1</sup>Институт фізики гірничих процесів НАН України, <sup>2</sup>НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України**IMPEDANCE SPECTROSCOPY OF GAS-SATURATED COAL BED UNDER CONDITIONS OF ITS SLOW UNLOADING****<sup>1</sup>Stefanovich L.I., <sup>1</sup>Molchanov A.N., <sup>1</sup>Kamchatniy A.A.  
<sup>2</sup>Sobolev V.V., <sup>2</sup>Bilan N.V.**<sup>1</sup>Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine, <sup>2</sup>Science Technical University «Dniprovskia Politechnica» MES of Ukraine

**Аннотация.** В статье на основе теоретического рассмотрения проанализирована принципиальная возможность использования методов импедансной спектроскопии для определения степени трещиноватости ископаемого угля внутри забоя в процессе выемки угля с учетом внутрипластового давления газообразных флюидов, заполняющих полости трещин. Для определенности рассматривается угольный пласт горизонтального залегания, содержащий систему параллельных, но случайно распределенных трещин. Проанализирована ситуация, когда снятие механической загрузки происходит сравнительно медленно со скоростью подвигания забоя. Построена кривая страгивания, определяющая область устойчивости магистральных трещин. Показано, что эволюция магистральных трещин происходит в три этапа. Первый этап отвечает «разбуханию» трещин за счет увеличения её зияния. Второй – соответствует быстрому распространению трещины за счет роста её длины при неизменном зиянии и, наконец, на третьем этапе идет процесс медленного дозревания трещины, когда одновременно растет как её длина, так и зияние трещины. Воспользовавшись тем обстоятельством, что газонаполненные трещины с одной стороны оказывают дополнительное активное сопротивление постоянному электрическому току, а с другой – благодаря поляризационным свойствам проводит переменный электрический ток, показано, как, измеряя импеданс угля на переменном токе, можно реально проследить эволюцию трещиноватости угля вблизи груди забоя по мере его подвигания. Выведено аналитическое выражение для коэффициента трещиноватости угля, связывающее его с электрофизическими характеристиками, которые могут быть найдены методами импедансной спектроскопии. Показано, что трещиноватость угля внутри забоя в результате медленной разгрузки угольного пласта в несколько раз превышает его трещиноватость, измеренную в лабораторных условиях. Разработанная в данной статье методика может быть применена для экспериментального определения коэффициента трещиноватости газонасыщенного угольного пласта с целью предупреждения внезапных выбросов.

**Ключевые слова:** импедансная спектроскопия, коэффициент трещиноватости, внутрипластовое давление, электрофизические характеристики, газонасыщенный угольный пласт.

**Введение.** В угольном пласте всегда имеются трещины различной ориентации и размеров. Если рассматривать пласт горизонтального залегания, то горизонтальная составляющая напряжений, поперечная по отношению к груди забоя, обращается в нуль на этой поверхности, а по мере удаления от этой

поверхности вглубь пласта она нарастает, достигая предельного значения, характерного для нетронутого пласта. Трещины, плоскость залегания которых параллельна поверхности забоя и находящиеся вблизи забоя, освобождаются от сжимающих напряжений. Трещины горизонтального залегания, а также наклонные трещины практически не эволюционируют. Рассмотрим эволюцию “поперечных” трещин. Поперечные напряжения могут сниматься как внезапно, при отработке пласта взрывом, так и постепенно, при медленной отработке пласта. Протекание процессов эволюции трещин для двух указанных видов отработки существенно различается. Первый из этих случаев рассмотрен нами в [1]. В данной статье исследуется случай медленного подвигания забоя. Ранее нами был предложен способ определения трещиноватости угля в лабораторных условиях [2], который базируется на методах импедансной спектроскопии (ИС). На практике более важно проследить *динамику* развития реальной трещиноватости в призабойной части угольного пласта, когда в результате проведения горных работ происходит медленное снятие внешней нагрузки, но дегазация угля, как результат фильтрационных процессов, ещё не успела произойти.

**Теоретическая часть.** Пусть магистральная трещина в угольном пласте располагается параллельно груди забоя (рис.1). В начальный момент времени трещина отстоит на расстояние  $l$  от поверхности забоя. Следуя [3], предположим, что зависимость напряжения бокового распора от координаты  $x$ , отсчитываемой от поверхности забоя внутрь пласта, изменяется по линейному закону

$$\sigma_{\perp}(x) = \begin{cases} -\sigma_m x/l, & \text{если } 0 < x < l; \\ -\sigma_m, & \text{если } x \geq l. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $l$  - размер зоны разгрузки,  $\sigma_m$  - напряжение бокового распора в нетронутом пласте. Знак “-” означает сжатие. В процессе отработки угольного пласта расстояние от поверхности забоя до трещины уменьшается по закону:

$$x = l - vt = l(1 - vt/l), \quad (2)$$

где  $v$  - скорость подвигания забоя. В соответствии с (1) напряжение бокового распора на трещине в произвольный момент времени определяется выражением

$$\sigma_{\perp}(t) = -(\sigma_m/l)(l - vt) = \sigma_m(1 - vt/l). \quad (3)$$

В начальный момент  $\sigma_{\perp}(0) = -\sigma_m$ , что соответствует отсутствию разгрузки и сжатие трещин максимально. В момент  $t = l/v$  сжатие  $\sigma_{\perp}$  обращается в нуль.

Рассмотрим пласт горизонтального залегания, содержащий трещины, распределенные в угольном пласте случайным образом. Снятие внешней нагрузки в первую очередь вызывает эволюцию “поперечных” трещин. Предположим, что в состоянии механического равновесия трещины имеют форму сильно сплюснутого сфероида с радиусом экватора  $r_0$  и полярной полуосью  $c_0 = z_0/2$ , где

$z_0$  - зияние трещины в равновесном состоянии (рис. 1). Известно, что ископаемый уголь с достаточной степенью точности можно аппроксимировать упругоизотропным континуумом.

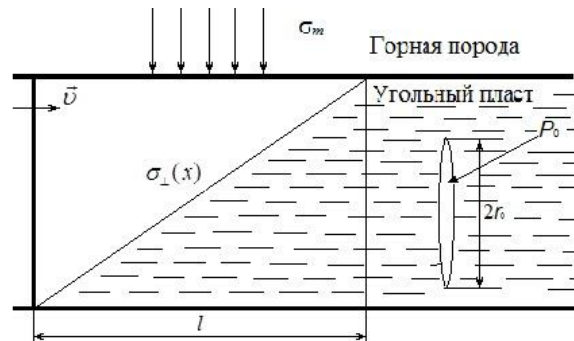


Рисунок 1 - Схематическое изображение газонасыщенного угольного пласта горизонтально залегания с трещинами (здесь  $\bar{v}$  - скорость продвижения забоя)

Из теории трещин известно [4], что изменение объема трещины равно

$$V = V_e + 16(1 - \nu^2)Tr_0^2/3E, \quad (4)$$

где  $E$  - модуль Юнга исследуемого угля,  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $V_e$  - равновесный объем трещины в отсутствие механических напряжений на ее берегах

$$V_0 \equiv V_e = 2\pi r_0^2 z_0/3. \quad (5)$$

Состояние механического равновесия трещины реализуется в процессе медленной разгрузки угольного пласта в момент, когда величина напряжения бокового распора  $|\sigma_{\perp}|$  сравнивается с внутрипластовым давлением  $P_0$ . Тогда механическое напряжение  $T$  на берегах трещины обращается в нуль и объем полости трещины сводится к равновесному объему (5).

Если к дискообразной трещине приложить однородное поле напряжений, то в центральном сечении она будет принимать форму эллипса. Заметим, что на первом этапе силы сцепления, действующие между её берегами, особенно на заостренных концах трещины, препятствуют её распространению, т.е. увеличению радиуса (длины) трещины. На этом этапе увеличение объёма трещины идёт только за счёт увеличения её зияния. Распространение трещины начинается тогда, когда результирующее напряжение  $T$ , действующее на её берегах за счёт газообразных флюидов, заполняющих трещину, достигнет (или превысит) некоторой предельной величины  $T_{cr}^{(1)} = P_B - |\sigma_m|$  где  $T_{cr}^{(1)}$  - предельное (критическое) напряжение бокового распора. Таким образом, условие начала роста (распространения) трещины следует из соотношения Гриффитса [5]  $T_{cr}^{(1)} = \gamma$ , где  $\gamma = K/\sqrt{2r_0}$ , причем  $K$  - модуль сцепления угля,  $r_0$  - начальный радиус трещины, отвечающий условию механического равновесия. До тех пор, пока

трещина не начнет распространяться, газ внутри трещины расширяется. Характер расширения газа зависит от скорости сброса внешней нагрузки  $\sigma_{\perp}$ . Если сброс происходит взрывным способом, то поведения газа в трещине описывается адиабатическим законом [1]. Рассмотрим ситуацию, которая чаще всего реализуется на практике, а именно, случай медленного подвигания поверхности забоя вглубь выработки. Тогда поведение газа в трещине на этом этапе будет описываться изотермическим законом

$$P(t)V(t) = P_0V_0, \quad (6)$$

где  $P_0, V_0$  - начальные, а  $P(t), V(t)$  текущие значения давления газа и объема трещины соответственно.

Используя выражения (4), (6) и соотношение Гриффитса, находим значение критического напряжения, при котором начинается рост трещины

$$\sigma_{cr} = \frac{K}{\sqrt{2r}} - \frac{P_0}{1 + (4\pi\beta / 3V_0)r^{5/2}}, \quad (7)$$

где  $\beta = 2\sqrt{2}(1 - \nu^2)(K/\pi E)$ . Выражение (7) как функция радиуса трещины дает кривую страгивания [6] для трещин с начальным объемом  $V_0$  (рис. 2).

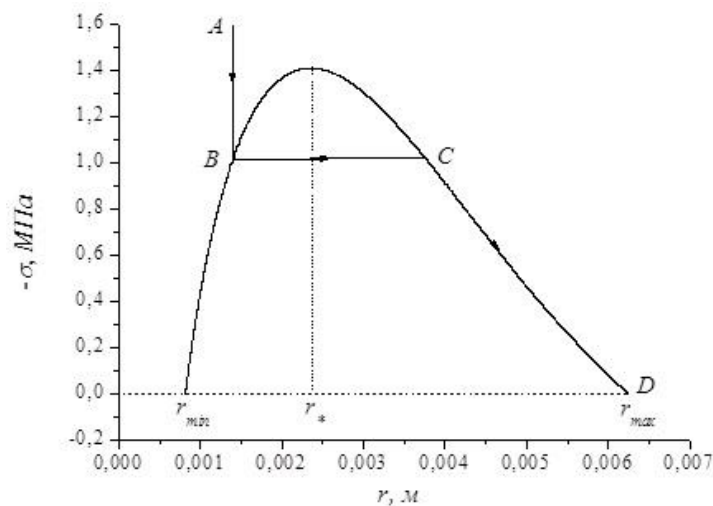


Рисунок 2 - Кривая страгивания трещины:  $r_{min}, r_{max}$  - нули функции страгивания;  $r^*$  - положение максимума кривой страгивания

Чтобы получить равновесный объем трещины полагаем в выражении (5)  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м; где  $\xi = 30$ , тогда имеем  $V_0 \approx 4,71 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$ . Для механических характеристик угля в (7) приняты следующие значения: модуль Юнга  $E = 2,5 \text{ ГПа}$  коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$  модуль сцепления  $K = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{3/2}$ . Пластовое давление газообразных флюидов  $P_0 = 5 \text{ МПа}$ . С учетом этих значений на основе выражения (7) на рис. 2 представлена кривая страгивания для трещин, имеющих равновесный объем  $V_0$ . Физический смысл имеет только та часть кривой, ко-

торая располагается в верхней полуплоскости. Полагая в левой части равенства (7)  $\sigma_{cr}=0$  получаем уравнение для точек пересечения кривой страгивания с осью абсцисс. Численное решение уравнения дает значения  $r_{min} \approx 8,17 \cdot 10^{-4}$  м и  $r_{max} \approx 6,25 \cdot 10^{-3}$  м которые определяют границы области неустойчивости трещины при увеличении ее радиуса (рис. 2) при полном сбросе внешнего напряжения  $\sigma_{\perp}$ .

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 равен  $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ , т.е. лежит в интервале  $r_{min} < r_0 < r_*$ . За начальное состояние трещины принимаем состояние её механического равновесия (точка А на рис. 2), когда результирующее напряжение, действующее на берегах трещины, обращается в нуль. Даже при медленном сбросе внешнего механического напряжения, согласно (3), наступает момент, когда давление газов внутри полости трещины превысит напряжение бокового распора  $\sigma_{\perp}(t)$ . Тогда к берегам трещины будет приложено поперечное растягивающее напряжение, стремящееся увеличить её объём. Как уже указывалось ранее, рост трещины на первом этапе идет только за счет её зияния при неизменном радиусе ( $r_0 = const$ ) вплоть до точки В, где начинает выполняться равенство Гриффитса. Эволюция трещины изображается вертикальным отрезком АВ (рис. 2), где точка В располагается на кривой страгивания. За счёт увеличения зияния трещины объём её растёт ( $V_0 \rightarrow V_B$ ) а полярный радиус достигает значения  $c_B = c_0 + \delta_B$ , где  $\delta_B$  приращение полярного радиуса. Давление газов изнутри трещины становится равным  $P_B$  ( $P_B < P_0$ ) Такие изменения объема трещин и их формы изменят электрофизические характеристики угля. Выражения (4), (5) с учётом (6) дают для объёма трещины в точке В значение

$$V_B = V_0 + 16(1 - \nu^2)Tr_0^2 / 3E = V_0(1 + \delta_B / c_0). \quad (8)$$

Здесь  $\Delta V_B$  и  $\delta_B$  - приращения объёма трещины и её полярного радиуса соответственно, которые выражаются соотношениями

$$\Delta V_B = 4\pi\beta r_0^{5/2} / 3, \quad \delta_B = \beta r_0^{1/2}, \quad (9)$$

где величина  $\beta$  была введена ранее. Поскольку на первом этапе (АВ) процесс расширения газа внутри полости трещины происходит хотя и изотермически, но сравнительно быстро, то фильтрацией газа внутрь трещины и изнутри трещины в открытое пространство забоя можно пренебречь. Тогда давление внутри полости трещины в точке В можно найти, используя равенство (6)

$$P_B = P_0 / (1 + \delta_B / c_0). \quad (10)$$

Дальнейший процесс эволюции трещины будет происходить за счет энергии упругой деформации, накопленной в материале на предыдущем этапе при по-

стоянном выполнении условия Гриффитса. Этот второй этап описывается горизонтальной прямой  $BC$  и сопровождается как увеличением радиуса трещины ( $r_0 \rightarrow r_C$ ) (рис. 2), так и изменением её полярного радиуса ( $c_B \rightarrow c_C$ ) при неизменной внешней нагрузке  $\sigma_B = \sigma_C$ . При этом, безусловно, будет изменяться и объём трещины ( $V_B \rightarrow V_C$ ). Следствием этого будет дополнительное изменение электрофизических свойств угля. Для нахождения радиуса трещины в точке  $C$  в выражении (8) следует положить  $r_B \equiv r_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Этому значению радиуса трещины в соответствии с выражением (8) отвечает напряжение  $\sigma_B \approx 1,11$  МПа. Так как  $\sigma_B = \sigma_C$ , то, подставляя это значение в левую часть выражения (8), получаем уравнение для нахождения радиуса трещины  $r_C$  в точке  $C$ , численное решение которого даёт значение  $r_C \approx 3,56 \cdot 10^{-3}$  м. Объём трещины в точке  $C$  изменяется как за счёт увеличения её радиуса, так и за счёт изменения величины её зияния и оказывается равным

$$V_C = \frac{2}{3} \pi r_C^2 z_C \left( \frac{z_0}{2} + \delta_B + \delta_C \right), \quad (11)$$

где  $\delta_C = \beta r_C^{1/2}$  - увеличение зияния трещины при переходе её из точки  $B$  в точку  $C$ . И, наконец, при дальнейшей разгрузке угольного пласта, т.е. уменьшении напряжения от значения  $\sigma_C \approx 1,11$  МПа до  $\sigma_D = 0$ , происходит медленная эволюция трещины от точки  $C$  до точки  $D$  вдоль кривой страгивания. В результате третьего этапа эволюции трещины объём трещины оказывается равным

$$V_f \equiv V_D = \frac{2}{3} \pi r_{\max}^2 z_D = \frac{4}{3} \pi r_{\max}^2 \left( \frac{z_0}{2} + \delta_B + \delta_C + \delta_D \right), \quad (12)$$

где  $\delta_D = \beta r_D^{1/2}$  - увеличение зияния трещины при её переходе из точки  $C$  в точку  $D$ . При этом радиус трещины в точке  $D$  фактически определяется граничной точкой кривой страгивания  $r_D \equiv r_{\max}$  и находится численным решением уравнения (7) относительно радиуса трещины при  $\sigma_C = 0$ . В формуле (12) выражение в круглой скобке есть не что иное как полузияние трещины в точке  $D$

$$c_D = z_0/2 + \delta_B + \delta_C + \delta_D. \quad (13)$$

**Результаты работы и их обсуждение.** Проанализируем как, используя методы ИС, можно осуществить на практике измерение коэффициента трещиноватости газонасыщенного угольного пласта непосредственно в забое. Учитывая, что, согласно (3), разгрузка угольного пласта происходит сравнительно медленно, можно внедрить в угольный пласт параллельно груди забоя два одинаковых плоских электрода и подать на них переменное напряжение гармонического вида  $\tilde{U}(t) = U_m \cos \omega t$ , где  $U_m$  - амплитуда напряжения (на практике обычно  $U_m \leq 10^{-2}$  В),  $\omega = 2\pi f$  - циклическая частота (рад/с).

Проанализируем влияние трещин, всегда имеющих в угольном массиве, на его комплексное сопротивление (импеданс). В случае постоянного напряжения ( $U=const$ ) как было показано в [6], газонаполненные трещины не проводят электрический ток и могут создавать дополнительное омическое сопротивление. В случае же переменного напряжения, трещины с высоким сопротивлением среды внутри них за счет токов смещения будут проводить переменный электрический ток. Как было показано в [7], при таких частотах, которые используются в импедансных измерениях (а это частоты от  $1Гц$  до  $1МГц$ ), скин-эффектом можно пренебречь.

Как известно, уголь по своей природе является, вообще говоря, нерегулярной гетерогенной средой с хаотически ориентированными трещинами и случайно распределенными порами и поэтому он в среднем изотропен. В газонасыщенных угольных массивах наиболее выбороопасными являются пласты с системами трещин, ориентированными параллельно груди забоя. Проанализируем такую ситуацию, считая угольный пласт макроскопически однородной средой, характеризующейся набором эффективных параметров, в том числе электропроводностью. Несмотря на то, что эти параметры являются всего лишь интегральными характеристиками материала, используя методы ИС, можно определить важные на практике свойства углей, как трещиноватость и пористость.

Как было показано в [6], при одинаковых значениях пористости и трещиноватости изменение сопротивления угля за счёт трещин существенно превосходит сопротивление, обусловленное порами. Поэтому мы ограничимся рассмотрением влияния случайно расположенных в пространстве трещин на эффективный импеданс угольного образца с целью выяснения возможности определения коэффициента трещиноватости угольного образца подобным способом.

Поскольку образец угля, на котором проводятся импедансные измерения, не обладает заметной индуктивностью ( $L \approx 0$ ) Поэтому эквивалентная электрическая схема (ЭЭС) замещения в данном случае может быть представлена параллельной  $RC$  - цепью. Зависимости эффективных сопротивления  $R_{eff}$  и ёмкости  $C_{eff}$  угля от степени его трещиноватости измерить непосредственно не представляется возможным. Используя компактный импедансный спектрометр, измеряют на переменном токе частотные зависимости действительной и мнимой частей эффективного комплексного импеданса угля соответственно, которые для ЭЭС замещения имеют вид

$$Z'_{eff}(\omega) = R_{eff} / [1 + (\omega C_{eff} R_{eff})^2], \quad Z''_{eff}(\omega) = -\omega C_{eff} R_{eff}^2 / [1 + (\omega C_{eff} R_{eff})^2]. \quad (14)$$

По измеренным частотным зависимостям действительной и мнимой частей импеданса строим диаграмму Найквиста (годограф импеданса) угля в переменных  $-Z''_{eff} - Z'_{eff}$ . Как следует из (14), для частоты  $\omega_m$ , отвечающей максимуму годографа импеданса будет выполняться соотношение

$$2\pi f_m C_{eff}(\nu) R_{eff}(\nu) = 1, \quad (15)$$

где  $\nu$  - безразмерный коэффициент трещиноватости [8], который определяется отношением  $\nu = V_{cr}/V$ , где  $V_{cr}$  - полный объём трещин в образце,  $V$  - объём угольного образца. Выразим эффективное статическое сопротивление через коэффициент трещиноватости  $\nu$  [8]. Как было показано в [7], эффективная статическая электропроводность угля в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, выражается соотношением

$$\sigma_{\perp} = \sigma_0 / (1 + 4\nu/3)^2, \quad (16)$$

где  $\sigma_0$  - статическая проводимость угольной матрицы. С учетом (16) эффективное статическое сопротивление в направлении, перпендикулярном плоскости трещин может быть выражено через коэффициент трещиноватости угля  $\nu$

$$R_{eff}(\nu) \approx (1 + 8\nu/3). \quad (17)$$

В (18) использовано предположение, что для коэффициента трещиноватости угля обычно выполняется соотношение  $\nu \ll 1$ . Следовательно, для расчёта эффективного статического сопротивления угля с трещинами необходимо знать его активное сопротивление в отсутствие трещин (сопротивление угольной матрицы), которое определяется известным выражением  $R_0 = \rho_0 d/S$ , где  $\rho_0 = \rho(\omega)|_{\omega=0} = \rho(0)$  - статическое удельное сопротивление угольной матрицы,  $S$  - площадь измерительных электродов,  $d$  - расстояние между электродами (толщина исследуемого угля). Чтобы определить величины  $\rho_0$  и  $R_0$ , достаточно измерить статическую проводимость угля при высоком гидростатическом давлении  $\sigma_s(p_{\max})$ , когда пустотность угля практически подавлена. Как было показано в [9], при давлении  $2\text{ГПа}$  удельное сопротивление угля уменьшается практически на порядок. Тогда в выражении для  $R_0$  можно положить  $\rho_0 = \rho_s(p_{\max})$  и таким образом рассчитать сопротивление угольной матрицы.

Для переменного напряжения газонаполненные трещины в ископаемом угле выступают в роли конденсаторов некоторой ёмкости. Следовательно, для всего объёма угля, как изотропной гетерогенной среды, можно ввести полную эффективную электрическую ёмкость  $C_{eff}$ . Она выражается через ёмкости изолированных трещин  $C_f$  и коэффициент трещиноватости угля  $\nu$ . Предположим, что все трещины имеют примерно одинаковый размер и форму сплюснутого сфероида. Тогда после полного снятия с угольного пласта внешней механической нагрузки ёмкость изолированной трещины можно найти по формуле (см. [2])

$$C_f = \pi \epsilon \epsilon_0 r_{\max}^2 / c_D \quad (18)$$



где  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная вакуума,  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость газообразных флюидов, заполняющих полость трещины ( $\varepsilon \approx 1$ ),  $r_{\max}$  - радиус трещины в точке  $D$ ,  $c_D$  - её полярный радиус в точке  $D$  кривой страгивания. Поскольку электрические поля и токи слабы, то они не создают механических напряжений, которые бы могли 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 ёмкость такого слоя оказывается равной

$$C_{\parallel}(\nu) = C_f N_{\parallel} = C_f N_{cr}^{2/3}, \quad (19)$$

где  $N_{cr}$  - полное число трещин в исследуемом образце угля. Для нахождения полной эффективной ёмкости образца необходимо найти ёмкость всех слоев, соединенных последовательно. С учётом статистической пространственной однородности угля ёмкости всех этих слоёв можно считать одинаковыми и равными  $C_{\square}$ . Тогда результирующая эффективная ёмкость образца равна

$$C_{eff}(\nu) = C_f (N_{\parallel} / N_{\perp}) = C_f N_{cr}^{1/3} = C_f \nu^{1/3} (V/V_f)^{1/3}. \quad (20)$$

где  $V_f$  - объем трещины после полного снятия механической нагрузки с угольного пласта,  $V = Sd$  - объём угля, заключённый между электродами импедансного спектрометра. Подстановка (17) и (20) в (15) дает уравнение

$$2\pi f_m R_0 (1 + 8\nu/3) C_f \nu^{1/3} (V/V_f)^{1/3} = 1. \quad (21)$$

С учетом малости коэффициента трещиноватости ( $\nu \ll 1$ ) получаем

$$8\nu^2 + \nu - A = 0, \quad (22)$$

где постоянная  $A$  определяется соотношением

$$A = (V_f / 8\pi^3 f_m^3 R_s^3(p_{\max})) C_f^3 V. \quad (23)$$

Для численных оценок трещиноватости угля сопротивление угольной матрицы на нулевой частоте  $R_0$  заменили на экспериментально измеряемое статическое сопротивление образца при высоком гидростатическом давлении,  $R_s(p_{\max})$ , когда практически полностью подавлена трещиноватость угля [9].

Физический смысл имеет только положительное решение уравнения (23)

$$\nu = 0.5(\sqrt{0.125 + A/2} - 0.125). \quad (24)$$

Чтобы оценить постоянную  $A$  необходимо предварительно найти конечный объём трещины  $V_f$  и оценить величину ёмкости единственной трещины  $C_f$  на правой границе кривой страгивания (точка  $D$ ). При этом нам необходимо рассчитать величину  $\beta$ , введённую ранее, и полярную полуось  $c_D$  трещины на правой границе кривой страгивания, определяемую выражением (13). С учетом принятых нами механических характеристик угля получаем  $\beta \approx 6.56 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1/2}$  и  $c_D \approx 6.16 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ . Подставляя в выражения (11), (12) эти значения, а также найденное ранее из кривой страгивания значение  $r_D \equiv r_{\max} \approx 0.0063 \text{ м}$ , получаем объём распространившейся трещины  $V_f \approx 10^{-8} \text{ м}^3$ . Ёмкость же этой трещины, согласно (20), оказывается равной  $C_f \approx 1.76 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$ . Пусть электроды импедансного спектрометра имеют вид двух квадратных пластин площадью  $S = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , расстояние между которыми  $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Для типичных значений удельной электропроводности угля средней стадии метаморфизма можно принять значение  $10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$  [10]. При этом измеренное при высоком гидростатическом давлении ( $\sim 2 \text{ ГПа}$ ) активное сопротивление образца оказалось равным  $2.5 \cdot 10^6 \text{ Ом}$ . Частота  $f_m$ , отвечающая максимуму годографа импеданса, может быть найдена путем измерения действительной и мнимой частей импеданса угля с помощью импедансного спектрометра. Её значение оказалось равным  $f_m \approx 5 \cdot 10^2 \text{ Гц}$ . Тогда по формуле (23) получаем  $A \approx 0.38$ . Воспользовавшись уравнением (25), мы можем найти «истинное» значение коэффициента трещиноватости угля  $\nu$  после снятия нагрузки с угольного пласта, которое оказывается равным  $\nu = 0.164 = 16.4\%$ .

Как было показано в [2], для образцов угля, содержащих трещины сопоставимых размеров, коэффициент трещиноватости угля в лабораторных условиях оказался равным  $\nu_0 \approx 0.021 \approx 2.1\%$ . Сравнивая значения коэффициентов трещиноватости  $\nu$  и  $\nu_0$ , получаем  $k = \nu/\nu_0 = 7.81$ , т.е. трещиноватость угля внутри забоя в результате медленной разгрузки угольного пласта почти в 8 раз превышает его трещиноватость, измеренную в лабораторных условиях.

**Выводы.** Полученные результаты показывают, что процесс развития трещиноватости угольного пласта при медленной разгрузке развивается более стремительными темпами, чем при быстрой разгрузке угольного пласта [1]. Разработанная в данной статье методика может быть применена для экспериментального определения коэффициента трещиноватости газонасыщенных угольных пластов с целью предупреждения внезапных выбросов.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Применение импедансной спектроскопии для определения трещиноватости газонасыщенных угольных пластов / Стефанович Л.И., Соболев В.В., Молчанов А.Н., Билан Н.В., Камчатный А.А., Пронский Е.А. / Физико-технические проблемы горного производства. Днепр: ИФГП НАН Украины. 2017. Вып.19. С. 91–105.
2. Импедансная спектроскопия как способ определения трещиноватости угля. I. Сухой образец / Фельдман Э.П., Стефанович Л.И., Василенко Т.А., Кириллов А.К. / Физика и техника высоких давлений. 2015. Т. 25. №3/4. С. 122–132.
3. Фельдман Э., Калугина Н., Чеснокова О. Эволюция трещин в краевой части угольного пласта при его стационарной отработке / Mining of Mineral Deposits. 2017. Vol. 11. Issue 2. P. 41–45.
4. Снеддон И.Н. Преобразование Фурье. - М.: Иностранная литература, 1955. 667 с.
5. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / Phil. Trans. of the Royal Soc. of London. 1921. Vol. A221. P. 163–198.
6. Фельдман Э.П., Винник Е.А., Грановский Я.И., Калугина Н.А. Электросопротивление проводящего материала, содержащего трещины / Физико-технические проблемы горного производства. Днепр: ИФГП НАН Украины. 2011. Вып.14. С. 54–59.
7. Салганик Р.Л. Процессы переноса в твердых телах с большим числом трещин / Инженерно-физический журнал. 1974. Т. 27. №6. С. 1069–1075.
8. Аммосов И.И., Еремин И.В. Трещиноватость угля. - М.: Наука, 1961. 108 с.
9. Slyusarev V.V. Structure and properties of anthracite under pressure up to 2 GPa / Abstracts of Int. Conf. "Functional materials". Ukraine, Partenit, 2017. – 284.
10. Геологический словарь: в 2-х томах / под ред. К.Н. Паффенгольца К.Н., Боровикова Л.И., Жамойды А.И. и др. - М.: Недра, 1978. 486 с.

## REFERENCES

1. Stefanovich, L.I., Sobolev, V.V., Molchanov, A.N., Bilan, N.V., Kamchatniy A.A. and Pronskiy, E.A. (2017), "Application of impedance spectroscopy for determination of gas-saturated coal beds fracturing in real condition of backwall", *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, vol. 19, pp. 91–105.
2. Feldman, E.P., Stefanovich, L.I., Vasilenko, T.A. and Kirillov, A.K. (2015), "Impedance spectroscopy as a method of determining the coal cracking. I. Dry example", *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*, vol. 25, no.3/4, pp. 122–132.
3. Feldman E., Kalugina N. and Chesnokova, O. (2017), "Evolution of cracks in selvedge of the coal bed during its stationary working", *Mining of Mineral Deposits*, vol. 11, issue 2, pp. 41–45.
4. Sneddon, I.N. (1955), *Preobrazovanie Fur'e* [Fourier Transformation], Inostrannaya Literatura, Moscow, Russia.
5. Griffith, A.A. (1921), "The phenomena of rupture and flow in solids", *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London*, vol. A221, pp. 163–198.
6. Feldman, E.P., Vinnik, E.A., Granovskiy, Ya.I. and Kalugina, N.A. (2011) "Electrical resistance of conductive material containing cracks", *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, no 14, pp. 54–59.
7. Salganik, R.L. (1974), "Transfer processes in solids with a large number of cracks", *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, vol. 27. no. 6, pp. 1069–1075.
8. Ammosov, I.I. and Yeryomin, I.V. (1961), *Treshchinovost uglia* [Coal Fracturing], Nauka, Moscow, Russia.
9. Slyusarev, V.V. (2007), "Structure and properties of anthracite under pressure up to 2 GPa", *Abstracts of International Conference "Functional materials"*, Partenit, Ukraine, October 1-6, pp.284.
10. Paffengoltz, K.N., Borovikov, L.I., Zhamojda, A.I. [et al] (1978), *Geologicheskii slovar* [Geological dictionary]: in 2 volums in. (ed), Nedra, Moscow, Russia.

## Об авторах

**Стефанович Леонид Ильич**, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, заместитель директора института по научной работе, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАНУ), Днепр, Украина, listef2591@ukr.net.

**Молчанов Александр Николаевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор института физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, an\_mol@ukr.net.

**Камчатный Алексей Анатольевич**, магистр, младший научный сотрудник института физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, ifgr-kaa@i.ua.

**Соболев Валерий Викторович**, доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Днепропетровская политехника» МОН Украины (НТУ «Днепропетровская политехника»), Днепр, Украина, velo1947@ukr.net.

**Билан Наталия Валерьевна**, кандидат геол.-мин. наук, доцент Национального технического университета «Днепропетровская политехника» МОН Украины (НТУ «Днепропетровская политехника»), Днепр, Украина, bilanatan@gmail.com.

## About the authors

**Stefanovich Leonid Il'ich**, Doctor of Physics and Mathematics, (D.Sc.) (Phys.-Math.), Deputy Director of the Institute for Scientific Work, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, listef2591@ukr.net.

**Molchanov Alexandr Nikolaevich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Director of the Institute, Institute for Physics of Min-

ing Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, an\_mol@ukr.net.

**Kamchatniy Alexei Anatol'yevich**, Master of Sciences (M.Sc.), junior researcher, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnepr, Ukraine, ifgp-kaa@i.ua.

**Sobolev Valeriy Victorovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Professor National Technical University "Dniprovsk Polytechnica" MES of Ukraine (NTU "Dniprovsk Polytechnica"), Dnepr, Ukraine, velo1947@ukr.net.

**Bilan Nataliya Valerievna**, Candidate of Geology and Mineralogy (Ph. D), Associate Professor of National Technical University "Dniprovsk Polytechnica" MES of Ukraine (NTU "Dniprovsk Polytechnica"), Dnepr, Ukraine, bilanatan@gmail.com.

**Анотація.** У статті на основі теоретичного розгляду проаналізована принципова можливість використання методів імпедансної спектроскопії для визначення ступеня тріщинуватості вкопного вугілля всередині вибою в процесі виїмки вугілля з урахуванням внутрішньопластового тиску газоподібних флюїдів, що заповнюють порожнини тріщин. Для визначеності розглядається вугільний пласт горизонтального залягання, що містить систему паралельних, але випадково розподілених тріщин. Проаналізовано ситуацію, коли зняття механічного навантаження відбувається порівняно повільно зі швидкістю посування вибою. Побудовано криву зрушення, що визначає область стійкості магістральних тріщин. Показано, що еволюція магістральних тріщин відбувається у три етапи. Перший етап відповідає «розбуханню» тріщин за рахунок збільшення її з'являння. Другий - відповідає швидкому поширенню тріщини за рахунок зростання її довжини при незмінному з'являнні і, нарешті, на третьому етапі йде процес повільного дозрівання тріщини, коли одночасно зростає як її довжина, так і з'являння тріщини. Скориставшись тією обставиною, що газонаповнені тріщини з одного боку надають додаткове активний опір постійному електричному струму, а з іншого - завдяки поляризаційним властивостям проводить змінний електричний струм спробуємо показати, як, використовуючи методи імпедансної спектроскопії, можна реально простежити еволюцію тріщинуватості вугілля поблизу грудей вибою в міру його посування. Виведено аналітичний вираз для коефіцієнта тріщинуватості вугілля, що зв'яже його з електрофізичними характеристиками, які можуть бути знайдені методами імпедансної спектроскопії. Показано, що тріщинуватість вугілля всередині вибою в результаті повільного розвантаження вугільного пласта в кілька разів перевищує його тріщинуватість, виміряну у лабораторних умовах. Розроблена в даній статті методика може бути застосована для експериментального визначення коефіцієнта тріщинуватості газонасиченого вугільного пласта з метою попередження раптових викидів.

**Ключові слова:** імпедансна спектроскопія, коефіцієнт тріщинуватості, внутрішньопластовий тиск, електрофізичні характеристики, газонасичений вугільний пласт.

**Annotation.** In this paper, the theoretical possibility of using impedance spectroscopy methods to determine the degree of fracturing of fossil coal inside the face in the process of coal excavation with taking into account the intra-layer pressure of gaseous fluids filling the crack cavities is analyzed. For certainty, a coal bed of horizontal bedding containing a system of parallel but randomly distributed cracks is considered. The situation is analyzed when mechanical loading is released relatively slowly - at a speed of the face driving. A crack initiation curve is built, which determines a region of the main crack stability. It is shown that the evolution of main cracks occurs in three stages. The first stage corresponds to the "swelling" of cracks due to an increase in its gap. The second one corresponds to the rapid propagation of the crack due to the growth of its length with unchanged gaps and, finally, the third stage of the crack slow ripening when both the crack length and gap simultaneously grow. With taking into account the fact that, on the one hand, gas-filled cracks provide additional active resistance to DC and, on the other hand, conduct AC due to the polarization properties, it is shown how it is possible, with the help of methods of impedance spectroscopy, to trace evolution of coal fracturing near the bottom face at its driving. An analytical expression for the coefficient of coal fracturing is derived, which connects it with electro-physical characteristics, which can be found by the methods of impedance spectroscopy. It is shown that coal fracturing inside the face as a result of the slow release of the coal bed is several times greater than its fracture measured in the laboratory. The technique developed in this article can be applied to the experimental determination of the fracture coefficient of a gas-saturated coal bed in order to prevent sudden outbursts.

**Keywords:** impedance spectroscopy, fracture coefficient, intra-bed pressure, electrophysical characteristics, gas-saturated coal bed.

*Стаття надійшла до редакції 14.09.2018*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Четвериком М.С.*