

Моделирование пустотной структуры угольного пласта

В. Н. Павлыш, Е. В. Перинская, Д. В. Бельков
Донецкий национальный технический университет
elenaperinskaya@mail.ru

Аннотация

На характере движения жидкости сказываются все свойства угольного пласта как фильтрующей среды. Для исследования течения жидкости в неоднородной среде угольного пласта необходимо использовать модель его пустотной структуры, предложенную в статье. В основу разработки модели положены следующие предположения. Трещины и поры соединяются между собой микропорами. Микропоры являются ответвлением от крупных пор. Исследования фильтрации и капиллярного равновесия, визуальные и микроскопические наблюдения, основанные на этих предположениях, привели к представлениям о пустотной структуре угля, как трещиновато-пористой блочной среде. Эта среда имеет иерархический характер.

Введение

Важным средством борьбы с опасными явлениями в шахтах является предварительная обработка угольных пластов жидкостями. На характере движения жидкости сказываются все свойства угольного пласта как фильтрующей среды [1-3]. Поэтому для создания математических моделей течения жидкости в неоднородной среде угольного пласта необходимо использовать модель его пустотной структуры.

Возможны [4] две модели пустотной структуры. В первой модели трещины и поры всех размеров распределены в угле случайным образом. Их диаметры в направлении движения жидкости значительно изменяются. Трещины и поры соединяются между собой микропорами. Такая модель использована в работах [5, 6], где угольный пласт представляется как сильно сцементированная сплошная среда с трещиновато-пористой структурой и случайно распределёнными фильтрационными параметрами. Во второй модели пустотность представляется в виде разветвленной системы пор и трещин. Микропоры являются ответвлением от крупных пор. Исследования фильтрации и капиллярного равновесия, визуальные и микроскопические наблюдения, основанные на этой модели, привели к представлениям о пустотной структуре угля, как трещиновато-пористой блочной среде [7, 8]. Эта среда имеет иерархический характер. Мелкие блоки вложены в более крупные блоки, а те, в свою очередь, вложены в ещё более крупные блоки. Таким образом, в пустотной структуре угольного пласта на разных масштабных уровнях наблюдается самоподобие (масштабная инвариантность). Это свойство является

серьезным аргументом в пользу причисления ископаемых углей к естественным фракталам [8,9].

Целью статьи является моделирование пустотной структуры угольного пласта. Задачи работы: разработка BML-модели пустотной структуры угольного пласта в среде программирования R, мультифрактальный анализ в среде Octave пустотной структуры угольного пласта, полученной с помощью BML-модели.

Изложение основного материала исследований

В данной статье для моделирования пустотной структуры угольного пласта предлагается модель BML (Biham-Middleton-Levine). Она известна как самоорганизующаяся модель транспортного потока на основе детерминированного клеточного автомата. Подвижные элементы представлены точками на решетке со случайным стартовым положением. Модель BML является двумерной аналогией движения по правилу 184.

Правило 184 – модель, в которой подвижные элементы подобно частицам движутся в одном направлении, останавливаясь и продолжая движение в зависимости от наличия элементов впереди. Эта модель является наиболее простым примером применения клеточных автоматов к моделированию потоков и служит основой для других, более сложных, моделей. Состояние автомата описывается одномерным массивом ячеек, каждая из которых содержит значение 0 или 1. На каждом шаге к автомату применяется набор правил, приведённый в табл. 1.

Таблица 1 – Правило 184

Текущий шаблон	11 1	11 0	10 1	10 0	01 1	01 0	00 1	00 0
Новое состояние центральной ячейки	1	0	1	1	1	0	0	0

Первая строка таблицы содержит состояния трёх ячеек – центральной, для которой необходимо вычислить состояние, левой и правой, которые определяют новое состояние центральной ячейки (шаблон). Во второй строке содержатся новые состояния центральной ячейки в зависимости от её окрестности. Значения новых состояний дали название этому правилу – 101110002₍₂₎ = 18410.

Модель имеет следующие правила перехода: если ячейка i не пуста, а $(i + 1)$ – пуста, то на следующем шаге ячейка $(i + 1)$ оказывается занята. Значение ячейки i для новой итерации определяется её левым соседом, для которого схема определения состояния аналогична.

Если первоначальная конфигурация автомата 110101001, то первые несколько итераций будут выглядеть, как показано в табл. 2. Эволюция автомата в данном случае является аналогией движения автомобилей по однопослойной дороге с максимальной скоростью, равной одной ячейке в единицу времени. Шаблоны 011 и 111 означают заторное состояние потока, при котором автомобиль, на пути которого оказался другой автомобиль, не может продолжать движение и остаётся на своём месте до тех пор, пока впереди не образуется свободное пространство [10].

Таблица 2 – Пример эволюции по правилу 184

Итерация	Конфигурация
0	0110101001
1	0101010100
2	0010101010
3	0001010101
4	0000101010
5	0000010101
...	...

Математически правила перехода для каждой клетки можно записать:

- ускорение и торможение:

$$v_i(t) = \min(g_i(t-1), 1), \quad (1)$$

- перемещение:

$$n_i(t) = n_i(t-1) + v_i(t). \quad (2)$$

В транспортном потоке различают три состояния: свободный поток, плотный поток и затор. При свободном движении, когда дорога не загружена, водители придерживаются желаемой скорости, свободно переходя на соседние полосы. Корреляции в движении отдельных автомобилей подавлены, и средняя скорость машин определяется только средним расстоянием между ними. В плотном потоке водители уже не могут свободно маневрировать, и вынуждены согласовывать свою скорость со скоростью потока.

Машины мешают друг другу разогнаться до оптимальной скорости, но поток не переходит в состояние затора. В таком потоке формируются большие кластеры автомобилей, которые перемещаются по автомагистрали как единое целое. BML-модель позволяет получать фазы затора, свободного и кооперативного движения в плотном потоке.

Аналогия между структурой транспортного потока и пустотной структурой угольного пласта показана в табл. 3.

Таблица 3 – Аналогия между структурой транспортного потока и пустотной структурой угольного пласта

Структура транспортного потока	Пустотная структура угольного пласта
Подвижный элемент	Текучее вещество, заполняющее пустоты
Свободный поток	Пористая структура
Плотный поток	Трешиновато-пористая структура
Затор	Трешиноватая структура

Реализованная в среде R BML-модель структуры угольного пласта позволяет в зависимости от значения параметра density (концентрация пустот) получать различные пустотные структуры угольного пласта.

На рис. 1 показаны результаты моделирования пористой структуры при значении density=0,3. Синим цветом показаны поры, заполненные текучим веществом, белым цветом – неувлажненные участки пласта. Показано, что при низкой концентрации пустот подвижность текучего вещества стремится к нулю, т.е. влажность пласта незначительна.

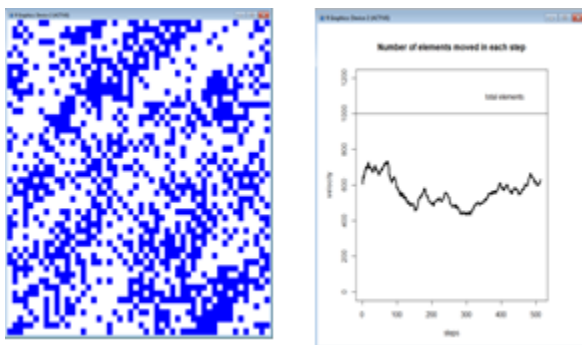


Рисунок 1 – Моделирование пористой структуры при density= 0,3

На рис. 2 показаны результаты моделирования трещиновато-пористой структуры при значении density=0,4. Показано, что при значительной концентрации пустот текучее вещество обладает подвижностью достаточной для образования влажных кластеров.

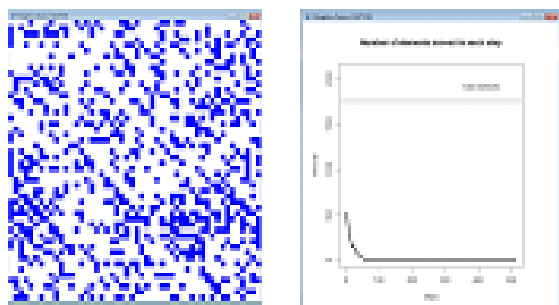


Рисунок 2 – Моделирование трещиновато-пористой структуры при density= 0,4

На рис. 3 показаны результаты моделирования трещиноватой структуры при значении density=0,7. Показано, что при высокой концентрации пустот текучее вещество обладает значительной подвижностью по трещинам и пласт имеет высокую влажность.

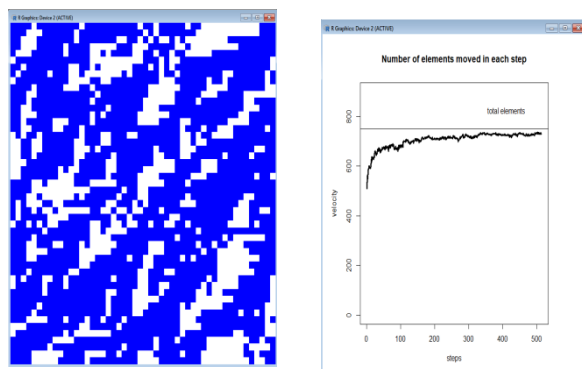


Рисунок 3 – Моделирование трещиноватой структуры при density= 0,7

В работе [6] предложено использовать мультифрактальный подход к описанию структур пространственной самоорганизации

углей, поскольку ансамбль микродефектов пласта растет как мультифрактальный (статистически самоподобный) кластер.

В данной статье для исследования фрактальности пустотной структуры угольного пласта, полученной с помощью BML-модели, в среде Octave выполнен мультифрактальный анализ трещиновато-пористой и трещиноватой структур. Метод мультифрактального анализа сводится к следующим шагам [7].

1. Для исследуемого ряда $x(i)$, $i=1, 2, \dots, N$ следует выделить флуктуационный профиль, где ν - среднее значение.

2. Полученные значения $y(i)$ разделяются на непересекающихся сегментов равной длины s . При этом следует учесть, что длина ряда N не всегда кратна шагу s . Поэтому, чтобы не исключать из анализа последний участок, содержащий число элементов, меньшее s , следует повторить процедуру деления, начиная с противоположного конца ряда. В результате получаем сегментов длины s .

3. Используя метод наименьших квадратов, для профиля $y(i)$, отвечающего каждому из этих сегментов, вычислить локальный тренд, представляющий полином, степень которого обеспечивает заданную точность. Затем для сегментов по формуле (1) определяется дисперсия:

$$F^2(\nu, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[(\nu-1)s+i] - y_\nu(i)\}^2. \quad (1)$$

Для $\nu = N_s + 1, \dots, 2N_s$ используется формула (2):

$$F^2(\nu, s) = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \{y[N - (\nu - N_s)s + i] - y_\nu(i)\}^2. \quad (2)$$

Усредняя значения, полученные по (1), (2) и деформированные произвольным показателем q , вычисляются моменты:

$$F_q(s) = \left\{ \frac{1}{2N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} [F^2(\nu, s)]^{q/2} \right\}^{1/q}. \quad (3)$$

При $q \rightarrow 0$ вместо (3) нужно использовать формулу (4):

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{\nu=1}^{2N_s} \ln[F^2(\nu, s)] \right\}. \quad (4)$$

При положительных показателях q основной вклад в сумму по ν дают сегменты, отвечающие большим отклонениям $F^2(\nu, s)$, а при отрицательных доминируют вклады малых флуктуаций.

Самоподобное поведение, означающее наличие дальнедействующих степенных корреляций, представляется степенной зависимостью моментов (3), (4):

$$F_q(s) \propto s^{h(q)}. \quad (5)$$

При фиксированном значении q эта зависимость в двойных логарифмических координатах представляет собой прямую линию. При больших значениях s зависимость $F_q(s)$ не имеет статистической информативности, поскольку число сегментов N_s , используемых в процедуре усреднения (3), (4), становится малым. При обработке ряда нужно исключить значения $s > N/4$, а также малые сегменты ($s < 6$), для которых теряет статистическую достоверность усреднение (1), (2) по каждому из сегментов.

Если ряд экспериментальных данных является монофракталом, то обобщенный показатель Херста $h(q)$ в равенстве (5) принимает единственное значение $h(q)=H$. В случае мультифрактального ряда показатель h зависит от q . Для стационарных рядов $h(0)$ определяет топологическую размерность пространства, содержащего фрактальное множество, $h(1)$ – меру его беспорядка, $h(2)$ – показатель дальних корреляций.

В рамках стандартной фрактальной идеологии используется не только обобщенный показатель Херста $h(q)$, но массовый показатель $\tau(q)$ и мультифрактальный спектр $f(\alpha)$. Этот переход достигается преобразованиями Лежандра:

$$\tau(q) = qh(q) - 1, \quad (6)$$

$$\alpha = \tau'(q), f(\alpha) = q\alpha - \tau(q). \quad (7)$$

Для монофрактальных объектов функция $\tau(q)$ является прямолинейной зависимостью, которая с переходом к мультифракталам выгибается, сохраняя прямолинейные участки. Наиболее ярко строение самоподобного объекта представляется формой мультифрактального спектра $f(\alpha)$, ширина которого дает набор фрактальных размерностей. Для монофракталов функция $f(\alpha)$ имеет δ -образную форму.

Программная реализация метода мультифрактального анализа выполнена в среде Octave.

На рис. 4-7 показаны результаты, полученные при исследовании трещиноватой структуры для $\text{density}=0,7$.

На рис. 8-11 показаны результаты, полученные при исследовании трещиновато-пористой структуры для $\text{density}=0,4$.

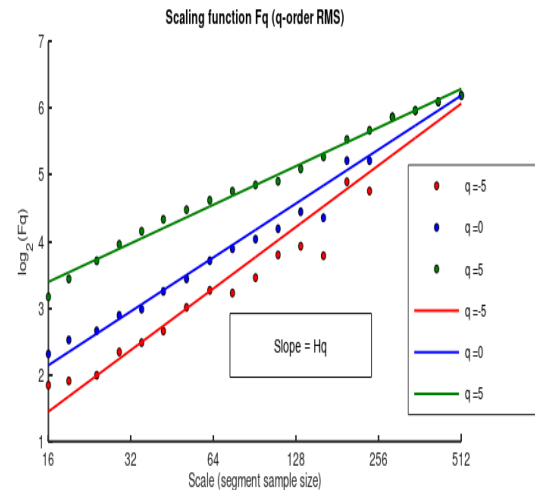


Рисунок 4 – Функция скейлинга для $\text{density}=0,7$

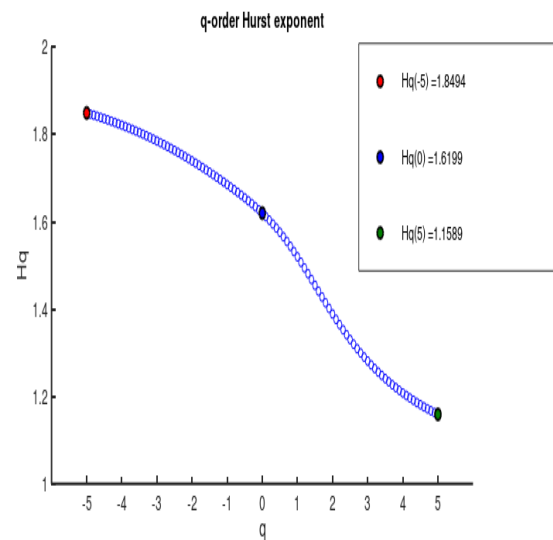


Рисунок 5 – Экспонента Херста для $\text{density}=0,7$

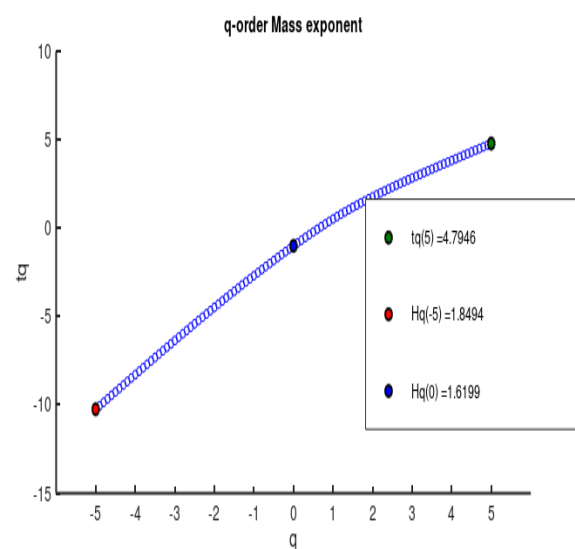


Рисунок 6 – Массовая экспонента для $\text{density}=0,7$

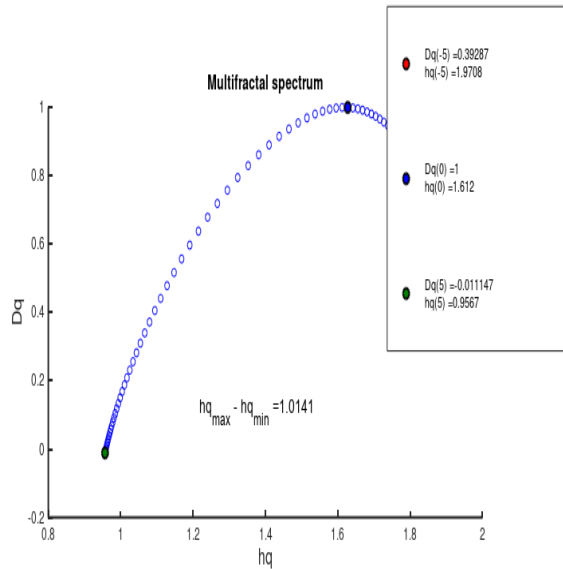


Рисунок 7 – Мультифрактальный спектр для $density = 0,7$

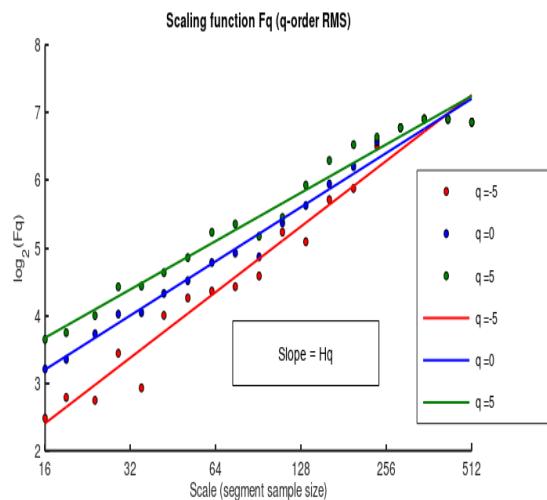


Рисунок 8 – Функция скейлинга для $density = 0,4$

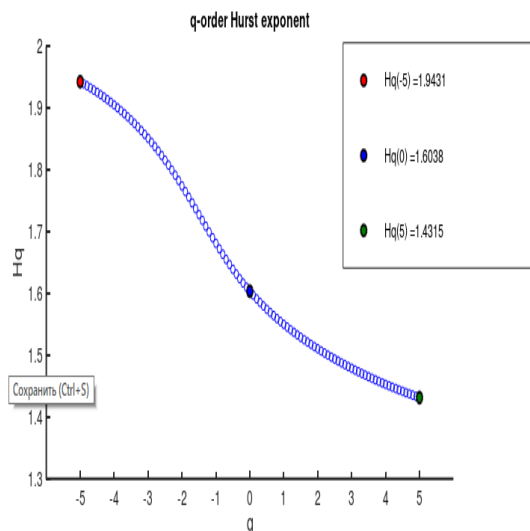


Рисунок 9 – Экспонента Херста для $density = 0,4$

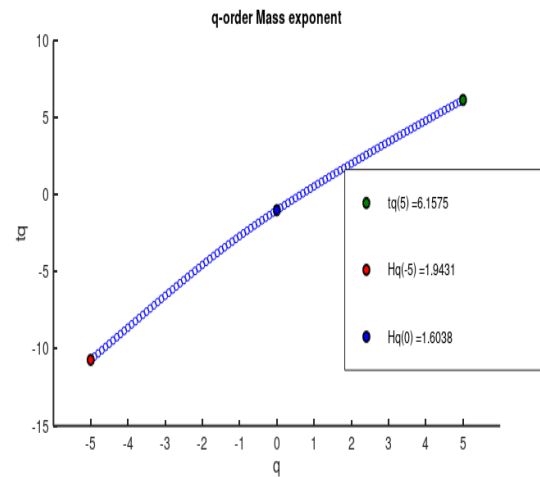


Рисунок 10 – Массовая экспонента для $density = 0,4$

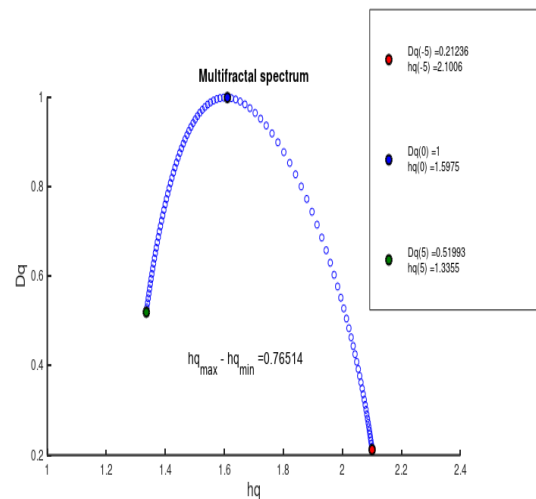


Рисунок 11 – Мультифрактальный спектр для $density = 0,4$

Выводы

1. Разработана BML-модель пустотной структуры угольного пласта.
2. Программная реализация модели выполнена в среде программирования R.
3. При работе программы в зависимости от параметра $density$ получены следующие результаты: на интервале изменения $density$ от 0,1 до 0,3 пласт имеет пористую структуру, на интервале изменения $density$ от 0,4 до 0,6 пласт имеет кластерную трещиновато-пористую структуру, на интервале изменения $density$ от 0,7 до 0,9 пласт имеет трещиноватую структуру.
4. Выполнен мультифрактальный анализ пористой и трещиновато-пористой структур угольного пласта, полученных с помощью BML-модели. Получены следующие результаты: при трещиноватой структуре мультифрактальный спектр шире, чем при трещиновато-пористой структуре.

Литература

1. Прогрессивные технологические решения по комплексному освоению ресурсного потенциала угольных месторождений: монография / В. В. Мельник, В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин и др. ; // под общ. ред. В. В. Мельника, В. Н. Павлыша ; Донецк : ВИК, 2015. – 340 с.
2. Геомеханическое обоснование рациональных технологических решений по управлению состоянием массива горных пород при подземной добыче угля: монография / В. В. Мельник, В. Н. Павлыш, С. С. Гребенкин и др. ; // под общ. ред. В. Н. Павлыша, В. В. Мельника. – Донецк : ВИК, 2015.–327 с.
3. Павлыш, В. Н. Исследование процесса напорной фильтрации жидкости в анизотропной среде методом математического моделирования (на примере увлажнения угольного пласта) / В. Н. Павлыш, И. В. Тарабаева // Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки. – ГОУВПО «ДонНУ», 2017. – № 2. - С.75-83.
4. Булат, А. Ф., Дырда, В. И. Фракталы в геомеханике. / Монография. – Киев: «Наукова думка», 2005. – 358 с.
5. Математические модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы / В. Н. Павлыш, Л. А. Лазебная // Проблемы искусственного интеллекта, 2019. - № 2(13). – С. 4-13.
6. Лазебная, Л. А. Принципы формирования математической модели процесса

гидравлического воздействия на угольный пласт с учетом особенностей его структуры и управления параметрами. // Информатика и кибернетика. - Донецк, ДонНТУ, 2020.– № 2 (20). - С. 40–47.

7. Применение фрактального подхода и теории перколяции при исследованиях ископаемых углей. [Электронный ресурс] / А. В. Астахов, А. А. Белый, В. И. Минаев, А. В. Подыногина, Д. Л. Широчин. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-fraktalnogo-podhoda-i-teorii-perkolyatsii-pri-issledovaniyah-iskopaemyh-ugley>

8. Малинников, В.А. Мультифрактальный подход к описанию структур пространственной самоорганизации сложных природных систем и его применение для описания поверхностной структуры углей и оценки предрасположенности их к внезапным выбросам. [Электронный ресурс] / В. А. Малинников, О. Н. Малиникова, Д. В. Учаев. – Режим доступа: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/3718?show=full>

9. Kantelhardt, J.W., Zschiegner S.A., Koscielny-Bunde E., Bunde A. Multifractal Detrended Fluctuation Analysis of Nonstationary Time Series. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/physics/0202070.pdf>

10. Долгушин, Д. Ю., Мызникова Т. А. Применение клеточных автоматов к моделированию автотранспортных потоков. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://b-ok.org/book/3255641/dc8bb3>

Павлыш В.Н., Перинская Е.В., Бельков Д.В. Моделирование пустотной структуры угольного пласта. На характере движения жидкости сказываются все свойства угольного пласта как фильтрующей среды. Для исследования течения жидкости в неоднородной среде угольного пласта необходимо использовать модель его пустотной структуры, предложенную в статье. В основу разработки модели положены следующие предположения. Трещины и поры соединяются между собой микропорами. Микропоры являются ответвлением от крупных пор. Исследования фильтрации и капиллярного равновесия, визуальные и микроскопические наблюдения, основанные на этих предположениях, привели к представлениям о пустотной структуре угля, как трещиновато-пористой блочной среде. Эта среда имеет иерархический характер.

Ключевые слова: пустотная структура угольного пласта, самоподобие, модель BML (Biham-Middleton-Levine).

Pavlysh V.N., Perinskaya E.V., Belkov D.V. Modeling of the void structure of the coal seam. The nature of the fluid movement is affected by all the properties of the coal seam as a filter medium. To study the flow of a liquid in a heterogeneous environment of a coal seam, it is necessary to use the model of its void structure proposed in the article. The development of the model is based on the following assumptions: micropores interconnect Cracks and pores. Micropores are an offshoot of large pores. Studies of filtration and capillary equilibrium, visual and microscopic observations based on these assumptions, led to ideas about the hollow structure of coal as a cracked-porous block medium. This environment is hierarchical environment.

Keywords: hollow structure of the coal seam, self-similarity, BML model (Biham-Middleton-Levine).

Статья поступила в редакцию 25.11.2022

Рекомендуется к публикации профессором Зори С. В.