

УДК 622.23.02

к.т.н. Доценко О. Г.,
к.т.н. Кизияров О. Л.,
к.т.н. Аверин Г. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД

В статье приведены результаты компрессионных испытаний обрушенных пород. Экспериментально установлены экспоненциальные зависимости, с вероятностью 0,95 и погрешностью 7 % описывающие изменение модуля деформации обрушенных пород в процессе их уплотнения с учетом пустотности, влажности и литологического состава, позволяющие рассчитать параметры поддержания проводимых по ним выработок.

Ключевые слова: обрушенные породы, процесс уплотнения обрушенных пород, компрессионные испытания, критерии подобия, факторный эксперимент, модуль деформации.

Расположение подготовительных выработок в выработанном пространстве используется как способ их безремонтного поддержания, что особенно актуально в условиях глубоких шахт. Данный способ охраны встречается как на шахтах Донбасса, так и в Кузнецком, Карагандинском и Челябинском угольных бассейнах. Параметры способа устанавливались М. П. Зборщиком [1], В. В. Назимко [2], В. И. Пилюгиным [3] и другими исследователями. Указанные ученые сходятся во мнении, что к моменту сооружения выработки массив обрушенных пород должен уплотниться.

Целью исследования является установление закономерностей изменения компрессионных свойств обрушенных пород с учетом их литологического типа, влажности и исходной пустотности. Без этих сведений невозможно адекватно моделировать численными методами напряженно-деформированное состояние породного массива при ведении очистных работ, достоверно прогнозировать проявления горного давления в проводимой выработке и устанавливать параметры крепления. В этой связи поставленная цель исследования имеет актуальное значение.

Ввиду сложности изучения массива обрушенных пород в шахтных условиях поставленная задача решалась путем физического моделирования процесса уплотнения

обрушенных пород под воздействием сжимающей нагрузки (компрессии пород) с соблюдением критериев подобия.

Суть лабораторного эксперимента заключалась в проведении компрессионных испытаний модельного материала на приборе одомере в соответствии со стандартной методикой [4]. При проведении эксперимента исключалась возможность бокового расширения образца.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

Образец испытываемой породы с определенным соотношением входных факторов помещался в рабочее кольцо 1 площадью поперечного сечения внутренней плоскости 25 см^2 . Согласно [4], допускается испытание образцов нарушенной структуры. Кольцо устанавливается на базу с перфорированным днищем для обеспечения свободного оттока воды, выжатой из образца породы при испытании его во влагонасыщенном состоянии. На образец сверху устанавливается перфорированный поршень 2 со штоком.

Для исключения попадания кусков породы в отверстия днища, а также через поршень применялись бумажные фильтры. Сверху на кольцо устанавливается обойма, в которой устроено направляющее отверстие для штока и приспособление для крепления индикатора перемещений часового

типа 5. Обойма 3 соединена с базой с помощью 3-х откидных винтов, что обеспечивает общую жесткость прибора во время опыта. Прибор крепится к крышке стола зажимным устройством, к которому с помощью металлической тяги подсоединяется рычаг 4 для создания нагрузок на образец. Рычаг имеет накладку с углублением для опоры на шток поршня 2 и обеспечивает соотношение плеч для передачи нагрузки на поршень 1:25, то есть величина груза 3, уложенного на подвеску рычага 4, будет численно соответствовать давлению на образец. С обратной стороны рычага устроена подвеска 6 для грузов 7, которые служат для уравнивания и исключения передачи нагрузок на образец от веса рычага и подвески. Компрессионный прибор устанавливается в лаборатории на жестком основании, исключающем вибрации. Горизонтальность установки прибора устанавливается по уровню.

При испытаниях образец помещается в кольцо. При этом не допускается образование зазоров между образцом и кольцом.

Нагрузка на образец передавалась ступенями, равными 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 кг/см² и т. д., с шагом в 0,5 кг/см². Масса грузов на подвеске рычага при этом соответствовала 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 кг и т. д.

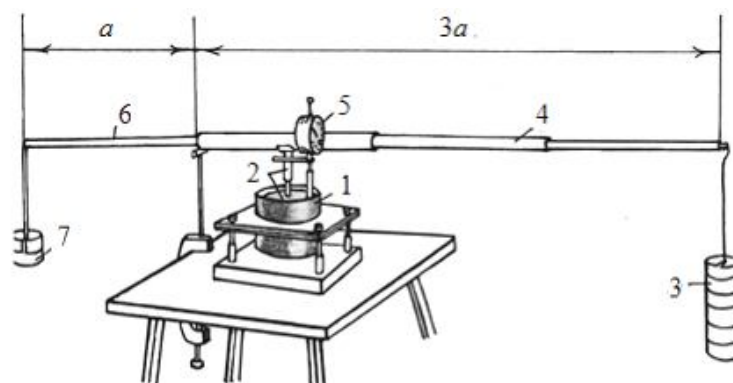
После приложения каждой ступени нагрузки фиксировались показания индикатора часового типа через 1, 2, 3, 4, 5, 10,

15, 20, 30 мин до достижения условной стабилизации деформаций. За условную стабилизацию принимаются деформации не более 0,01 мм за 15 минут.

Величина осадки образца Δh измерялась индикатором часового типа с точностью 0,001 мм. Абсолютная деформация образца вычислялась как разница между показаниями индикатора часового типа с поправкой на деформацию компрессионного прибора (в том числе и бумажных фильтров). Результаты замеров заносились в журнал учета.

Модельный материал изготавливался из типичных пород Донбасса (аргиллит, алевролит, песчаник) путем дробления и просеивания до определенных фракций. Величины исходной пустотности V_0 и влажности W задавались образцам в соответствии с матрицей планирования полного факторного эксперимента.

Для достижения достоверных результатов необходимо соблюдать подобие между натурой и ее моделью, что обеспечивается за счет определения переходных масштабов для всех соответствующих величин. Моделируемый процесс уплотнения обретенных пород в лабораторных условиях количественно протекает иначе, но так как геометрические размеры кусков и действующая на породу нагрузка изменяются пропорционально, то измеряемые деформации будут подобны натурным.



1 — рабочее кольцо; 2 — поршень; 3 — груз; 4 — длинное плечо рычага; 5 — индикатор часового типа; 6 — короткое плечо рычага; 7 — уравнивающий груз

Рисунок 1 Конструкция одометра

Испытуемый модельный материал должен отражать свойства обрушенного массива пород. С учетом технических характеристик прибора одометра и равенства объемного веса породы в натуре γ_n и модели γ_m , то есть $\alpha_\gamma = \gamma_n / \gamma_m = 1$, устанавливались критерии подобия.

Выбор линейного масштаба определялся размерами рабочего кольца одометра и обуславливался, кроме того, объемом породы, обладающим структурными свойствами породного массива. Согласно [5], элементарный объем массива должен содержать в себе достаточное количество структурных блоков, а размер элементарной площадки должен составлять не менее 10 его характерных размеров, то есть диаметр рабочего кольца $D \geq 10d$, где d — линейный размер измельченной породы. Также выбор геометрического масштаба (табл. 1) зависел от размера породных кусков в натуре [6]. Состояние обрушенных пород можно охарактеризовать, прежде всего, показателем трещинной пустотности $V_{тр}$, представляющим собой отношение суммарного объема трещин к единице объема массива горных пород. Так как приготовленный для испытания модельный материал обладает свойствами массива обрушенных пород, то и объем пустот должен быть у них одинаковым. Материал для моделирования мелкодробленого и крупнодробленого слоев по своей сути напоминает песок, а материал для моделирования блочного слоя — щебень. Варьирование фактором пустотности в эксперименте предусмотрено на двух уровнях, выбранных на основании априорной информации [7]. Верхний уровень пустотности пород принят на уровне 47 %, что соответствует нижнему

слою области беспорядочного обрушения, залегающего на почве пласта (мелкодробленый слой). Нижний уровень пустотности пород принят равным 21 %, характерный для области связного опускания. При заполнении рабочего кольца одометра модельным материалом путем взвешивания пробы подбирался такой насыпной вес, который бы обеспечил заданную пустотность образца.

Уровни варьирования влажности установлены исходя из нахождения обрушенных пород в естественном сухом (нижний уровень) и обводненном состояниях (верхний уровень).

Учитывая, что глубина разработки на шахтах Донбасса в среднем составляет 1000 м, то в натуральных условиях давление на почву отработанного пласта изменяется от 0 до 25 МПа.

Динамический критерий подобия (табл. 2) при компрессионных испытаниях принят на уровне $\alpha_p = P_n / P_m = 25$, где P_n — давление на обрушенные породы в натуральных условиях:

$$P_n = \gamma \cdot H, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где γ — объемный вес пород, т/м³;

H — глубина разработки, м;

P_m — давление, оказываемое на модельный материал, МПа.

Кинематический критерий подобия $\alpha_t = t_n / t_m$ (где t_n и t_m — время уплотнения пород в натуральных условиях и в модели соответственно) был увязан с остальными критериями α_γ , α_l и α_p [8]:

$$\alpha_t = \alpha_l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_\gamma}{\alpha_p}}. \quad (2)$$

Таблица 1

Геометрический критерий подобия α_l , используемый при моделировании

Слой подработанного массива	$\alpha_l = \frac{l_n}{l_m}$	Размер породных кусков (d), мм		Диаметр цилиндра, мм $D \geq 10d$	$\frac{D}{d}$
		в натуральных условиях, мм	в лабораторной установке, мм		
Мелкодробленый слой	1200	250	>0,2	56,6	290
Крупнодробленый слой	1200	420	0,2–1,0	56,6	161
Блочный слой	1200	2500	2,0–2,5	56,6	28,3

Таблица 2

Критерии подобия, принятые при моделировании процесса уплотнения обрушенных пород

Критерий подобия	Значение критериев подобия
α_γ	1
α_l	1200
α_p	25
α_t	240

Исследование процесса уплотнения обрушенных пород проведено в виде полного факторного эксперимента. Уровни и интервалы варьирования факторами представлены в таблице 3.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента приведена в таблице 4. Каждая строка матрицы отражает условия проведения опыта, а выходным параметром является модуль деформации E . По результатам замеров величин осадки образца, заносимых в специальный регистрационный журнал, были построены компрессионные кривые для каждого типа пород, продолженные в соответствии с методикой Н. К. Роботнова до нагрузки 1,0 МПа. Пример компрессионной кривой приведен на рисунке 2.

Компрессионные кривые отражают зависимость между величиной осадки образца Δh (изменением его пустотности) и величиной условно-мгновенного давления в условиях трехосного сжатия без возможности бокового расширения. С ростом сжимающей нагрузки вертикальная осадка Δh увеличивается, причем вначале прирост смещений максимален и обусловлен вза-

имным перемещением и переупаковкой породных кусков, то есть изменением строения пород на более компактное. По мере роста давления компрессионные кривые выполаживаются, поскольку последующее уплотнение пород связано с разрушением, доля которого постепенно возрастает. Выходной параметр матрицы планирования — секущий модуль деформации или коэффициент жесткости E , равный тангенсу угла наклона секущей в точке на компрессионной кривой к оси абсцисс. Модуль деформации породы рассчитывался по формуле

$$E = \frac{1 + V_0}{a}, \text{ кгс/см}^2, \quad (3)$$

где V_0 — исходная пустотность материала;

a — коэффициент уплотнения:

$$a = \frac{V_{i-1} - V_i}{P_i - P_{i-1}}, \quad (4)$$

где V_{i-1} — конечная пустотность материала при нагрузке P_{i-1} ;

V_i — конечная пустотность материала при нагрузке P_i .

Таблица 3

Уровни и интервал варьирования факторов в натуре (n^*) и модели (m^*) при компрессионных испытаниях

Входные параметры	Обозначения факторов	Уровни варьирования входных факторов				Интервал варьирования	
		min		max			
		n^*	m^*	n	m	$\frac{n - n^*}{2}$	$\frac{m - m^*}{2}$
Нагрузка на образец, МПа	$P(x_1)$	2,5	0,1	25	1,0	11,25	0,45
Пустотность образца, %	$V(x_2)$	0,205	0,205	0,447	0,447	0,121	0,121
Влажность, %	$W(x_3)$	0,0012	0,0012	0,3	0,3	0,1494	0,1494

Таблица 4

Матрица планирования трехфакторного эксперимента
при компрессионных испытаниях пород

№ п/п	Входные параметры			Выходной параметр
	$P(x_1)$, МПа	$V(x_2)$, %	$W(x_3)$, %	E , МПа
1	-1	-1	-1	E_1
2	1	-1	-1	E_2
3	-1	1	-1	E_3
4	1	1	-1	E_4
5	-1	1	1	E_5
6	1	1	1	E_6
7	-1	-1	1	E_7
8	1	-1	1	E_8

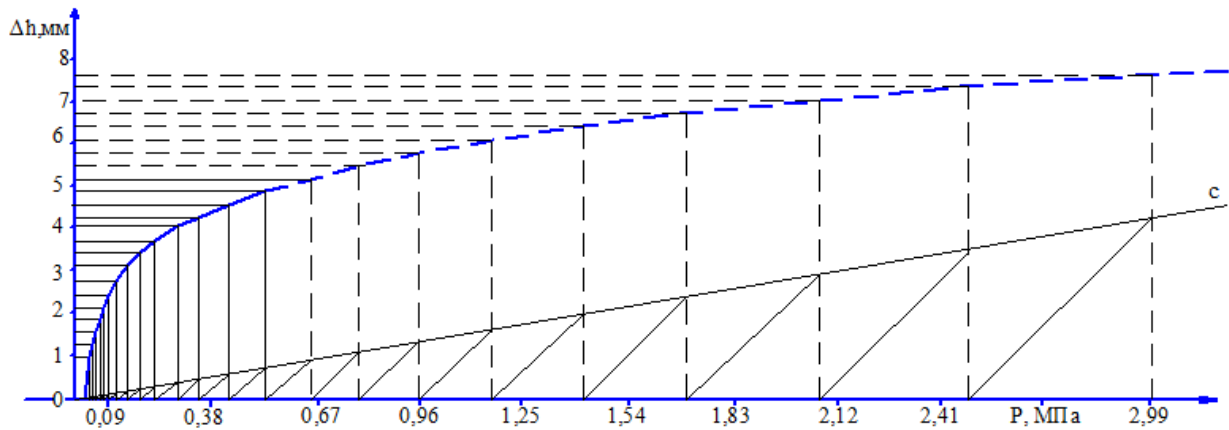


Рисунок 2 Компрессионная кривая мелкодроблёного аргиллита при естественном уровне влажности, построенная на основании экспериментальных данных и продолженная по методу Н. К. Работнова

Конечная пустотность равна

$$V_i = V_0 - \varepsilon \cdot (1 + V_0), \quad (5)$$

где ε — относительные деформации испытуемого материала;

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (6)$$

где Δh — линейная осадка материала, мм;
 h_0 — исходная высота насыпки материала, мм.

Исходная пустотность материала с учетом влажности равна

$$V_0 = w \cdot \gamma_n / \rho_w, \quad (7)$$

где w — влажность модельного материала, доли единицы;

γ_n — насыпная плотность материала, г/см³;

ρ_w — плотность воды, г/см³.

По формулам (3–7) заполнялась таблица 5 и определялся модуль деформации, полученный при компрессионных испытаниях. В качестве примера на рисунке 3 показан график изменения модуля деформации алевролита естественной влажности.

Для получения математической модели $E = f(P, V, W)$, позволяющей прогнозировать значения модуля деформации при различных исходных состояниях обрушенных пород, использовались данные матрицы планирования полного факторного эксперимента (табл. 6).

Таблица 5

Алгоритм расчета компрессионного модуля деформации материала, моделирующего обрушенные породы

Этапы расчета модуля деформации						Модуль деформации	
Давление, МПа	Осадка образца, мм	Относительные деформации	Пористость модельного материала		Коэффициент уплотнения		
			начальная	конечная		кгс/см ²	МПа
P	Δh	ε	V_0	V_i	a	E	$E^* = E \cdot 0,0981$

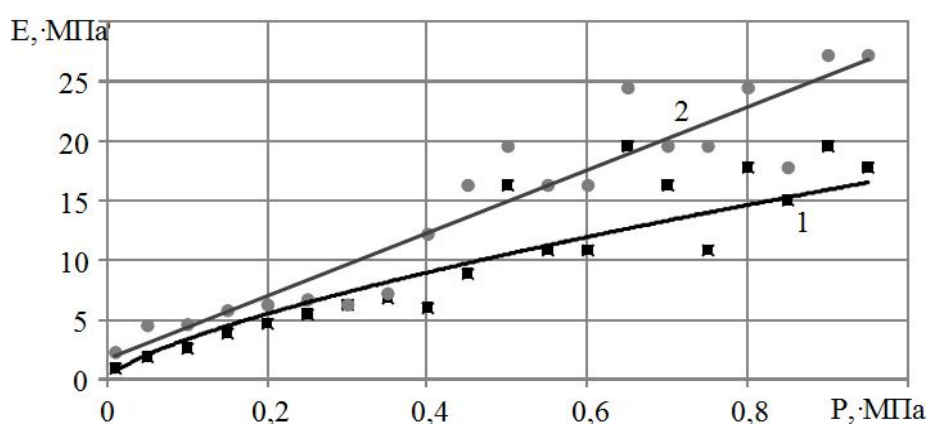


Рисунок 3 Модуль деформации на примере алевролита естественной влажности (W_{max}) при пустотности образца: 1 — максимальной (V_{max}), 2 — минимальной (V_{min})

Таблица 6

Матрица планирования трехфакторного эксперимента при компрессионных испытаниях пород

№ п/п	Входные параметры			Выходной параметр E , МПа		
	$P(x_1)$, МПа	$V(x_2)$, %	$W(x_3)$, %	аргиллит	алевролит	песчаник
1	-1	-1	-1	2,26	2,34	9,81
2	1	-1	-1	19,62	27,25	28,03
3	-1	1	-1	0,53	0,98	0,48
4	1	1	-1	15,09	19,62	19,62
5	-1	1	1	0,48	0,57	0,50
6	1	1	1	14,01	12,31	18,47
7	-1	-1	1	2,75	2,79	4,05
8	1	-1	1	19,62	24,02	33,77

В результате обработки опытных данных при использовании математической статистики были получены следующие компрессионные зависимости в кодированном виде для аргиллита ($E_{арг}$), алевролита ($E_{ал}$) и песчаника ($E_{пес}$):

$$E_{арг} = 4,33 \cdot \exp(1,36x_1 - 0,47x_2 + 0,33x_1x_2 - 0,05x_2x_3), \text{ МПа}; \quad (8)$$

$$E_{ал} = 5,22 \cdot \exp(1,34x_1 - 0,43x_2 + 0,18x_1x_2 - 0,13x_2x_3), \text{ МПа}; \quad (9)$$

$$E_{nec} = 6,89 \cdot \exp(1,34x_1 - 0,82x_2 + 0,48x_1x_2), \text{ МПа.} \quad (10)$$

Модуль деформации тем больше, чем больше сжимающие усилия (x_1). Обратная зависимость исследуемого параметра связана с фактором исходной пустотности x_2 : чем больше пустотность, тем меньше модуль деформации. Имеет место перекрестное влияние факторов x_1 и x_2 . Прямого влияния влажности x_3 на модуль деформации не прослеживается. Влажность — значимый показатель только в сочетании с другими факторами. Так, для глинистых пород, склонных к размоканию, наблюдается обратная связь между модулем деформации E и факторами x_2, x_3 (пустотность — влажность): чем больше пустотность материала, тем значительнее влияние влажности.

Для раскодировки полученных уравнений регрессии (8–10) использовались следующие выражения:

$$x_1 = \frac{P - 13,75}{11,25}, \quad (11)$$

$$x_2 = \frac{V - 0,326}{0,121}, \quad (12)$$

$$x_3 = \frac{W - 0,151}{0,149}. \quad (13)$$

Окончательно с учетом критериев подобия получаем эмпирические уравнения для расчета модуля деформации:

$$E_{apc} = 108 \cdot \exp(0,043P - 6,82V + 0,83W + 0,24PV - 2,54VW + 0,57), \text{ МПа,} \quad (14)$$

$$E_{ал} = 131 \cdot \exp(0,075P - 4,32V + 2,38W + 0,13PV - 7,29VW - 0,22), \text{ МПа,} \quad (15)$$

$$E_{nec} = 172 \cdot \exp(0,003P + 0,36PV - 11,72V + 2,17), \text{ МПа.} \quad (16)$$

Выводы. Сжимаемость обрушенных пород объясняется уменьшением объема пустот, происходящим при взаимном перемещении частиц под воздействием внешних нагрузок. С уменьшением объема пустот модуль деформации увеличивается,

одновременно растет и плотность сложения обрушенного массива. Для изучения процесса уплотнения был применен метод К. Терцаги, согласно которому модуль деформации обрушенных пород устанавливался при учете исходной пустотности материала. Физическое моделирование процесса уплотнения обрушенных пород во времени под воздействием сжимающей нагрузки проведено с соблюдением критериев подобия в виде полного факторного эксперимента. По результатам замеров величин осадки образца были построены компрессионные кривые. Выходной параметр матрицы планирования — модуль деформации — рассчитывался по методике, используемой в механике грунтов.

В результате анализа полученных данных эксперимента выявлено:

- наиболее значимым фактором для модуля деформации обрушенных пород (E) является действующая нагрузка (P) и пустотность (V); связь $E=f(P)$ — прямая, $E=f(V)$ — обратная. Имеет место перекрестное влияние факторов сжимающего усилия и пустотности;

- непосредственного влияния влажности (W) на модуль деформации не прослеживается. Данный фактор значим только в сочетании с пустотностью (V) для мелкодробленых пород с высоким содержанием глинистых частиц. Для пород блочной структуры влажность незначима. Для песчаника любой степени раздробленности данный фактор не имеет значения;

- наименьшие значения модуля деформации у аргиллита, а наибольшие — у песчаника. Коэффициенты жесткости алевролита занимают промежуточное значение;

- деформационные свойства мелкодробленого алевролита ближе к свойствам аргиллита; с увеличением размеров породных кусков и с уменьшением объема пустот между ними свойства алевролита стремятся к свойствам песчаника.

С учетом критериев подобия получены эмпирические уравнения для расчета модуля деформации обрушенных пород.

Библиографический список

1. Зборщик, М. П. *Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве [Текст] / М. П. Зборщик. — К. : Техника, 1978. — 176 с.*
2. Назимко, В. В. *Исследование и разработка повышения устойчивости выработок в обрушенных и уплотненных породах при разработке пологих пластов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.02 / Виктор Викторович Назимко. — Донецк : ДНТУ, 1981 — 17 с.*
3. Пилюгин, В. И. *Обоснование параметров расположения и способов повышения устойчивости выработок, поддерживаемых в обрушенной и уплотненной толще пород [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.02 / Виталий Иванович Пилюгин. — Донецк : ДонНТУ, 1988. — 16 с.*
4. ДСТУ БВ 2.1-4-96. *Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — Введ. 01-01-97. — К. : Укрархинформ, 1997. — 43 с.*
5. Фисенко, Г. Л. *Предельное состояние горных пород вокруг выработок [Текст] / Г. Л. Фисенко. — М. : Недра, 1976. — 272 с.*
6. Бабиюк, Г. В. *Шахтные исследования структурно-механических особенностей массива обрушенных пород [Текст] / Г. В. Бабиюк, О. Г. Доценко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». — 2019. — Вып. 14 (57). — С. 12–18.*
7. Комиссаров, С. Н. *Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок [Текст] / С. Н. Комиссаров. — М. : Недра, 1983. — 237 с.*
8. Доценко, О. Г. *Обоснование параметров размещения и поддержания выработок в обрушенных и уплотняющихся породах [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Ольга Геннадьевна Доценко ; ДонГТИ. — Алчевск, 2020. — 236 с.*

© Доценко О. Г.
 © Кизияров О. Л.
 © Аверин Г. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Смекалиным Е. С.,
 зам. гл. инженера по производству и перспективному развитию
 ПП «Шахтоуправление „Луганское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» Чепурным Д. С.*

Статья поступила в редакцию 07.10.2022.

PhD in Engineering Dotsenko O. G., PhD in Engineering Kiziyarov O. L., PhD in Engineering Averin G. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

COMPRESSION TESTS OF CAVED ROCKS

The article presents the results of compression tests of caved rocks. Exponential dependences have been experimentally determined, with a probability of 0,95 and an error of 7 % describing the change in the deformation modulus of caved rocks during their compaction, considering porosity, humidity and lithological composition, allowing to calculate the parameters for maintaining the road entries carried out on them.

Key words: *caved rocks, process of compaction of caved rocks, compression tests, similarity criteria, factor experiment, modulus of deformation.*