

УДК 622.267.6+622.112.3

к.т.н. Сиидов В. Н.,
д.э.н. Гришко Н. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, nova_sid@mail.ru)

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД

На базе натурных исследований разработана новая методика предрасчёта величин ожидаемых оседаний массива слоистой кровли и степени их уплотнения в выработанном пространстве при выемке пологонаклонных пластов, учитывающая мощность, коэффициент разрыхления и крепость обрушаемых пород подрабатываемого породугольного массива. Выполнена апробация методики в шахтных условиях, которая показала хорошую сходимость прогнозируемых величин с натурными в условиях неслёживаемых пород.

Ключевые слова: угольная шахта, выработанное пространство, кровля, обрушение, высота, уплотнение, прогнозирование, выработка.

Актуальность, цель и задачи исследований. Степень уплотнения первоначально обрушенных (разрушенных) естественным путём пород обнажённого в выработанном пространстве слоистого породугольного массива зависит от доминирующих факторов: коэффициентов крепости и разрыхления пород, компрессионных свойств раздробленной кусковато-блочной породной среды, а также усилия их сжатия, величина которого зависит в основном от глубины разработки и продолжительности процесса сдвижения.

Известно, что с удалением от разрабатываемого пласта вплоть до земной поверхности величина оседания подрабатываемого массива уменьшается, однако общей закономерности её убывания не установлено, если не считать отдельные результаты исследований, основанных на базе обработки статистического материала в ограниченных исходных условиях. По измеренным данным смещений глубинных реперов, заложенных в разведочных скважинах, при отработке угольных пластов в условиях неглубоких шахт Карагандинского бассейна [1], а также статистическим данным сопоставления величин опусканий земной поверхности и выработки с мощностями отрабатываемых на глубине не более 700 м пологих пластов Донбасса [2] опускание

подрабатываемого массива лавами с удалением от пласта убывает согласно зависимости, близкой к экспоненциальной, вида

$$\eta = m \cdot \exp(-k \cdot h), \quad \text{м}, \quad (1)$$

где m — вынимаемая мощность пласта, м; k — эмпирический коэффициент, совокупно учитывающий исходные условия; h — величина удаления от пласта по нормали к его плоскости, м.

Вид этой зависимости также подтверждается исследованиями на моделях из эквивалентных материалов [3], в которых закономерность затухания деформаций слоёв с удалением от пласта изменяется по убывающей экспоненте

$$\xi_i = \xi_0 \cdot \exp(-c \cdot h / 2x_0), \quad \text{м}, \quad (2)$$

где ξ_0 — деформация пород на кровле пласта; c — коэффициент, учитывающий механические свойства пород; $2x_0$ — длина лавы.

Степень уплотнения обрушенных в выработанном пространстве пород в основном зависит от их прочности, мощности оседаемой толщи массива и формируемой нагрузки на кусковато-блочную разрыхлённую среду. При этом исходная величина коэффициента разрыхления является предопределяющим параметром его остаточного значения.

Уплотнение обрушенных пород сопровождается дополнительным разрушением их блоков (кусков), потерей пустотности между ними. В физическом понимании эта пустотность может характеризоваться относительным показателем в виде коэффициента пористости

$$\kappa_{on} = \frac{V_n}{V_c} = \frac{V}{V_c} - 1, \quad (3)$$

где V_n и V_c — объёмы соответственно пор (пустот) и скелета (твёрдого вещества) в рассматриваемом объёме V породной среды (сплошной, связной), деформированной или разрушенной, $V = V_n + V_c$, м³.

По сути, остаточный коэффициент разрыхления пород в техническом понимании характеризует пустотность уплотнённой куско-блочной массы без учёта материнской пористости слагающих её отдельностей. Уплотнённые ранее разрушенные породы представляют блочно-кускогато-сыпучую среду, обладающую совершенно другими физико-механическими свойствами по сравнению с исходными в нетронутым массиве.

Исследования в направлении определения прочностных свойств уплотнённых пород пока не вышли за рамки сложных аналитических описаний, основанных на производном параметре коэффициента внутреннего трения, вероятностных моделей распределения различных по размерам породных кусков и их упаковки, а также склонности их к слёживанию. Все эти исследования дают в общих чертах некоторое представление о существующем механизме взаимодействия отдельностей, но не позволяют обеспечивать хотя бы примерные расчёты неравнокомпонентности поля напряжений, ожидаемых деформаций этой среды и смещений контуров обнажения вокруг размещаемых в ней выработок. В таком случае остаётся рассчитывать на результаты натуральных наблюдений по рассматриваемому вопросу в направлении корректировки этих расчётов с учётом коэффициентов их запаса.

Цель исследований заключалась в установлении величины остаточного коэффициента уплотнения обрушенных пород массива кровли под влиянием его сдвижения.

Объект исследования — процесс уплотнения в выработанном пространстве кускогато-блочных отдельностей неслёживаемых пород.

Предмет исследования — остаточный коэффициент уплотнения обрушенных пород.

Задачи исследования:

- обобщить результаты современных достижений по формированию зон уплотнения массива обрушенной кровли в выработанном пространстве;
- обосновать методику прогнозирования величин остаточного коэффициента разрыхления обрушаемых пород слоистой кровли;
- провести апробацию расчётной схемы прогнозирования высоты и степени разрыхления неслёживаемых пород.

Изложение материала и его результаты. Степень уплотнения спонтанно обрушенных пород за счёт уменьшения пространства между передислоцированными отдельностями зависит, прежде всего, от их компрессионных свойств и величины оседания массива кровли. При разрушении и отделении вышележащих слоёв кровли, представленных на схеме (рис. 1), сопровождаемых обрушением пород на границах их контакта, точки v_i (см. рис. 1, а) перемещаются в положение соответствующей точки v'_i (см. рис. 1, б). При завершении процесса сдвижения массива и уплотнения разрыхлённых пород по слоям указанные границы перемещаются в точки v''_i (см. рис. 1, в) на общие величины $\Delta\eta_i$ оседаний соответствующих слоёв массива. Другими словами, v_i , v'_i и v''_i — точки, принадлежащие плоскостям граничных поверхностей смежных породных слоёв, определяющие их положение соответственно в нетронутом, обрушенно-разрушенном и уплотнённом состояниях в пределах зоны полной потери сплошности подрабатываемого массива.

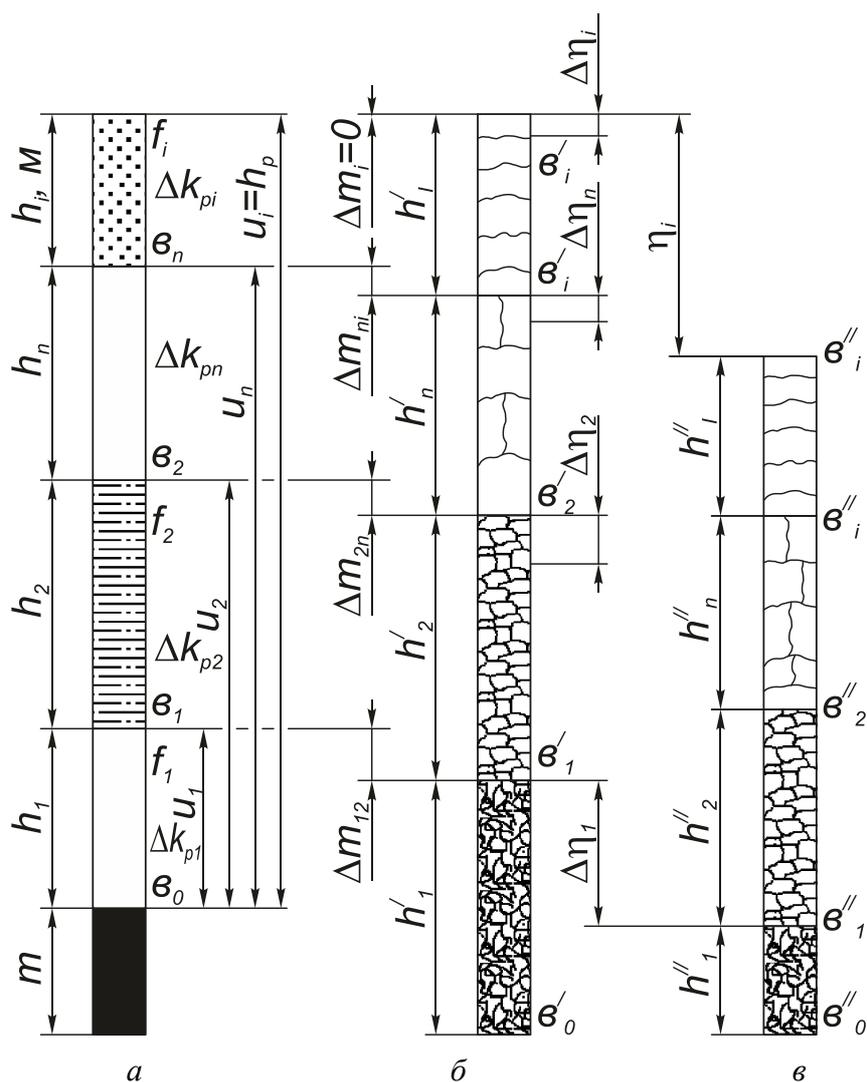


Рисунок 1 Расчётная схема к определению высоты уплотнённых пород обнажаемого лавой слоистого массива кровли: а — исходное состояние пород в нетронутым массиве; б — этап техногенного образования трещин разрыва породных слоёв с последующим их обрушением в выработанном пространстве; в — уплотнённые слои пород

Для определения окончательных величин ожидаемых оседаний η_i массива кровли антрацитовых пологонаклонных пластов мощностью до 1,8 м может быть использована эмпирическая связь [4]

$$\eta_i = p \cdot m_m \cdot \cos \alpha \times \exp\left(-0,0013 \cdot \frac{H}{B} \cdot u_i \cdot \xi_\sigma\right), \text{ м}, \quad (4)$$

где p — коэффициент, учитывающий относительную потерю высоты призабойного пространства за счёт поднятия почвы;

α — угол падения пласта мощностью m_m (м), град.; H — глубина разработки, м; B — длина выработанного пространства, м; 0,0013 — поправочный коэффициент; u_i — удаление рассматриваемой плоскости напластования от пласта, м; ξ_σ — угловой критерий перепада прочности подрабатываемого массива в пределах зоны его полного сдвижения (в условиях отработки пластов антрацита лавами длиной около 250 м высота зоны полных сдвижений массива в среднем принимает

ся как постоянная величина, равная 200 м, на которую приходится основная доля оседания подрабатываемого массива).

Величина коэффициента p для категорий устойчивости почвы, согласно [5],

$$\xi_{\sigma} = \arctg \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \left[(100k_{\sigma_n})^2 h_n \right]}{\sum_{i=1}^n \left[100k_{\sigma_n} h_n \left(\sum_{i=1}^n h_i - 0,5h_n \right) \right]} \right\}, \text{ рад.}, \quad (5)$$

где h_i — мощность очередного i -го породного слоя, начиная от пласта, м; h_n — мощность последнего слоя в пределах 200-метровой высоты зоны полных сдвижений, м; k_{σ_n} — совокупный показатель прочности пород [6],

$$k_{\sigma_n} = \sqrt{\sigma_{сж}^{\perp} \sigma_p^{\perp} / \sigma_{сж}^{\parallel} \sigma_p^{\parallel}}; \quad (6)$$

$\sigma_{сж}^{\perp}$, σ_p^{\perp} и $\sigma_{сж}^{\parallel}$, σ_p^{\parallel} — пределы прочности пород соответственно на сжатие, растяжение и перпендикулярно, параллельно напластованию в зависимости от процентного содержания в них кремнезёма (SiO_2) от 10 до 90 %;

При неизвестных значениях некоторых указанных пределов прочности пород их можно определить аналитически [7] либо использовать усреднённые величины k_{σ_n} , равные для аргиллитов, алевролитов и песчаников, вмещающих пласты антрацита, в среднем соответственно 0,57, 0,7 и 0,86 [8]. Как показывают результаты проведённых расчётов по формуле (5), с учётом количества угольных пропластков или отработанных пластов в пределах 200-метровой толщи на величину ξ_{σ} они существенного влияния не оказывают.

Длина выработанного пространства в направлении подвигания лавы, за пределами которой оседание подработанной толщи почти прекращается:

$$B = T_{сд} V_n, \text{ м}, \quad (7)$$

где V_n — средняя скорость обнажения кровли (подвигания лавы), м/мес.;

весьма неустойчивой (Π_1), малоустойчивой (Π_2) и устойчивой (Π_3) принимается соответственно 0,85, 0,92 и 1,0. Величина углового критерия ξ_{σ} может быть определена по формуле [4]

$T_{сд}$ — продолжительность процесса полного сдвижения массива [9], мес.

Используя зависимость (4) при различных значениях удаления u_i любого породного слоя от пласта, определяется величина его оседания $\Delta\eta_i$, отражающая сжатие соответствующего разрушенного породного слоя. Тогда относительная величина уплотнения i -го слоя составит

$$k_{yi} = \Delta\eta_i / h_i' = \Delta\eta_i / \Delta k_{pi} h_i, \quad (8)$$

где остаточный относительный объём его пустотности

$$\Delta k_{poi} = k_{yi} \Delta k_{pi}. \quad (9)$$

При соответствующих количественных значениях остаточный коэффициент их разрыхления Δk_{pi} после затухания процесса сдвижения подработанного массива:

$$\Delta k_{pyi} = 1 + \Delta k_{poi}. \quad (10)$$

Натурными наблюдениями (рис. 2) за состоянием расположенных в выработанном пространстве выработок [10, 11] подтверждается, что обрушенный и уплотнённый массив сохраняет исходную слоистую структуру кровли с определённым остаточным коэффициентом разрыхления.

Апробация вышерассмотренной методики прогнозирования остаточной относительной пустотности в условиях уклона № 3 пласта h_7 , пройденного в выработанном пространстве лавы № 3 шахты им. Ф. Э. Дзержинского

ГП «Ровенькиантрацит» [11]: мощность вынимаемого пласта — 1,4 м; угол падения пласта — 15°; марка угля — А; глубина разработки — 800 м; длина одиночной лавы — 200 м; скорость подвигания очистного забоя — 36 м/мес.; почва — устойчивая (категория П₃); средняя величина совокупного показателя прочности пород — 0,63.

По данным таблицы 1 с использованием формулы [12]

$$\Delta k_{pi} = 0,64 \cdot \exp(-0,26f_{ni}), \quad (11)$$

где f_{ni} — коэффициент крепости пород по шкале М. М. Протодяконова, определяются величины приращений коэффициентов разрыхления соответствующих пород по слоям: $\Delta k_{p1} = 0,293$, $\Delta k_{p2} = 0,174$, $\Delta k_{p3} = 0,134$ и $\Delta k_{p4} = 0,226$.

Таблица 1
Параметрические характеристики кровли по слоям

Параметры и единицы их измерений	Количественные и качественные значения параметров			
	порядковый номер слоя от пласта			
	1	2	3	4
Мощность слоя, м	1,8	2,0	3,8	5,0
Тип породы	аргиллит	алевролит	песчаник	алевролит
Коэффициент крепости	3	5	6	4

По формулам [12] последовательно вычисляются зазоры между слоями:

$$\Delta m_{12} = m - h_1 \Delta k_{p1}; \quad \Delta m_{23} = m_{12} - h_2 \Delta k_{p2}, \quad (12)$$

$$\Delta m_{34} = m_{23} - h_3 \Delta k_{p3};$$

$$\Delta m_{12} = 1,4 - 1,8 \cdot 0,293 = 0,87 \text{ м};$$

$$\Delta m_{23} = 0,87 - 2,0 \cdot 0,174 = 0,52 \text{ м};$$

$$\Delta m_{34} = 0,52 - 3,8 \cdot 0,134 \approx 0 \text{ м}.$$

В обрушение 4-го слоя кровли попадает только часть его пород, по мощности равная примерно 0,05 м. Тогда высота обрушения составит $h_0 = 1,8 + 2,0 + 3,8 = 7,6$ м.

Продолжительность процесса сдвижения согласно [9] составит $T_{сд} = 9,3$ мес.

Длина выработанного пространства в направлении подвигания лавы (7) составит $B = 9,3 \cdot 36 = 334,8$ м.

Высота обрушения пород $h_0 = 7,6$ м используется как доминирующий исходный параметр для определения оседания η_0 вышележащей толщи, рассчитываемый по формуле (4) при $h = h_0$:

$$\eta_0 = 1,0 \cdot 1,4 \cdot \cos 15^\circ \times$$

$$\times \exp\left(-0,0013 \cdot \frac{800}{334,8} \cdot 7,6 \cdot 0,63\right) = 1,33 \text{ м}.$$

Тогда относительная величина уплотнения на 1 м обрушенных пород в пределах h_0 согласно формуле (8) $k_{yi} = 1,33/7,6 = 0,175$.

При этом величины остаточного коэффициента разрыхления пород соответственно по слоям составят:

$$k_{p01} = 1 + 0,293 \cdot 0,175 = 1,051;$$

$$k_{p02} = 1 + 0,174 \cdot 0,175 = 1,03;$$

$$k_{p03} = 1 + 0,134 \cdot 0,178 = 1,023.$$

Полученные количественные значения остаточных коэффициентов разрыхления пород соответствуют ранее установленным другими исследователями и натурными наблюдениями.

Поскольку $k_{yi} = 1/k_{pi}$, то коэффициент уплотнения по слоям составит $k_{y1} = 0,95$, $k_{y2} = 0,97$, $k_{y3} = 0,98$. Отсюда следует, что коэффициент уплотнения кровли с удалением от пласта увеличивается. Это подтверждает указанную тенденцию по

результатам проведённых исследований [13], где $\Delta k_{po} = 1,009$ ($k_{yo} = 0,99$).



Рисунок 2 Фотофрагменты уплотнённых пород выработанного пространства шахт: *а* и *б* — им. Ф. Э. Дзержинского при проведении вентиляционного уклона № 3 по лавам соответственно № 3 и № 9; *в* — «Красный партизан» при проведении западного

вентиляционного уклона № 67; ε и δ — им. Я. М. Свердлова соответственно при погашении западного транспортного ходка и проведении бремсберга № 5

Выводы и направление дальнейших исследований. Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

Величина остаточного коэффициента разрыхления обрушенных пород массива кровли под влиянием его сдвижения уменьшается одновременно с увеличением коэффициента их уплотнения, стремящегося к соответствующей его величине в нетронутым массиве.

Предложенная методика прогнозирования величин остаточного коэффициента уплотнения обрушенных пород рекомендуется к использованию при решении инженерно-технических задач, связанных со смещениями контура выработок, расположенных в выработанном пространстве.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики прогноза размеров зоны разрушенных и уплотнённых пород во времени.

Библиографический список

1. Кандлыбаева, Ж. М. Закономерности сдвижения горных пород в массиве [Текст] / Ж. М. Кандлыбаева. — М. : Недра, 1968. — 108 с.
2. Борзых, А. Ф. Прогнозирование максимальных оседаний пород в пределах подработанной угленосной толщи [Текст] / А. Ф. Борзых, Ю. Л. Желтиков. — Уголь Украины. — 1989. — № 6. — С. 9–10.
3. Петухов, И. М. Исследование защитных пластов для борьбы с горными ударами и внезапными выбросами угля и газа [Текст] / И. М. Петухов. — Л. : Изд. ВНИМИ, 1966. — 196 с.
4. Борзых, А. Ф. Прогнозирование максимальных оседаний пород подрабатываемого угленосного массива [Текст] / А. Ф. Борзых, Г. А. Аверин, О. В. Князьков // Вестник. — Санкт-Петербург : МАНЭБ, 2004. — Т. 9, № 7 (79). — С. 34–38.
5. Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35° [Текст] / Руководство КД 12.01.01.503-2001. — К. : Минтопэнерго Украины, 2002. — 141 с.
6. Усаченко, Б. М. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизованных породах [Текст] / Б. М. Усаченко, В. П. Чередиенко, И. Е. Головчанский. — К. : Наукова думка, 1990. — 144 с.
7. Сиидов, В. Н. Установление взаимосвязей основных прочностных и упругих параметров пород в условиях антрацитовых шахт [Текст] / В. Н. Сиидов, О. В. Князьков // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2005. — Вып. 20. — С. 126–131.
8. Борзых, А. Ф. Прогнозирование максимальных оседаний пород подрабатываемого угленосного массива [Текст] / А. Ф. Борзых, Г. А. Аверин, О. В. Князьков // Вестник. — Санкт-Петербург : МАНЭБ, 2004. — Т. 9, № 7 (79). — С. 34–38.
9. Кулибаба, С. Б. Продолжительность процесса сдвижения массива [Текст] / С. Б. Кулибаба, А. Ф. Борзых, В. Н. Сиидов // Уголь Украины. — 2008. — № 4. — С. 11–13.
10. Борзых, А. Ф. Опыт отработки панели в восходящем порядке [Текст] / А. Ф. Борзых, В. Н. Сиидов, С. П. Офицеров // Уголь Украины. — 2008. — № 5. — С. 7–10.
11. Сиидов, В. Н. Влияние ПГД на устойчивость проводимой в выработанном пространстве выработки [Текст] / В. Н. Сиидов, В. Н. Григоряк // Уголь Украины. — 2009. — № 7. — С. 10–12.
12. Борзых, А. Ф. Прогнозирование высоты обрушения слоистого массива кровли в выработанном пространстве при выемке полого-наклонных угольных пластов [Текст] / А. Ф. Борзых, В. Н. Сиидов // Известия вузов. Горный журнал. — 2014. — № 1. — С. 13–20.
13. Калинин, С. И. Геомеханическое обеспечение эффективной выемки мощных пологих пластов с труднообрушаемой кровлей механизированными комплексами [Текст] / С. И. Калинин, В. М. Колмагоров. — Кемерово : Кузбассвуиздат, 2002. — 111 с.

© Сиидов В. Н.

© Гришко Н. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.,
и.о. гл. инженера филиала «Шахтоуправление „Луганское“»
ГУП ЛНР «Центруголь» Чепурным Д. С.*

Статья поступила в редакцию 11.11.19.

к.т.н. Сідов В. М., д.е.н. Гришко Н. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, vova_sid@mail.ru)

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ УЩІЛЬНЕННЯ ОБВАЛЕНИХ ПОРІД

На базі натурних досліджень розроблено нову методику розрахунку величин очікуваних осідань масиву шаруватой покрівлі та ступеня їх ущільнення у виробленому просторі при вилученні пологопохилих пластів, що враховує потужність, коефіцієнт розпушення та міцність порід, що обвалюються, породовугільного масиву, що підроблюється. Виконано апробацію методики в шахтних умовах, яка показала хорошу збіжність прогнозованих величин з натурними в умовах порід, що не злежуються.

Ключові слова: *вугільна шахта, вироблений простір, покрівля, обвалення, висота, ущільнення, прогнозування, виробка.*

PhD in Engineering Siidov V. N., Doctor of Economics Grishko N. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR, vova_sid@mail.ru)

IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE DEGREE OF ROCK COMPACTION

On the basis of full-scale studies, a new method for pre-calculating the value of expected subsidence of the stratified roof mass and the degree of their compaction in the mined-out area during excavation of gently sloping layers, considering the power, degree of fragmentation and hardness of rock caving of the undermined rock-coal mass, was developed. The method was tested in mine conditions, which showed good convergence of the predicted values with natural ones in the conditions of non-compacted rocks.

Key words: *coal mine, mined-out area, roof, caving, height, compaction, prediction, working.*