

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ,  
ИЗМЕНЧИВОСТИ И РАЗБРОСА ПРОЧНОСТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЯ**

Розглянуто питання оцінки статистичної неоднорідності, мінливості та розкиду характеристик міцності вугілля.

**THE STATISTICAL VALUATION OF THE HETEROGENEITIES,  
VARIABILITY'S AND SPREADS OF THE COAL'S STRENGTH  
CHARACTERISTICS**

The questions of the estimation of the statistical heterogeneities, variability's and spreads of the coal's strength characteristics were considered.

Как осадочная горная порода, каменный уголь относится к аморфному строению и является анизотропным твердым телом. Вместе с тем каменный уголь представляет собой твердое тело, обладающее большим сопротивлением деформациям сжатия. Отдельные пласты каменного угля обладают большой силой взаимного сцепления. Другие, структурно нарушенные, состоят из разнообразных по размеру отдельностей, скрепленных силами сцепления в отдельных точках, плоскостях или поверхностях, прочность которых существенно ниже. Каменный уголь, в основном, относится к хрупким телам, что вполне соответствует их внутреннему строению, обладающим в известной степени плотностью и пористостью. Кроме пористости угля, в нем, в той или иной мере, имеются трещины, в окрестности которых при нагружении концентрируются напряжения.

В работах М.М. Протоद्याконова [1,2] отмечалось, что уголь, как объект разрушения, весьма сложен и неоднороден в куске, пачке и особенно в пласте. Полосчатое строение многих углей влечет за собой разные механические свойства в каждой полоске. Прочностные связи варьируют от вязких до хрупких и колеблются даже в двух его смежных кусках. В углях встречается много твердых включений, крепость которых во много раз выше крепости самого угольного вещества. Куски угля представляют собой разножесткие и сильно разнопрочные агрегаты, прочность которых можно оценивать только статистическим путем. Куски, пачки и пласт, как правило, разбиты несколькими системами трещин и слабыми прослойками, по которым легче всего происходит разрушение.

Вариации коэффициента крепости ( $f$ ) в забое по длине лавы, замеренные, например, у подошвы, у кровли и по середине мощности пласта Кизеловского бассейна, весьма значительны и здесь, без представления их в статистическом виде и применения случайных функций, не обойтись. Кроме того, из практики хорошо известны различия в нагрузках на добычный агрегат, связанных с неравномерной крепостью угля в различных пачках.

Прочность угля зависит от большого количества факторов (вязкость, хрупкость, трещиноватость, свойства структурных связей и т.д.), учесть изменение которых в пространстве и во времени невозможно. Поэтому прочность угля в пробе, куске, пачке и пласте необходимо представлять некоторым интегральным показателем, который неизбежно колеблется около некоторого среднего значения и может быть определен только приближенно.

Оценка прочностных свойств угля должна осуществляться на основе массовых испытаний с применением статистических методов, позволяющих вычислить среднее значение и коэффициент вариации (для выборок небольшого объема, порядка  $n < 30$ ) или же построить частотное распределение – вероятностный закон распределения прочности (для больших выборок, порядка  $n > 50$ ). Поскольку разброс прочности обусловлен в основном естественной неоднородностью углей, то излишняя точность измерительных приборов практически не влияет на статистические характеристики и для массовых замеров необходима грубая, но простая, аппаратура и высокопроизводительная методика испытаний.

Для точной оценки механических свойств угля нужно иметь, по крайней мере, столько показателей, сколько имеется основных влияющих факторов. Очевидно, что замерять эти свойства в забое, учесть их изменение в пространстве и во времени, построить теорию разрушения углей, базирующуюся на этих показателях, и пользоваться такой теорией представляет весьма сложную задачу, которая будет еще не скоро решена. В настоящее время придется базироваться на ограниченном числе показателей механических свойств угля. Каждый такой интегральный показатель, зависящий от сочетания нескольких переменных факторов, не может быть постоянным, а неизбежно будет колебаться около некоторого среднего значения.

Из изложенного выше, вытекает следующее:

- каждый показатель механических свойств угля может быть определен только приближенно;

- при оценке механических свойств угля обязательно потребуются проведение массовых замеров и применение статистических методов, позволяющих найти среднее значение показателя и его коэффициент вариации;

- при неизбежности усреднения колеблющихся показателей излишняя точность первичных замеров практически не влияет на величину средней, но приводит к усложнению измерительных приборов и повышению трудоемкости испытаний;

- для массовых замеров нужны грубые, но простые аппаратура и методика, обеспечивающие быстроту проведения испытаний.

Испытания на сжатие углей производилось в основном на образцах правильной формы. Получаемые результаты существенно зависели от формы и размеров образцов, условий испытаний. Кроме того, при испытании на сжатие образцов из одних и тех же углей наблюдается большое рассеяние данных в повторных испытаниях, что объясняется структурной неоднородностью, слоистостью и трещиноватостью углей.

По данным ряда исследований [3-5], коэффициент вариации показателей при испытании углей на одноосное сжатие колеблется в пределах от 11 до 24%, но может достигать и больших значений в связи с различными механическими свойствами углей, а также из-за непостоянства условий испытаний. Данные о сопротивляемости сжатию различных типов углей приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1 – Пределы прочности на сжатие Донецких и Подмосковных углей, полученные на образцах различного размера

Вид угля	Размеры образца, мм	Площадь образца, мм <sup>2</sup>	Направление нагрузки	$\sigma_{сж}$ , МПа
Донецкий	10 × 10	100	Поперек напластования	56
	9,8 × 10,5	103	Вдоль напластования	55
	37,7 × 36,2	1380	то же	27
	38,7 × 36,7	1420	" - "	33
	38 × 37,8	1440	" - "	23
	10 × 10	100	" - "	54
Подмосковный (первая партия)	14 × 14	196	Поперек напластования	16
	15 × 15	225	то же	12
	15 × 15	225	" - "	20
	15 × 15	225	" - "	25
	42 × 42	1764	" - "	7
	70 × 70	4900	" - "	10
	15 × 15	225	" - "	4
	15 × 15	225	Вдоль напластования	14
	42 × 42	1764	то же	21
	42 × 42	1764	" - "	5
Подмосковный (вторая партия)	10,5 × 11	111	Поперек напластования	6
	38 × 38,8	1475	то же	10
	51,8 × 50,8	2630	" - "	5
	48,8 × 49	2400	" - "	8
	70,5 × 70,8	4980	Вдоль напластования	8
	10 × 9,5	95	то же	4
	34,6 × 35	1210	" - "	5
	70 × 70	4900	" - "	5

Из таблицы следует, что прочность углей на одноосное сжатие колеблется в довольно широких пределах от 5 МПа (для углей коксовых марок) до 50 МПа (для антрацитов).

В Сибирском филиале ВНИМИ [6] были проведены лабораторные исследования углей мощных пластов (Мощного, Горелого IV, III и II Внутренних) с целью определения их прочностных свойств. Испытанию подвергались угли пластов. Всего было изготовлено 240 образцов. Определение прочностных свойств угля производилось путем одноосного сжатия образцов до разрушения. Образцы выполнялись в форме кубиков с размером ребра  $50 \pm 2$  мм.

Испытания показали, что даже в пределах одной пробы уголь неоднороден, причем максимальное значение временного сопротивления в ряде случаев оказывалось в 2-2,5 раза больше минимальных.

Таблица 2 – Временное сопротивление углей сжатию при испытании углей параллельно ( $\sigma_{сж}^II$ ) и перпендикулярно ( $\sigma_{сж}^I$ ) напластованию

Тип углей	Бассейн	Источник	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа		$\sigma_{сж}^I / \sigma_{сж}^II$
			$\sigma_{сж}^II$	$\sigma_{сж}^I$	
Антрацит	Донецкий	ДонУГИ	8,3	7,8	0,94
То же	то же	то же	11,5	20,2	0,94
« «	« «	Протодьяконов	15,1	23,4	1,55
« «	« «	Гришкова	8,0	7,0	0,88
« «	« «	Карпенко	28,4	30,0	1,06
« «	« «	Ильницкая	15,5	34,9	2,24
« «	« «	ВУГИ	5,5	15,0	2,72
Каменный уголь	« «	ДонУГИ	5,4	7,0	1,3
То же	« «	Песковатский	3,6	1,7	0,47
« «	« «	то же	4,6	4,8	1,05
« «	« «	Институт строительной механики АН УССР	1,0	1,6	1,55
« «	Кузнецкий	Шубин	6,5	7,6	1,17
« «	то же	то же	4,8	10,4	2,16
« «	« «	« «	21,2	2,5	1,18
« «	Восточная Сибирь	« «	4,8	7,0	1,45
« «	то же	« «	3,7	14,8	4,0
« «	Кузнецкий	Мурзин	22,6	27,2	1,23
« «	Карагандинский	КНИУИ	7,2	13,0	1,81
« «	то же	то же	5,4	9,0	1,76
Бурый, сапропелит	Подмосковный	Гвоздева	10,1	23,5	2,35
Бурый, гумиты полуматовые	то же	то же	6,3	11,5	1,82
Бурый гумиты матовые	« «	« «	7,7	12,5	1,63
Бурый, дюреновый	Подмосковный	Некрасов	11,0	15,0	1,36
Бурый, дюреновый окисленный	то же	то же	5,0	7,5	1,50
Бурый	« «	Ильницкая	8,8	12,2	1,39
То же	« «	Казак	11,6	17,2	1,48
« «	« «	Шемарин	5,0	10,0	2,00
« «	« «	Шмакин	6,5	10,3	1,59
« «	« «	то же	7,5	15,2	2,02

В некоторых пробах сопротивление сжатию углей пласта Мощного превышало 50 МПа, самые слабыми оказались угли пласта IV Внутреннего, прочность которых в редких случаях достигала 18 МПа. Прочность образцов этого угля колебалась в пределах 6-12 МПа. Коэффициенты вариации прочности временного сопротивления сжатию исследованных углей принимают довольно значительные значения.

Разрушение углей связано не только с деформированием породного материала. Угли содержат плоскости напластования, в которых часто имеются зоны сдвига на контактах, сбросы, трещины и другие разрывы сплошности. Все эти факторы определяют поведение углей, особенно более прочных, как при кратковременном, так и при длительном нагружении.

При нагружении, деформировании и разрушении горных пород ярко проявляются два специфических свойства массива горных пород:

- механическая ослабленность массива структурными нарушениями различного характера и происхождения;
- неоднородность слагающих массив пород.

Показатели прочности структурно-нарушенных углей наиболее представительны определяются прямым проведением натуральных испытаний. Выполнение таких испытаний обычно весьма трудоемко и дорого, поэтому к ним прибегают в особых случаях.

Литологическая неоднородность, выражающаяся в различии вещественных компонент и в количественном соотношении этих компонент, влечет за собой беспорядочную ориентированность структурных элементов и обуславливает стохастичный характер закономерностей и свойств массива. Стохастичность строения и механических свойств неоднородной породы ведет к статистически случайному различию этих свойств в различных точках залегания породы. Поэтому оценка прочности в достаточно больших объемах породы носит усредненный характер. Стохастические закономерности при испытании неоднородных пород имеют следующие особенности:

- размеры образцов должны быть достаточно велики, в сравнении со средними величинами размеров структурной неоднородности породы, и превышать их в 7-10 раз;
- испытаниям подвергается достаточное число образцов из одной пробы, чтобы отразить естественную вариацию свойств породы в соответствии с ГОС-Том [7];
- стохастическую неоднородность свойств угля следует отличать от пространственной изменчивости, которая более крупномасштабна, чем структурная неоднородность породы.

В этой связи имеет смысл различать показатели изменчивости прочности по месторождению от коэффициентов вариации прочности породных образцов в пределах одной породной пробы, отражающей неоднородность состава породы [8,9].

Неоднородность, изменчивость и разброс временного сопротивления сжатию углей хорошо иллюстрируются результатами исследований, выполненных

нами на протяжении последних 3-х лет (табл. 3). Несмотря на то, что исследования выполнены на углях одного региона – Западного Донбасса, характеризующегося достаточной выдержанностью пластов по мощности и углу залегания, а также относительной стабильностью прочностных показателей угля, тем не менее, отчетливо просматриваются существенные вариации всех физико-механических характеристик, причем не только в масштабах района, но и в пределах одного шахтопласта. В частности, полученные по этим данным статистические параметры, приведены в табл. 3.

Таблица 3 - Статистические характеристики прочности углей Западного Донбасса

Параметр	Значение параметра для пластов							
	C <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>
$\sigma_{сж}^{max}$ , МПа	51,0	60,0	48,6	56,8	52,1	45,0	50,8	43,4
$\sigma_{сж}^{min}$ , МПа	31,0	20,0	25,0	20,1	20,2	26,2	18,2	32,1
$\sigma_{сж}^{max}$ - $\sigma_{сж}^{min}$ , МПа	20,0	40,0	23,6	36,7	31,9	18,8	32,6	11,3
$\sigma_{сж}^{cp}$ , МПа	42,5	37,3	37,1	36,7	39,7	36,4	37,8	35,9
$S(\sigma_{сж})$ , МПа	7,9	11,5	6,9	10,2	8,5	7,4	8,8	6,7
$K_{вар}$ , %	18,6	30,8	18,7	27,9	21,5	20,4	23,3	18,6
$\sigma_{p\perp}^{max}$ , МПа	2,7	3,5	3,8	3,7	5,6	1,6	4,4	2,8
$\sigma_{p\perp}^{min}$ , МПа	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	1,1	1,6
$\sigma_{p\perp}^{max}$ - $\sigma_{p\perp}^{min}$ , МПа	1,7	2,5	2,8	2,7	4,5	0,6	3,3	1,2
$\sigma_p^{cp}$ , МПа	1,6	1,9	1,9	2,1	2,1	1,2	1,7	2,4
$S(\sigma_p)_{\perp}$ , МПа	0,75	0,74	0,82	0,6	1,2	0,24	0,9	0,7
$K_{вар}$ , %	46,9	38,7	43,3	28,0	57,1	19,7	52,6	29,5
$\sigma_{p\parallel}^{max}$ , МПа	5,8	7,5	6,7	7,0	11,1	5,2	7,6	4,5
$\sigma_{p\parallel}^{min}$ , МПа	2,9	2,1	3,7	2,5	2,0	2,9	2,0	3,2
$\sigma_{p\parallel}^{max}$ - $\sigma_{p\parallel}^{min}$ , МПа	2,9	5,4	3,0	4,5	9,1	2,3	5,6	1,3
$\sigma_p^{cp}$ , МПа	4,4	4,8	4,8	4,2	4,7	3,2	4,6	3,6
$S(\sigma_p)_{\parallel}$ , МПа	1,1	1,6	0,9	1,25	2,4	0,9	1,5	0,8
$K_{вар}$ , %	25,0	33,1	18,3	29,9	51,9	28,3	33,0	21,3
$A_{max}$ , кН/см	5,8	6,6	5,4	6,0	5,8	4,9	6,4	4,8
$A_{min}$ , кН/см	3,7	2,23	2,8	2,2	2,4	2,9	2,2	3,5
$A_{max} - A_{min}$ , кН/см	2,1	4,4	2,6	4,8	3,4	2,0	4,2	1,3
$A_{cp}$ , кН/см	4,8	4,5	4,1	4,1	4,0	4,2	4,5	3,9
$S(A)$ , кН/см	0,8	1,3	0,8	1,34	0,9	0,8	1,1	0,8
$K_{вар}$ , %	17,3	28,7	18,6	32,7	22,8	18,8	25,3	19,7

Выполненные исследования показали, что с увеличением степени метаморфизма, со снижением выхода летучих, твердость вещества углей возрастает, а трещиноватость сначала возрастает, а затем падает. Из-за этого малометаморфизованные угли являются средними по крепости, но вязкими; угли средней степени метаморфизации (благодаря сильной трещиноватости) – самыми слабыми, а сильно метаморфизованные антрациты – наиболее твердыми и крепкими.

Заклученный в угле газ снижает крепость углей и может приводить к их саморазрушению или к внезапному выбросу. Дегазация угольного пласта способствует повышению крепости угля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протодяконов М.М. Материалы для урочного положения горных работ [Текст] / М.М. Протодяконов. – М.: Изд. ЦК горнорабочих, 1926. – 184 с.
2. Протодяконов М.М. Теория резания угля цепными врубовыми машинами [Текст] / М.М. Протодяконов. – М.-Л.: ОНТИ, 1936. – 192 с.
3. Протодяконов М.М. Исследование хрупкости и вязкости углей [Текст] / М.М. Протодяконов // Разрушение углей и пород. – М.: Углетехиздат, 1958. – С. 47-82.
4. Маневич А.Д. Определение физико-механических свойств горных пород [Текст] / А.Д. Маневич // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1960. – № 5. – С. 23-27.
5. Посыльный В.Я. О физико-механических свойствах антрацитов Восточного Донбасса [Текст] / В.Я. Посыльный // Тр. Шахт НИУИ. – 1967. – Вып. 6. – С. 309-325.
6. Кусков Н.И. Некоторые результаты исследования физико-механических свойств углей применительно к изучению горного давления [Текст] / Н.И. Кусков // Вопросы горного давления: сб. тр. ИГД им. Скочинского. – 1963. – Вып. 16. – С. 40-48.
7. ГОСТ 22450-77. Угли бурые, каменные и антрациты. Методы определения прочности на растяжение и одноосное сжатие [Текст]. Введ. 01.01.78. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 18 с.
8. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. Справочник [Текст]. – М.: Недра, 1994. – 448 с.
9. Каталог показателей прочности и деформируемости породных образцов угольных месторождений [Текст]. – Л.: ВНИМИ, 1973. – 40 с.