

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закрытые поры ископаемых углей / А. Д. Алексеев, В. В. Синолицкий, Т. А. Василенко [и др.] // ФТПРПИ, 1992. – № 2. – С. 99 – 106.
2. Van Krevelen D. W. Coal-typology, chemistry, physics, constitution. (Third completely revised ed.) / D. W. Van Krevelen // Amsterdam: Elsevier, 1993. – 1000 p.
3. Alexeev A. D. Alternation of methane pressure in closed pores of fossil coals / A. D. Alexeev, E. P. Feldman, T. A. Vasilenko // Fuel. – 2000. – Vol. 79, N.8. – P. 939 – 943.
4. Alexeev A. D. Closed porosity in fossil coals / A. D. Alexeev, T. A. Vasilenko, E. V. Ulyanova // Fuel. – 1999. – V. 78, N. 6. – P. 635 – 638.
5. Mingju Liu. Electromagnetic response of outburst-prone coal / Liu Mingju, He Xueqiu // International Journal of Coal Geology. – 2001. – V. 45. – P. 155 – 162.
6. Электромагнитное воздействие на угольный пласт для активации процесса дегазации / А. Д. Алексеев, А. К. Кириллов, А. Г. Мнухин, А. М. Брюханов // Физико-технические проблемы горного производства, 2006. – № 9. – ИФГП, Донецк. – С. 5 – 19.
7. Алексеев А. Д. Численное моделирование выхода метана из угля с учетом волны разгрузки и раскрытие пористости при изменении напряжений / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, А. Э. Филиппов // В сб. Проблеми гірничого тиску. – Вып. 9. – Донецк : ДонГУ. – 2003. – С. 120 – 151.
8. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов / А. Д. Алексеев. – К. : Наукова думка, 2010. – 425 с.
9. Обработка выбросоопасных пластов водным раствором ПАВ / А. Д. Алексеев, Г. П. Стариков, М. Г. Малюга, О. С. Аносов. – К. : Техника, 1988. – 84 с.

УДК 552.122:552.574:514.8

Д-р геол.-минерал. наук В. В. Лукинов,
м.н.с. В. И. Барановский,
д-р геол. наук Л. И. Пимоненко
(ИГТМ НАН Украины),
главный геолог Л. Д. Кузнецова
(«Укруглегеология»)

ФРАКТАЛЬНОСТЬ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЯ

Розглянуте вугілля різних пластів (марки Ж), яке було відібране з непорушених ділянок різних пластів шахт Донбасу. По чисельних характеристиках дисперсного складу і форми мікрочасток в діапазоні від 0-1000 мкм. проведений розрахунок фрактальної розмірності мікроструктури вугілля. Запропонована фрактальна модель мікроструктури вугілля.

FRACTALITY OF COAL MICROSTRUCTURE

Coal, selected from unstrained zones of varied seams (Fat 60 als) from Donbas mines, were examined. According to the computational characteristics of the dispersed composition and shapes of microparticles over the range 0 – 1000 m analyse of Fraktal dimension of the coal microstructure was done. Fraktal model of coal microstructure was offered.

Теория фракталов и ее приложения широко используются в геологии. Практическое значение теории, заключается в том, что полученные результаты позволяют строить модели и формировать гипотезы о возможных механизмах генезиса изучаемых объектов. Согласно существующей на сегодня классификации [1], фрактальные объекты разделяются на два основных типа: детерминистические и стохастические. К детерминистическим фрактальным объектам относятся те, которые точно конструируются на основе некоторых базовых законов. Для них характерны неограниченные интервалы самоподобия и возможность точного расчета фрактальной размерности. Стохастические фракталы порождаются в результа-

те беспорядочных случайных процессов. Они характерны для сложных природных систем, возникающих под действием многих физико-химических процессов [2]. Исходя из этого фрактальность структуры Донецкого бассейна угольного является интереснейшим объектом исследований.

Проведенными ранее работами в Донецком бассейне [3, 4] установлена фрактальность разрывных дислокаций на различных масштабных уровнях от крупно-амплитудных разрывов (амплитуда сотни метров) до надмолекулярных структур ископаемых углей (глобул, фибрилл). Отмечено, что фрактальная размерность в определенных интервалах масштабных измерений отличается. Это позволило сделать вывод о различии генетических механизмов, обусловивших появление дислокаций в каждом из интервалов.

Однако, так как в настоящее время органическое вещество и его структура стали рассматриваться как один из основных факторов, определяющих течение разнообразных механических, химических, физических и других процессов, влияющих на особенности газоносности угольных месторождений, то появилась необходимость более детального исследования фрактальности микроструктуры угля.

В основу предлагаемой фрактальной модели положены представления о формировании угля в неравновесных термодинамических условиях (под действием гравитационных и тектонических сил, химических и биохимических процессов). При превращении исходного растительного вещества в уголь основными механизмами, влияющими на процесс формирования микроструктуры угля, являются: полимеризация, агрегация диффузия и механическое воздействие. По мнению большинством исследователей [5, 6]¹. органическое вещество углей (имеется в виду преобладание микрокомпонентов витринита) является природным высокомолекулярным соединением, построенным по типу сополимеров. Оно представляет собой полимерное сочетание конденсированных ароматических слоев, связанных углеродными цепочками. Состоящие из регулярно или нерегулярно чередующихся звеньев угольные полимеры могут быть линейными, разветвленными или связанными в неправильные пространственные сети, но сходными по общему плану строения: основная часть углерода образует циклические (ароматические, гидроароматические) структуры; остальной углерод (алифатический) присутствует в виде цепей, несущих различные функциональные группы. Из множества макромолекул, в которых главной структурной единицей являются гексагональные сетки углеродных атомов, образуются пачки, ламели, турбостратные «кристаллиты» [6], которые в результате действия различных сил и процессов на протяжении длительного времени соединяясь и разрастаясь, формируют микроструктуру угля. В целом химическое строение угля представляется в виде стойкого каркаса графитоподобных высокодиспергированных «кристаллитов», взаимноувязанных своеобразной менее стойкой бахромой из боковых углеродистых и метоксильных радикалов, являющихся связывающими структурными перемычками. Исходя из этого, любую микрочастицу, состоящую из N «склеенных» пачек (ламелей, турбостратных «кристаллитов»), можно рассматривать, как самоподобное множество,

¹ Зная спорность представлений о структуре органического вещества и ее преобразованиях, авторы не претендуют на однозначность модели

образованное в результате полимеризации (агрегации). При этом множество гексагональных сеток ароматического углерода, уложенные в пакеты с параллельным их расположением, являются структурными единицами (кластерами), определяющими форму и размеры микрочастиц в угле. Предложенная модель микроструктуры угля предполагает подобную форму частиц и различные их размеры, зависящие от степени метаморфизма угля и геодинамических условий их образования (разрушения).

Исходя из того, что при дроблении уголь распадается на мелкие частицы, расчет фрактальной размерности микроструктуры угля базировался на численных характеристиках дисперсного состава и формы микрочастиц в диапазоне от 0 - 1000 мкм.

Исследование микроструктуры угля проводилось по пробам из ненарушенных участков угольных пластов шахт:

- проба 1 – пласт m_3 , 18-ая восточная лава шах. им. А. Ф. Засядько;
- проба 2 – пласт h_7 (h_6^1) шахты им. А. А. Скочинского;
- проба 3 – пласт m_3 , 17-ый западный конвейерный штрек шахты им. А. Ф. Засядько.

Петрографические исследования проводились на видеооптическом комплексе (МБИ - 11, НВ 200, ПК). Установлено, что угольное вещество пласта представлено, в основном, мацералами группы витринита (95 %); инертинита (3 – 4 %) в виде микринита (Imi), и фюзинита (If), который располагается по плоскостям напластования между гелифицированными слойками. Липтинит (1 – 2 %) встречается редко, как отдельные микроспоры и обрывки макроспор. Очевидная однородность состава свидетельствует о подобию термодинамических условий в процессе формирования пласта по площади шахты.

В настоящее время для изучения дисперсного состава проб наиболее часто применяются следующие показатели: площадь; периметр; диаметр (расстояние между двумя касательными на противоположных сторонах частицы, перпендикулярными направлению, в котором рассматривается частица).

Проанализировать информативность этих показателей для характеристики дисперсного состава угольных проб позволяет метод цифровой обработки микрофотографий препаратов различной степени измельченности. Суть его заключается в следующем:

- угольная проба подготавливается к исследованиям по ГОСТ 9414.2-93;
- при помощи видеооптического комплекса с поверхности аншлиф-брикета делается микрофотография приготовленной пробы

Затем, при помощи программы Image J (Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA), микрофотографии переводятся в бинарный режим (рис. 1) и автоматически рассчитываются показатели дисперсного состава и формы частиц (табл. 1).

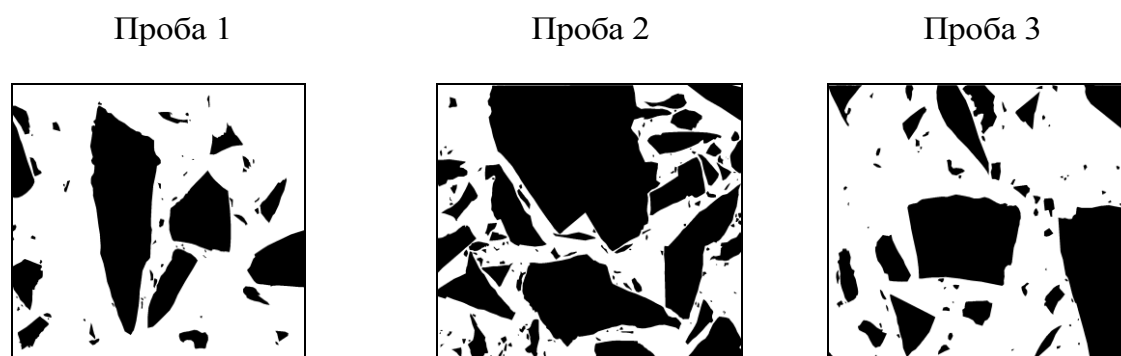


Рис. 1 – Бинарный режим микрофотографии размеров и форм угольных частиц подготовленных проб

Между показателями дисперсного состава проб, отобранных из различных ненарушенных участков различных пластов одного марочного состава, высокие коэффициенты корреляции (табл. 2, рис. 2).² Это, свидетельствует о том, что размеры микрочастиц углей пластов подобны и образованы под действием одинаковых (по величине и направлению) геодинамических процессов.

Таблица 1 – Показатели дисперсного состава и формы частиц ненарушенных углей

Размер частиц, мкм	Номера проб	Кол-во	%	Площадь (S), нм	Периметр (L), нм.	Диаметр Ферета (DF), нм	Circularity (C)
0-1000	1	66	100	5359	177	68	0,606
	2	136	100	5388	170	65	0,614
	3	78	100	5492	179	66	0,635
0-10	1	26	39,4	50	29	12	0,703
	2	53	39	42	26	11	0,728
	3	22	28,2	47,9	28,3	11,2	0,736
10-20	1	18	27,3	208	69	28	0,561
	2	43	32	600	112	40	0,596
	3	31	39,7	225,9	67	26,7	0,625
20-30	1	6	9,1	612	122	50	0,533
	2	7	5,1	600	112	40	0,596
	3	5	6,4	649,2	119,9	45,2	0,571
30-40	1	3	4,5	1209	169	63	0,533
	2	8	5,9	1195	175	70	0,503
	3	1	1,28	1288	154,7	58	0,676
40-50	1	1	1,5	2089	318	136	0,259
	2	2	1,5	1829	200	76	0,593
	3	4	5,13	1895	205	73	0,575
50-60	1	1	1,5	3319	317	129	0,414
	2	1	0,7	2648	391	182	0,217
	3	1	1,28	3532	362	167	0,337
	1	1	1,5	4445	306	122	0,597

² Так как размеры частиц изменяются в определенном диапазоне, то отсутствие частиц с размерами 90-100 в пробе 1 является случайным.

Продолжение табл. 1

Размер частиц, мкм	Номера проб	Кол-во	%	Площадь (S), нм	Периметр (L), нм.	Диаметр Ферета (DF), нм	Circularity (C)
60-70	2	5	3,7	4482	352	139	0,471
	3	1	1,28	4476	306	109	0,598
70-80	1	1	1,5	5474	361	129	0,526
	2	1	0,7	6324	428	163	0,434
	3	3	3,85	5594	360	133	0,542
80-90	1	3	4,5	7629	443	159	0,491
	2	4	2,9	6628	421	160	0,485
	3	1	1,28	7946	373	134	0,715
90-100	1	-	-	-	-	-	-
	2	1	0,7	8392	446	142	0,529
	3	2	2,56	9094	535	180	0,411
100-1000	1	6	9,1	50522	964	367	0,588
	2	1	0,7	58115	1068	395	0,472
	3	7	8,9	51040	929	337	0,578

Показатель Circularity характеризует форму частиц ($4\pi S / L^2$), чем меньше этот показатель, тем больше форма частицы отличается от формы круга и тем более неровные очертания частиц) (табл. 2). Очевидно, что для ненарушенного угля форма различных по размеру частиц одинакова (средняя величина 0,52). Это, в соответствии с предложенной фрактальной моделью, логично объясняется тем, что основой микрочастиц являются самоподобные множества гексагональных сеток ароматического углерода, уложенных в пакеты с параллельным их расположением.

Таблица 2 – Корреляция между показателями дисперсного состава проб ненарушенных углей

Площадь	S3	S1	S2	Диаметр Ферета	DF3	DF1	DF2
S 3	1,00			DF3	1,00		
S 1	0,98	1,00		DF1	0,80	1,00	
S 2	1,00	0,99	1,00	DF2	0,98	0,89	1,00
Периметр	L3	L1	L2	circularity	C 3	C 1	C 2
L 3.	1,00			C 3	1,00		
L 1	0,79	1,00		C 1	0,63	1,00	
L 2	0,99	0,87	1,00	C 2	0,68	0,19	1,00

Определение законов распределения показателей дисперсного состава проводилось известными методами математической статистики. Установлено, что распределение показателей площади (S), периметра (L), диаметра Ферета (ДФ) наиболее близко к логнормальному закону. Гипотеза о согласованности эмпирического распределения с логнормальным законом проверялась графическим способом. На логнормальную вероятностную бумагу по оси X выносились величины, характеризующие величины показателей в определенных интервалах Y_i . На рисунке 3 показан график изменения площади микрочастиц ($\log S$) в зависимости от

размера ($\log \delta$), близость точек к прямой свидетельствует о логнормальном законе распределения, которое характерно для масштабно-инвариантного процесса дробления [8].

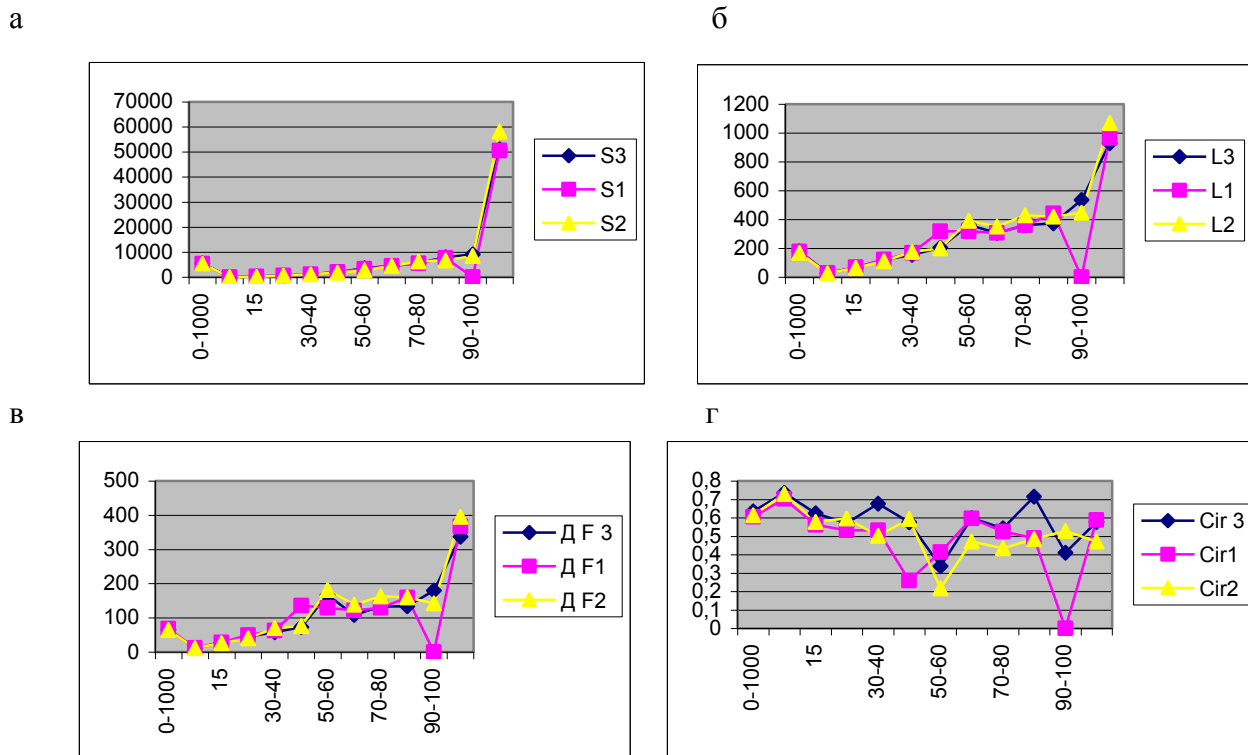


Рис. 2 – Графики изменения показателей дисперсного состава и формы частиц ненарушенных углей: а) по площади (S), б) по периметру (L), в) по диаметру Ферета (ДФ), г) показателю Circularity (C) в зависимости от размеров

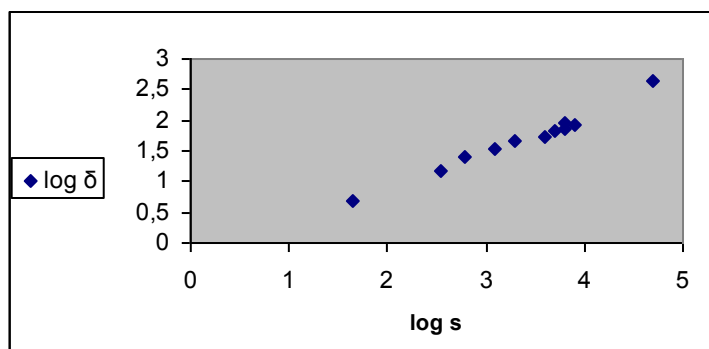


Рис. 3 – График изменения площади микрочастиц ($\log S$) в зависимости от размера ($\log \delta$)

В работе [9] показано, что законы распределения показателей многих геологических характеристик связаны с процессами их формирования. В приложении к проводимым исследованиям это может означать, что законы распределения показателей дисперсного состава обусловлены геодинамическими процессами, под действием которых сформировались угли пласта. Логнормальное распределение может возникнуть, если случайные воздействия не аддитивны (независимы), а мультипликативны (взаимно влияют друг на друга). Теоретически большинство

случайных воздействий перемноженных вместе дают промежуточное значение произведения, близкое к геометрическому среднему (нормальное распределение). В редких случаях при случайном выборе влияние всех факторов может оказаться очень малыми, и их произведение будет стремиться к нулю. Так же редко их влияние может оказаться очень большим, и тогда их произведение будет экстремально большим. При логнормальном распределении в результате многих и случайных реализаций получается очень большое количество малых частиц и немного «избранных» больших зерен. Часто этот закон называют «закон пропорционального воздействия», состоящий в том, что изменение переменной в течение процесса есть случайная величина, пропорциональная исходному значению этой переменной. Применительно к распределению микрочастиц в угле это может означать, что большие микрочастицы стремятся к агрегации больше чем малые.

По данным [10] логнормальный закон характерен «для частот (или весовых коэффициентов) появления частиц данного размера в некоторых осадочных породах», по данным [8] логнормальный и степенной законы отражают «особенности образования и распределения частиц мелких фракций породы в естественных зонах интенсивного пластического деформирования и разрушения пород - в катакластических зонах тектонических разломов» и сделан вывод о фрактальности частиц. В работах [1, 2, 8] показано, что логнормальный закон распределения свидетельствует о фрактальной природе объекта. Следовательно на основании полученных данных и учетом литературных данных, можно сделать вывод о фрактальности микроструктуры угля.

Фрактальная размерность D [2] определялась по углу наклона графиков функций $\log S$ (L , ДФ), где по оси абсцисс в качестве аргумента принят логарифм размера частиц ($\log \delta$). Величины фрактальных размерностей показателей изменяются в пределах 1,6 – 1,9. Но на построенном графике (рис. 3) можно провести две прямые, наименее уклоняющиеся от экспериментальных данных и пересекающиеся в точке 1,6 x 3,3 (размер частиц 40 – 50 мкм). Можно предположить, что фрактальная размерность частиц больше и меньше 40 – 50 мкм изменяется: для частиц меньше 40 мкм $D = 1,6$; больше 50 мкм $D = 1,89$. Это связано с тем, что реальная структура угля представляет собой совокупность конечного числа частиц, каждая из которых в исследуемых пределах имеет две естественные величины площади S_{\min} и S_{\max} . Структуры, являющиеся суммой множеств с различной топологической размерностью называются неоднородными фракталами. Такие объекты могут быть самоподобны в интервале масштабов примерно пяти порядков [1], что согласуется с полученными данными. Нижний предел связан с конечным размером частиц, видимых под микроскопом, верхний – со стремлением частиц создать более крупные участки углеродных сеток. Во-первых, это отражает неоднородность объекта, во-вторых, указывает на влияние (или преобладание какого либо) различных факторов, действующих на генезис этих множеств.

Возможно: на стадиях гумификации и диагенеза (глубина до 1 км) преобладающую роль в образовании пачек гексагональных атомных сеток ароматического углерода играли биохимические процессы. Они обусловили более -менее равномерное распределение (в объеме угольной массы) небольших по величине пачек («кристаллитов»). В дальнейшем, на стадии метаморфизма, основными фак-

торами, влияющими на формирование структуры угля, являлись температура и давление. При этом преобразование органического вещества, происходит за счет агрегации сеток ароматического углерода, и, в большей мере, связано с физическими, химическими и механическими изменениями (уплотнение, обезвоживание).

Таким образом, фактические данные, полученные при анализе дисперсного состава проб (логнормальный закон распределения площади микрочастиц угля, корреляция между показателями дисперсного состава, статистические параметры показателей), не противоречат предложенной фрактальной модели микроструктуры угля. Из этого вытекает, что с одной стороны, органическое вещество не является случайной смесью различных полимеров органического вещества, а представляет собой сочетание комплекса соединений со строгими соотношениями элементов, с другой - расположение различных микрочастиц в объеме угольного пласта фрактально.

В результате проведенных исследований установлено:

– угли различных пластов (одинаковой степени метаморфизма – марки Ж), отобранные из ненарушенных участков, характеризуются подобными показателями дисперсного состава и формы микрочастиц угля:

1) высокие коэффициенты корреляции между показателями дисперсного состава свидетельствуют о единой структуре и термодинамических условиях формирования пласта;

2) для ненарушенных образцов форма различных по размеру частиц одинакова (средняя величина 0,52), что объясняется генетическими условиями образования микрочастиц в угле;

– предложена фрактальная модель микроструктуры угля, в соответствии с которой множество гексагональных атомных сеток ароматического углерода, представляющие собой основу органического вещества угля, уложенные в пакеты с параллельным их расположением являются мономерами кластеров микрочастиц угля и определяют их форму, а геодинамические условия – размеры;

– распределения показателей дисперсного состава подчиняются логнормальному распределению, которое отвечает масштабно-независимому процессу дробления и позволяет предположить фрактальность микроструктуры угля в исследуемом масштабе (0 – 1000 мкм). Построены графики распределения и рассчитаны фрактальные размерности показателей, которые находятся в интервале 1 – 2 ($D = 1,6 - 1,9$);

– микроструктура угля является неоднородной и в исследованном диапазоне размеров частиц (0 – 1000 мкм) состоит из двух множеств, что предполагает действие различных факторов, образовавших эти множества. Границей множеств являются частицы величиной 40 – 50 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов В. А. Фрактальная размерность наночастиц / В. А. Дроздов, В. В. Ковальчук, С. Л. Моисеев // Физика аэродисперсных систем. – 2002. – № 39. – С.55 – 67.
2. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
3. Булат А. Ф. Фрактальная природа углепородных массивов / А. Ф. Булат, В. В. Лукинов, В. В. Репка // Уголь Украины, 1993. – № 9. – С. 37 – 38.
4. Лукинов В. В. Тектоника метаноугольных месторождений Донбасса / В. В. Лукинов, Л. И. Пимоненко. – К. : Наукова думка, 2008. – 350 с.

5. Каргин В. А. Краткие очерки по физико-химии полимеров / В. А. Каргин, Г. Л. Слонимский. – Изд-во МГУ, 1952. – 148 с.
6. Касаточкин В. И. Строение и свойства природных углей / В. И. Касаточкин, Н. К. Ларина. – М. : Недра, 1978. – 218 с.
7. Уголь каменный и антрацит. Методы петрографического анализа. Метод подготовки образцов. // ГОСТ 9414.2 – 93 (ИСО 7404 – 85) / Межгосударственный стандарт. – Часть 2. – Минск : Изд-во стандартов, 1995. – 10 с.
8. Техногенные минеральные наночастицы как проблема освоения недр / К. Н. Трубецкой, С. Д. Викторов, Ю. П. Галченко, В. Н. Одинцов // Вестник РАН, 2006. – том 76. – С. 318 – 332.
9. Закс Л. Статистическое оценивание (пер. с нем.) /Л. Закс.– М. : Недра, 1965.– 598 с.
10. Крамбейн У. Статистические модели в геологии / У. Крамбейн, Ф. Грейбилл. – М. : Мир, 1969. – С. 11 – 95.

УДК 622.831

Канд. техн. наук И. А. Ефремов
(АП «Шахта им. А. Ф. Засядько»),
д-р техн. наук В. Г. Перепелица,
канд. техн. наук Л. Д. Шматовский,
канд. техн. наук А. Н. Коломиец,
вед. инж. О. И. Ананьева
(ИГТМ НАН Украины)

ОРИЕНТАЦИЯ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН С УЧЕТОМ РАЗНОКОМПОНЕНТНОСТИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ШАХТЫ ИМ. А.Ф. ЗАСЯДЬКО

Викладені результати експериментального визначення чисельних значень і просторового напрямку головних складових діючого поля напружень в вуглепородному масиві пласта l_1 методом ЛГР з метою обґрунтування орієнтації дегазаційних свердловин.

ORIENTATION OF THE DEGASING HOLES WITH DUE REGARD OF A VARIETY OF A WORKING FIELD OF PRESSURE OF MINES NAMED A.F. ZASJADKO

Results of experimental definition of numerical values and spatial orientation of the main components of a working field of pressure in the coal rock of a seam l_1 by method (LHB) with the purpose substantiation of the orientation of the degasing holes are adduced.

На основе анализа экспериментальных данных, приведенных в работе [1], установлено, что фильтрационные свойства околоконтурной части газоносных пород в значительной степени зависят от ориентации скважин относительно главных компонент внешних напряжений.

Для сопоставительной оценки изменения напряженно-деформированного состояния приконтурной части измерительных скважин от пространственной ориентации их в разнокомпонентном поле напряжений авторами [1] выполнен расчет применительно к условиям шахты им. А. А. Скочинского. Рассмотрены три взаимно ортогональные скважины диаметром 4,8 см, пробуренные в направлении главных составляющих внешнего поля напряжений. Принято, что донные части скважин удалены на расстояние, исключаящее влияние контуров горных выработок. За исходные приняты численные значения напряжений, измеренных методом локального гидроразрыва: $\sigma_x = 60$ МПа, $\sigma_z = 30$ МПа, $\sigma_y = 24$ МПа (табл. 1). Для сопоставления рассмотрено напряженно-деформированное