

УДК 621. 83

*д.т.н. Бабиюк Г. В.
(ГУИТ, г. Киев, Украина),
Доценко О. Г.*

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, dotcenkoo@mail.ru)

ШАХТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАССИВА ОБРУШЕННЫХ ПОРОД

Приведены результаты исследований гранулометрического состава несвязных, обрушенных и уплотнённых пород кровли угольного пласта после его отработки лавой. Дана статистическая оценка размеров породных кусков в зависимости от расстояния до почвы отработанного пласта и структуры обрушенных пород.

Ключевые слова: обрушенные породы, выработка, размер куска, эквивалентный диаметр, интенсивность трещиноватости, статистика, плотность распределения, лава, свод обрушения.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из возможных путей решения проблемы обеспечения устойчивости горных выработок является применение при разработке угольных пластов технологических схем, предусматривающих размещение выработок в породах выработанного пространства. Перспективность этого способа доказана целым рядом исследователей [1–4 и др.], однако до сих пор он не нашёл широкого применения.

По нашему мнению, фактором, сдерживающим применение способа охраны выработок в обрушенной и уплотняющейся породной толще, является отсутствие в достаточной мере обоснованных геомеханических параметров для описания такой специфической среды, как рыхлые горные породы.

В наше время основным методом прогнозирования напряжённо-деформированного состояния породного массива после выемки угольного пласта и обрушения пород кровли является численное математическое моделирование [5]. Эффективность такого моделирования во многом обусловлена правильностью задания исходных данных. Однако методики определения деформационных и прочностных параметров обрушенных и уплотнённых пород отсутствуют, не совсем понятно, как задавать при моделировании изменчивую структуру подработанной толщи и давление обрушенных по-

род на почву отработанного пласта, да и рекомендации по определению размера свода обрушения базируются ещё на результатах физического моделирования на эквивалентных материалах и требуют подтверждения иными методами.

Из рассмотрения работ [1–4] следует, что изучение деформируемости обрушенных и уплотняющихся пород до сих пор имеет в основном поисковый характер и скольконибудь законченной теории для оценки изменений напряжённо-деформированного состояния массива по мере проведения и поддержания выработки в породах с подобными структурно-механическими особенностями пока не предложено. Общеизвестно, что для решения любой геомеханической задачи прежде всего необходимо выбрать модель деформирующейся среды, а первым этапом этого выбора является анализ структурно-механических особенностей породного массива.

Цель исследования — изучение структурных особенностей обрушенных и уплотняющихся пород непосредственно в забоях выработок, проводимых в выработанном пространстве. Структурные свойства несвязных подработанных пород существенно отличаются от свойств монолитного ненарушенного массива, так как обрушенные породы скорее являются дисперсной средой, состоящей из отдельных

породных кусков, которые называют гранулометрическими элементами [6]. Мерой нарушенности таких пород является их гранулометрический состав, который показывает, какого размера куски и в каком количестве содержатся в том или ином объёме. Именно относительное содержание породных кусков различных размеров предопределяет прочностные и деформационные свойства массива, сложенного из обрушенных и уплотнённых пород, и оказывает решающее влияние на устойчивость проводимой в нём выработки.

Методика исследования. Изучение структурно-механических особенностей несвязных пород в выработанном пространстве выполнено путём шахтных исследований в забоях выработок, проводимых по обрушенным и уплотнённым породам. Достаточно полной характеристикой гранулометрического состава пород выработанного пространства является статистическая плотность распределения породных кусков по их размеру [6]. Непосредственное измерение размеров породных кусков неправильной формы представляет собой весьма трудоёмкую операцию, поэтому объектом гранулометрического анализа приняты не сами куски, а их проекции на фотоснимках, выполненные в определённом масштабе с использованием фотограмметрии [7].

Методы фотограмметрии позволяют с помощью обычного фотоаппарата довольно просто определять размеры, форму и пространственное положение породных кусков по их фотоснимкам непосредственно в проходческом забое выработки, проводимой в обрушенном массиве, что делает их весьма эффективными и экономичными.

Изложение материала и его результаты. Изучались фотографии, сделанные на шахте им. Баракова Н. П. в магистральном откаточном и конвейерном штреках горизонта 764 м, а также в 17-м северном уклоне, которые проводились по выработанному пространству лавы пласта k_5 (рис. 1), и на шахте им. XIX съезда КПСС в полевом уклоне с пласта l_4 на пласт l_1 , сооружае-

мом в обрушенных породах над восточной лавой пласта l_1 (рис. 2).

Горизонт 764 м на шахте им. Баракова Н. П. подготовлен погоризонтным способом. Мощность отработанного угольного пласта $m = 1,55 \dots 1,7$ м, а угол падения — $2 \dots 4$ градуса. Направленность проведения магистральных штреков совпадает с ходом отработки надрабатывающей лавы, а уклона — перпендикулярно к направлению её перемещения. При проведении выработок выбрана верхняя подрывка пород непосредственной кровли пласта k_5 , обрушившейся после прохода разгрузочной лавы 8...9 лет назад.

Полевой конвейерный уклон пл. l_4-l_1 на шахте им. XIX съезда КПСС проводился сверху вниз под углом к горизонтальной плоскости 18° над отработанной лавой пласта l_1 , угол падения которого составляет $3 \dots 4^\circ$. Фотоснимки делали в каждом цикле по мере продвижения выработки, начиная с ПК19, который в этот момент находился на расстоянии 20 м (по нормали) от почвы пласта. Это позволило изучить изменчивость кусковатости пород по мере удаления от отработанного пласта.

По фотографиям проходческих забоев изготавливали эскизы расположения породных кусков в их поперечном сечении и определяли структурные параметры обрушенных и уплотнённых пород. Размеры породных кусков вычисляли по эскизам забоев через их площадь S по формуле

$$d = 2\sqrt{S/\pi}, \quad (1)$$

где d — эквивалентный диаметр породного куска в метрах, который приводился к натуральным размерам с помощью коэффициента масштабирования.

При фотографировании площадь проекции отдельно взятого куска является случайной величиной, причём случайность обусловлена не произвольным выбором куска из совокупности, а случайным его положением в пространстве. Пусть на снимках зафиксирована некоторая совокупность кусков, число которых обозначим через N .

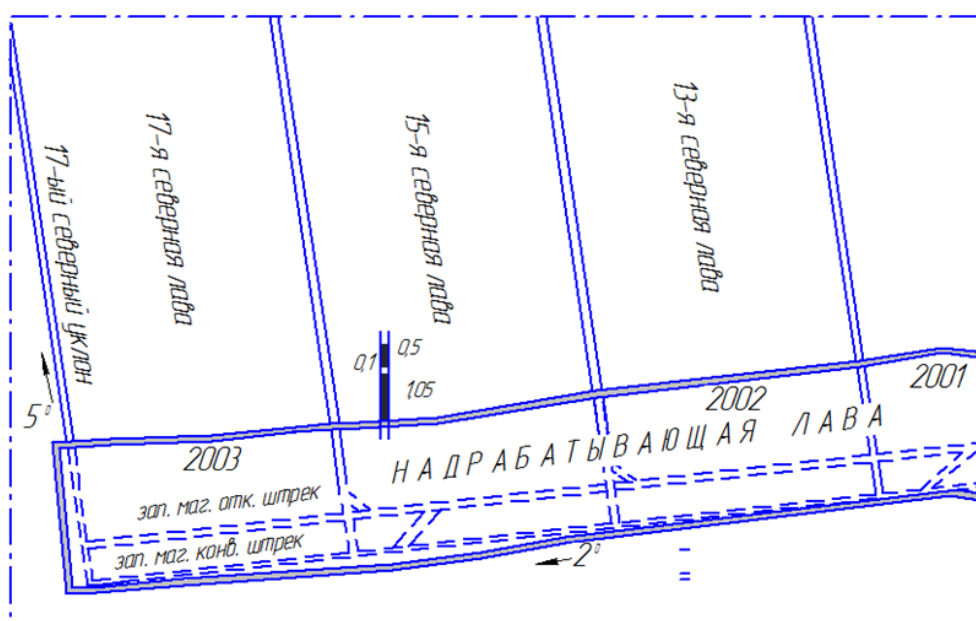
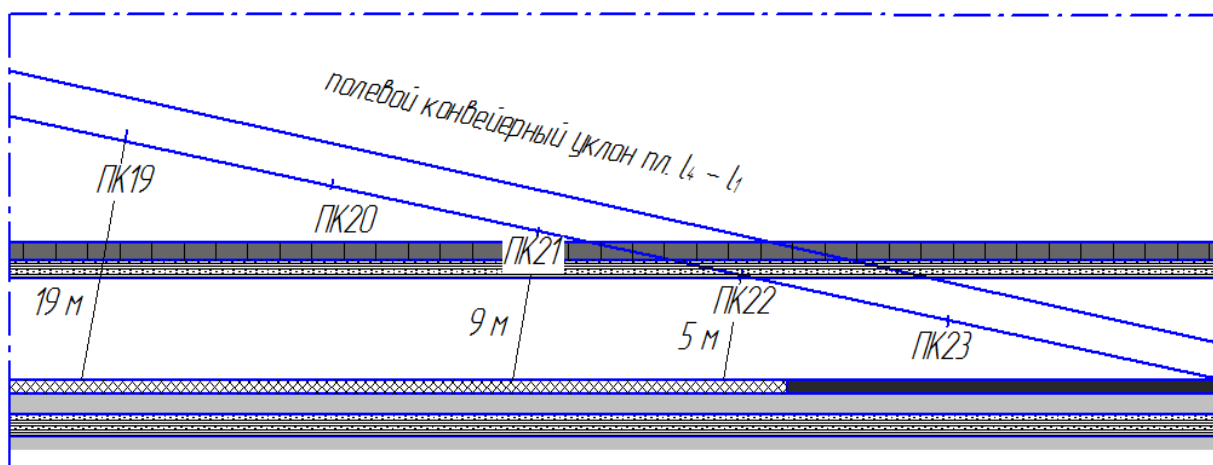


Рисунок 1 Выкопировка из плана горных работ шахты им. Баракова Н. П.

Рисунок 2 Горно-геологические условия проведения полевого конвейерного уклона пл. l_4-l_1 шахты им. XIX съезда КПСС

Если наугад выбрать кусок из совокупности, то его эквивалентный диаметр логично рассматривать как некоторую положительную случайную величину, распределённую определённым образом на числовой оси. Это распределение будет дискретным в силу того, что оно представлено отдельными, разрозненными породными кусками, число которых представляет собой ограниченное счётное множество. Вместе с тем каждая конкретная совокупность кусков является выборочной. Но так

как её объём достаточно велик, то её можно отождествлять с генеральной совокупностью и считать эквивалентный диаметр d куска непрерывной случайной величиной, распределённой от 0 до ∞ с некоторой плотностью $f(d)$. Под выборочной же совокупностью будем понимать множество кусков, подлежащих измерению и составляющих исходную эмпирическую информацию для получения статистических оценок структурных параметров обрушенных пород.

Всего составлено пять выборок: для мелкодроблёного слоя непосредственной кровли пласта k_5 мощностью до 1,25 м; для крупнодроблёного слоя кровли пласта k_5 выше 1,25 м от его почвы; три выборки обрушенных пород кровли пласта l_1 были сгруппированы на различном удалении от его почвы (19 м, 15 м и 5 м).

Статистический анализ данных проведён по каждой выборке. Для определения числовых характеристик случайной величины d в каждом изучаемом слое строили интервальные ряды, причём оптимальную величину интервала рассчитывали по формуле Стёрджеса [8].

Диаграммы дифференциальной функции распределения $f(d)$ дают графическое представление о распределении крупности кусков в той или иной выборке. Построение диаграмм проводилось в прямоугольной системе координат, где аргументом выступал эквивалентный диаметр породного куска, а ординатой — эмпирическая вероятность попадания куска в заданный интервал. Также построены кумулятивные характеристики гранулометрического состава в виде гистограмм или интегральной функции распределения $F(d)$ крупности породных кусков.

Интегральная $F(d)$ и дифференциальная $f(d)$ функции связаны между собой выражением, отражающим вероятность принятия случайной величиной d значения меньше фиксированной величины:

$$F(x) = \int_0^{\infty} f(x) dx. \quad (2)$$

По виду кумулятивной кривой судят о преобладании крупных или мелких классов в исследуемом кусковатом материале: выпуклые кривые свидетельствуют о преобладании крупных кусков, вогнутые — мелких. Для исследованных выборок обрушенных пород характерны выпуклые кумулятивные характеристики.

Для теоретического описания эмпирических данных проанализированы все законы,

используемые в гранулометрии (нормального и логарифмически нормального распределений, уравнения Розина – Раммлера, Годэна – Андреева и Харриса), и оценена для каждого слоя степень неоднородности обрушенных пород с помощью коэффициента неоднородности k_n [6, 8]:

$$k_n = d_{60}/d_{10}, \quad (3)$$

где d_{60} — эквивалентный диаметр породных кусков, мельче которых в выборке содержится 60 %;

d_{10} — то же, соответствующий выходу 10 %.

Результаты расчёта коэффициента неоднородности в каждом слое свода обрушенных пород показали, что $k_n < 5$, а значит, кусковатая порода считается однородной по гранулометрическому составу. Об этом также свидетельствует наличие одного значения моды M_o в каждой выборке, то есть диаметра куска с максимальной плотностью распределения $f(d)$.

Нормальный закон используется для объектов, у которых отмечается равенство математического ожидания $M(d)$, моды M_o и медианы M_e , то есть срединного диаметра куска, для которого ровно половина выборки больше него, а другая половина — меньше. Указанное равенство для исследованных выборок не выполняется.

Логарифмически нормальным законом обычно аппроксимируют экспериментальные распределения с правосторонней асимметрией $A > 0$, которая как раз зафиксирована у исследованных обрушенных пород.

Уравнение Розина – Раммлера хорошо согласуется с данными, характерными для тонкоизмельченных продуктов дробления, к которым обрушенные породы не относятся.

Закон Годэна – Андреева в нашем случае не подходит, так как логарифмическая суммарная характеристика «снизу» не является прямолинейной.

Уравнение Харриса не применимо в виду того, что его используют для описания неоднородных по гранулометрическому составу материалов.

Следовательно, эмпирическая функция распределения с наибольшей вероятностью может быть аппроксимирована лог-нормальным законом распределения [8].

Сравнение эмпирических и теоретических функций распределения для мелкодроблёной и крупнодроблёной породы представлено на рисунке 3.

Логарифмически-нормальный закон распределения аппроксимирует эмпирическую интегральную функцию распределения породных кусков мелкодроблённого свода обрушенных пород с ошибкой 3,7 %, а распределение крупнодроблённых пород — 8,3 %; коэффициент детерминации R2 составил 91,8 % и 70 % соответственно.

Результаты определения величины эквивалентного диаметра породных кусков в каждом исследованном слое обрушенных пород приведены в таблице 1.

На основании анализа полученных данных можно отметить, что с удалением от почвы отработанных пластов размеры породных кусков в своде обрушения растут. Сделанный вывод подтверждается трендом изменения математического ожидания размера породного куска (d) от расстояния до почвы отработанного пласта (h), построенным по всем выборкам и имеющим вид, который в этом интервале близок к линейной зависимости

$$d = 0,026 \cdot h + 0,34, \text{ м.} \quad (4)$$

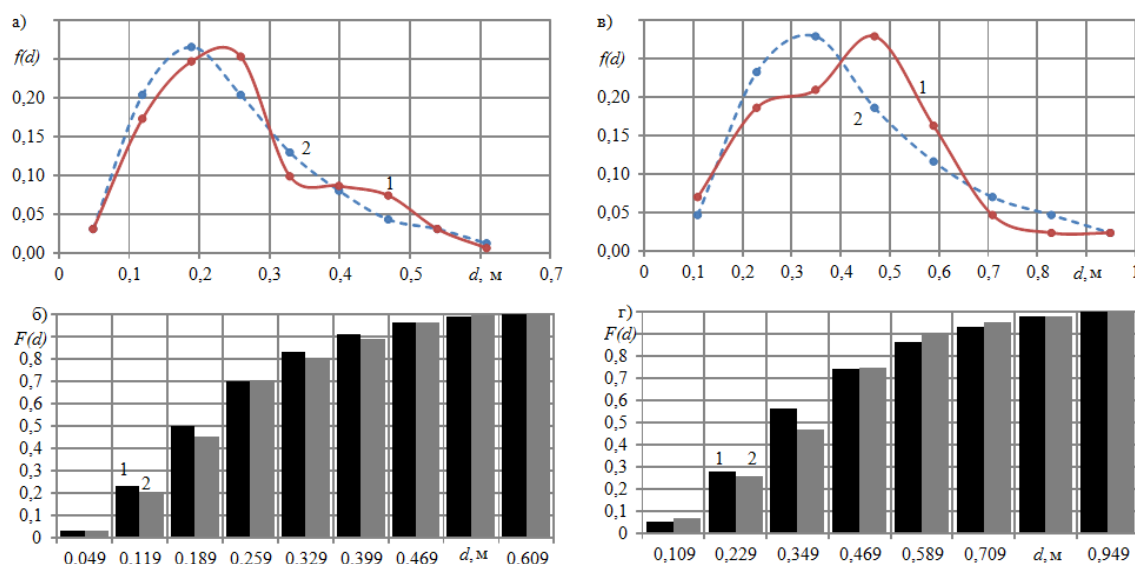


Рисунок 3 Эмпирические (1) и теоретические (2) функции распределения: дифференциальные (а, в — соответственно мелко- и крупнодроблённых пород) и интегральные (б, г — соответственно мелко- и крупнодроблённых пород)

Таблица 1

Характеристика обрушенных пород в исследованных выборках

Породная выборка	Расстояние от почвы, м	Диаметр куска, м				Статистические параметры		
		d_{cp}	$M(d)$	M_o	M_l	σ_d^2	$\sigma_{d, м}$	A
Мелкодробленый слой	0,6	0,26	0,25	0,26	0,24	0,015	0,12	0,64
Крупнодробленый слой	2,4	0,42	0,42	0,47	0,43	0,034	0,185	0,003
Блочная среда	5,0	0,54	0,53	0,52	0,52	0,007	0,08	0,52
	9,0	0,62	0,61	0,51	0,56	0,053	0,23	0,45
	19,0	0,8	0,83	0,73	0,8	0,03	0,17	0,53

В целом по высоте свода обрушенные и уплотнённые породы неоднородны по гранулометрическому составу и включают в себя несколько сравнительно однородных слоёв кровли.

При управлении кровли полным обрушением у почвы отработанного пласта располагается слой мелкодроблёных пород, образуемый из пачки непосредственной кровли, которая легко обрушается в выработанном пространстве при удалении призабойной и посадочной крепи или секций механизированной крепи. По мере продвижения лавы эти породы отделяются по плоскостям ослабления, ломаются при падении на отдельные куски, измельчаются под действием ударов и веса вышележащей толщи. Высота мелкодроблёного слоя близка к мощности вынутаго угольного пласта и зависит от литологического состава пород и степени их метаморфизма. Породные куски в этом слое располагаются хаотично, выделить направление преимущественного распространения контактных трещин нельзя, а пустотность пород визуально не прослеживается. Эквивалентный диаметр кусков здесь варьирует от 5 до 53 см, а в среднем составляет 25 см. Интенсивность трещиноватости $1/d=4$.

Над мелкодроблёными породами залегает более мощный крупнодроблёный слой, высоту которого обычно принимают равной $(3-6) \cdot m$, где m — мощность вынутаго угольного пласта [1]. По данным исследований, размер породных кусков здесь возрастает по мере удаления от почвы пласта и изменяется от 10 см до 90 см, а в среднем составляет 42–46 см. Интенсивность трещиноватости крупнодроблёных пород равна 2,2.

Расположение породных кусков друг относительно друга постепенно приобретает некоторую упорядоченность, плавно переходящую к блочной структуре следующего слоя — зоны связного опускания

пород. Породная толща в виде блочной структуры простирается от крупнодроблёного слоя вглубь массива до зоны плавного прогиба породных слоёв. Исходя из предположения, что у верхней границы этой толщи интенсивность трещиноватости массива $1/d \leq 0,25$, можно оценить её высоту путём экстраполяции зависимости эквивалентного размера породного куска от расстояния до почвы отработанного пласта. При учёте коэффициента вариации она составила 125–193 м, что не противоречит работе [1], в которой приблизительная высота свода обрушения принимается равной $0,8L$, где L — длина лавы, м. Учитывая, что длина лав изменяется в диапазоне 150–300 м, то по Зборщику М. П. высота свода равняется 120–240 м.

Выводы. Обрушенный массив разбит на слои, отличающиеся гранулометрическим составом. В пределах каждого слоя породы можно считать однородными. Нижний слой представлен кусками породы со средним диаметром 25 см, имеет мощность, близкую к мощности вынутаго пласта (m). Над ним располагается слой крупнодроблёных пород мощностью 3...6 м, в котором диаметр кусков изменяется от 10 до 90 см. Крупнодроблёный слой плавно переходит в блочную структуру с размерами кусков, превышающими 1 м.

Средний размер структурного блока является случайной величиной с логарифмически нормальным распределением, при этом он линейно увеличивается по мере удаления от почвы пласта. Исходя из тренда его изменения, предположительная высота свода обрушения 125–193 м.

В пределах каждого слоя обрушенный массив может считаться квазисплошным, так как размер исследуемой области на три порядка больше среднего размера структурного блока, и для его описания применимы методы теории сплошной среды.

Библиографический список

1. Зборицик, М. П. *Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве [Текст]* / М. П. Зборицик. — К. : Техніка, 1978. — 178 с.
2. Симанович, А. М. *Охрана выработок на глубоких шахтах [Текст]* / А. М. Симанович, М. А. Сребный. — М. : Недра, 1976. — 144 с.
3. Назимко, В. В. *Геомеханические основы устойчивости подготавливающих выработок в зонах разгрузки при воздействии очистных работ [Текст]* : дис. д-ра техн. наук : 05.15.02, 05.15.11 / Назимко Виктор Викторович ; НГУ. — Днепропетровск, 1990. — 364 с.
4. Пилюгин, В. И. *Обоснование параметров расположения и способов повышения устойчивости выработок, поддерживаемых в обрушенной и уплотнённой толще пород [Текст]* : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.15.02 / Пилюгин Виталий Иванович. — Донецк : ДПИ, 1988. — 16 с.
5. *Компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния пород вокруг пластовой выработки. Книга 1. Допредельная стадия деформирования системы «порода – крепь» [Текст]* : монография / В. И. Бондаренко и др. — Днепропетровск : Системные технологии, 2006. — 172 с.
6. Батугин, В. А. *Гранулометрия геоматериалов [Текст]* : монография / В. А. Батугин, А. В. Бирюков, Р. М. Кылатчанов. — Новосибирск : Наука, 1989. — 173 с.
7. Лобанов, А. Н. *Фотограмметрия [Текст]* : учебник для вузов / А. Н. Лобанов, М. И. Буров, Б. В. Краснопецев. — М. : Недра, 1987. — 309 с.
8. *Математическая статистика [Текст]* : учебник для техникумов / под ред. А. М. Длина. — М. : Высшая школа, 1975. — 399 с.

© Бабиюк Г. В.© Доценко О. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г., зам. директора по экономике и финансам филиала «Шахта Никонор-Новая» Линником С. А.

Статья поступила в редакцию 10.06.19.

д.т.н. Бабиюк Г. В. (ДУИТ, м. Київ, Україна), Доценко О. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)
ШАХТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МАСИВУ ОБРУШЕНИХ ПОРІД

Викладено результати досліджень гранулометричного складу незв'язних, обрушених і ущільнених порід покрівлі вугільного пласта після його відробки лавою. Надано статистичну оцінку розмірів породних шматків в залежності від відстані до підшови відпрацьованого пласта і структури обрушених порід.

Ключеві слова: *обрушені породи, виробка, розмір шматка, еквівалентний діаметр, інтенсивність тріщинуватості, статистика, щільність розподілу, лава, склепіння обвалення.*

Doctor of Technical Sciences Babiyuk G. V. (SUIT, Kiev, Ukraine), Dotsenko O. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

UNDERGROUND INVESTIGATIONS OF STRUCTURAL AND MECHANICAL FEATURES OF THE ROCK MASS CAVING

There have been given the research results on granulometric composition of bondless, caved and pressed roof rocks of the coal layer after its longwall mining. There has been given the statistical assessment for sizes of rock pieces depending on distance to the footwall of the worked-out layer and the structure of caved rocks.

Key words: *caved rocks, workings, lump size, equivalent diameter, intensity of jointing, statistics, density of distribution, longwall, cave roof.*