

UDC 622.834

<http://dx.doi.org/10.15407/mining10.03.059>

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И СДВИЖЕНИЯ ПОРОД НА КОНТУРЕ УЧАСТКОВЫХ ВЫРАБОТОК

Н. Антощенко¹, В. Мельник², М. Филатьев^{1*}, А. Дубовик³¹Кафедра охраны труда, Донбасский государственный технический университет, Лисичанск, Украина²Кафедра геотехнологии освоения недр, Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва, Россия³Государственное предприятие "Угольная компания "Краснолиманская", Родинское, Украина*Ответственный автор: e-mail mfilatjev@gmail.com, тел. +380958462460

REGULARITIES OF SURFACE SUBSIDENCE AND ROCKS DISPLACEMENT WITHIN THE BOUNDARIES OF LOCAL WORKINGS

M. Antoshchenko¹, V. Mel'nik², M. Filatiev^{1*}, A. Dubovyk³¹Department of Labour Protection, Donbas State Technical University, Lysychansk, Ukraine²Department of Geotechnology Exploration of Resources, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia³State Enterprise "Coal Company "Krasnolyman'ska", Rodynske, Ukraine*Corresponding author: e-mail mfilatjev@gmail.com, tel. +380958462460

ABSTRACT

Purpose. To establish typical phases of the earth surface subsidence and rocks displacement on the local workings' boundary under the influence of the working face movement.

Methods. Development of the general picture of earth surface subsidence and rocks displacement on development workings' boundary. Selection and statistical processing of the experimental data for specific conditions of coal seam caving. Establishment of empirical dependencies and their research using derivatives to determine typical stages of the process. Analysis of the obtained results.

Findings. Characteristic stages of the earth surface subsidence and rocks displacement on the local workings' boundary have been defined.

Originality. The start of the earth surface subsidence marks the beginning of the active phase of high rock pressure manifestation in front of the working face – HRP zone.

Practical implications. The results allow to predict the maximum area of rock pressure manifestation and to develop measures for local workings' maintenance in advance.

Keywords: earth surface, seam, caving, subsidence, local workings, working face, roof, soil, stages, intensity

1. ВВЕДЕНИЕ

Отработка угольных пластов оказывает, в первую очередь, влияние на сдвигание вмещающих пород. В результате этого изменяется горное давление на крепь подготовительных и очистных выработок, а на земной поверхности образуются мульды сдвигания. В одном случае происходит деформирование крепи выработок и существенно усложняются условия их поддержания в зоне влияния очистных работ. Во втором – необходимо осуществлять мероприятия по защите объектов на земной поверхности (Чернухая, Filatiev, & Antoshchenko, 2013; Balek, 1988).

На основании аналогичного протекания процессов оседания земной поверхности (Gavrilenko, 2001; Antoshchenko, Filat'yev, & Chernaya, 2014) и сдвигания

пород под влиянием движущегося очистного забоя на контуре участков выработок (Bondarenko, Denisov, & Demidov, 2011; Demin, Aliev, Mausymbaeva, Demina, & Kamarov, 2013), сделали предположение о возможной связи между рассматриваемыми явлениями.

Установление общих закономерностей или отличий между оседанием земной поверхности и условиями поддержания участков выработок может способствовать успешному решению многих инженерных задач (Brady & Brown, 1999; Han, Hu, & Cui, 2011). К таким задачам относится разработка рациональных мероприятий по защите объектов на земной поверхности и поддержанию участков выработок в зоне влияния очистных работ. Исследования в этом направлении являются весьма актуальными.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Характерной особенностью, объединяющей оседание земной поверхности и сдвигение пород на контуре участковых выработок, является одинаковый вид экспериментальных зависимостей динамики протекания рассматриваемых процессов. К общим признакам этих процессов относится постепенное нарастание оседания земной поверхности и сдвигения пород на контуре участковых выработок. Интенсивность оседания земной поверхности и сдвигения пород усиливается по мере приближения очистного

забоя. После прохода лавы происходит последующее затухание процессов. Динамику оседания земной поверхности и сдвигения пород кровли и почвы участковой выработки под влиянием очистного забоя можно описать схемой (Рис. 1). В этой схеме по оси абсцисс отложены расстояния (L_3) от проекции линии очистного забоя на земную поверхность до точек наблюдений, а также расстояния от очистного забоя (L_{II} и L_K) до точек наблюдения за сдвижением пород почвы и кровли на контуре выработки.

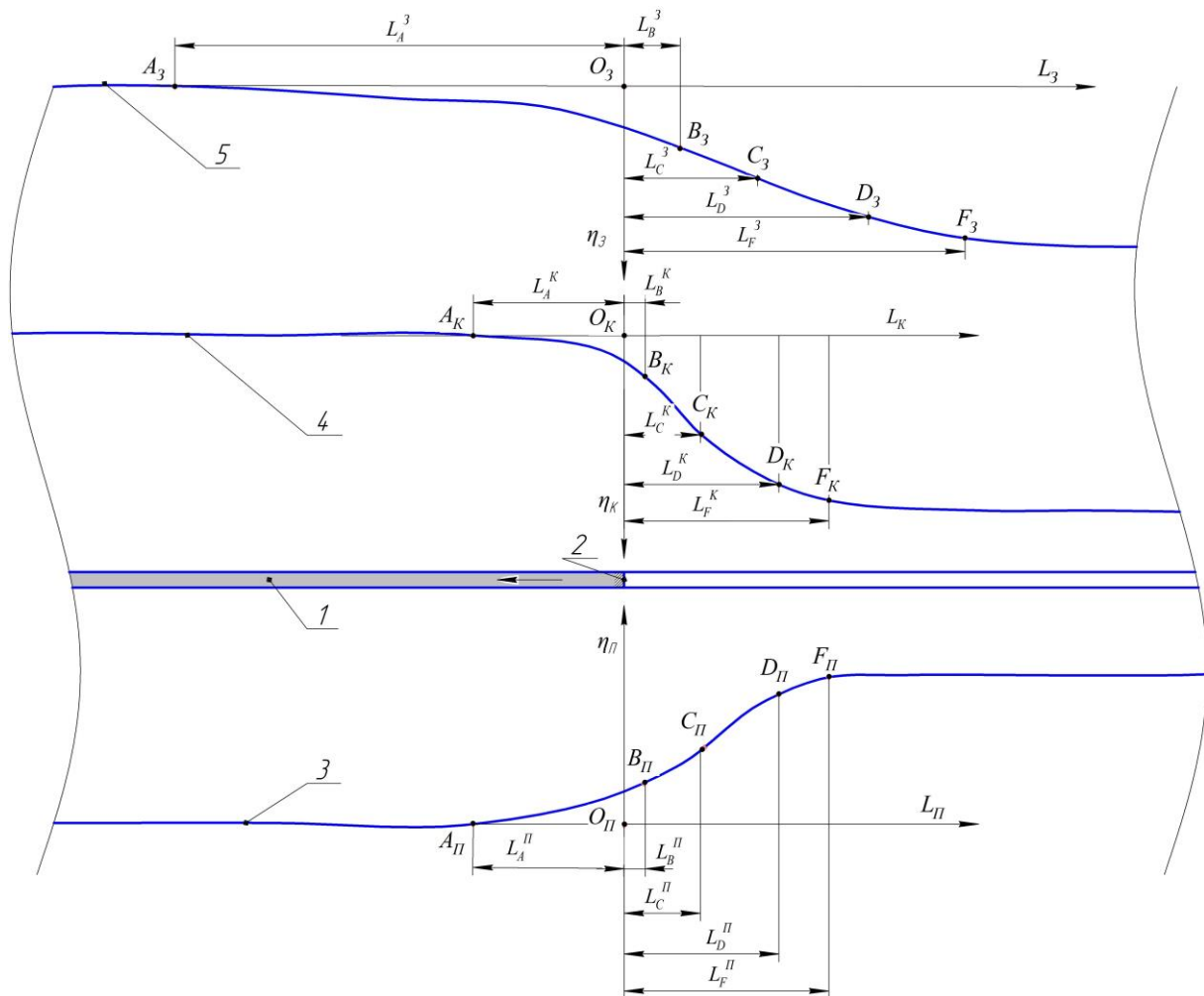


Рисунок 1. Схема оседания земной поверхности и сдвигения пород кровли и почвы участковой выработки относительно очистного забоя: 1 – разрабатываемый пласт; 2 – очистной забой; 3, 4, 5 – кривые, характеризующие соответственно сдвигение почвы и кровли участковой выработки, и оседание земной поверхности; L_{II} , L_K , L_3 – оси абсцисс соответственно для почвы и кровли выработки, и земной поверхности; η_{II} , η_K , η_3 – оси ординат соответственно для почвы и кровли выработки, и земной поверхности; A_{II} , B_{II} , C_{II} , D_{II} , F_{II} – характерные точки кривой сдвигения почвы; A_K , B_K , C_K , D_K , F_K – характерные точки кривой сдвигения кровли; A_3 , B_3 , C_3 , D_3 , F_3 – характерные точки оседания земной поверхности

Характерными точками, определяющими динамику происходящих процессов, являются следующие: A_{II} , A_K , A_3 – соответствуют началу сдвигения пород почвы и кровли выработок и земной поверхности; O_{II} , O_K , O_3 – находятся в створе с очистным забоем и служат началом отсчета координатных осей; B_{II} , B_K , B_3 – начало активной стадии сдвигения пород

и кровли выработок и оседания земной поверхности; C_{II} , C_K , C_3 – соответствуют максимальной скорости сдвигения пород и оседания земной поверхности и являются точками перегиба кривых; D_{II} , D_K , D_3 – окончание активных стадий и начало стадий затухания; F_{II} , F_K , F_3 – начало остаточного влияния очистного забоя на рассматриваемые процессы.

Стадии затухания в схеме ограничиваются точками F_{II} , F_K и F_3 . Оседание земной поверхности в точке F_3 составляет примерно 0.97 – 0.99 от конечного (η^K) при закончившихся процессах уплотнения пород (Gavrilenko, 2011). Окончание процессов в точках F_{II} и F_K можно установить экспериментально, сравнивая их сдвигение с изменением контура выработки за пределами влияния очистного забоя. Согласно исследованиям (Demina, Aliev, Mausymbaeva, Demina, & Kamarov, 2013) при нахождении выработок вне зоны очистных работ разность между конвергенцией кровли – почвы не превышает 10%, а уменьшение проектных сечений выработок – 0.8%. При расчете координат точек F_{II} и F_K , учитывая приведенные соотношения, воспользовались рекомендациями (Gavrilenko, 2011).

Цель работы – на основании экспериментальных данных установить характерные стадии оседания земной поверхности и сдвига пород почвы и кровли участковой выработки под влиянием движущегося очистного забоя.

Методика работы предусматривает несколько последовательных этапов:

- разработку общей схемы оседания земной поверхности и сдвига пород почвы и кровли участковой выработки (Рис. 1);
- анализ имеющихся экспериментальных данных оседания земной поверхности и сдвига пород на контуре участковых выработок;
- подбор математических зависимостей, наиболее точно описывающих рассматриваемые процессы и отражающих их физическую сущность;
- исследование эмпирических уравнений, полученных на основе принятой математической зависимости с использованием производных для установления характерных точек оседания земной поверхности и сдвига пород на контуре участковой выработки;
- определение расстояний от характерных точек оседания земной поверхности до проекции очистного забоя ($L_A^3, L_B^3, L_C^3, L_D^3, L_F^3$) и удаление характерных точек сдвига пород почвы и кровли от очистного забоя ($L_A^{II}, L_B^{II}, L_C^{II}, L_D^{II}, L_F^{II}$ и $L_A^K, L_B^K, L_C^K, L_D^K, L_F^K$);
- сравнение установленных параметров и выводы об общих или отличительных закономерностях протекания рассматриваемых процессов.

Для практической реализации схемы (Рис. 1) в качестве исходной функции, описывающей рассматриваемые процессы, на основании результатов работы (Antoshchenko, Filat'ev, & Cherpurnaya, 2014), приняли логистическую кривую вида:

$$\eta(L) = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(-c \cdot L)}, \quad (1)$$

где:

η – оседание точки наблюдения на земной поверхности или сдвигение пород на контуре выработки;

a – эмпирический коэффициент, соответствующий конечному значению оседания (η^K);

b, c – эмпирические коэффициенты, определяющие характерные стадии процессов;

L – расстояния, характеризующие положение точек относительно очистного забоя по оси абсцисс.

Эмпирические коэффициенты уравнения (1) a, b, c , которые соответствуют параметрам оседания земной поверхности в условиях шахты “Степная”, определили согласно эмпирическим зависимостям (Antoshchenko, Filat'ev, & Cherpurnaya, 2014). Было установлено, что коэффициенты a, b и c зависят от мощности разрабатываемого пласта (m), глубины ведения работ (H), скорости подвигания очистного забоя ($v_{оч}$) и длины лавы (L_l):

$$a = \frac{1}{\left(-2.64 \cdot 10^{-4} \cdot m + 1.54 \cdot 10^{-3}\right)}; \quad (2)$$

$$b = \frac{1}{\frac{-0.14 \cdot v_{оч}}{H + 0.19}}; \quad (3)$$

$$c = 0.205 + 0.0148 \cdot \ln\left(\frac{1}{m \cdot L_l \cdot H}\right). \quad (4)$$

Корреляционные отношения (R) для эмпирических зависимостей (2) – (4) соответственно составили 0.881, 0.884 и 0.986. Это свидетельствует о возможности достаточно точного определения коэффициентов зависимости (1) согласно уравнениям (2) – (4). Для их расчета использовали параметры, характеризующие условия эксплуатации 157-й и 161-й лав шахты “Степная” ($m = 1.04$ м, $H = 395$ м, $v_{оч} = 122$ м/мес, $L_l = 300$ м). Для указанных условий значения коэффициентов a, b и c , характеризующих оседание земной поверхности, соответственно составили 809, 6.81 и 0.032.

Эмпирические коэффициенты уравнения (1) для аналитического описания сдвига пород кровли и почвы на контуре 159-го и 163-го штреков определили по результатам обработки экспериментальных данных (Bondarenko, Denisov, & Demidov, 2011) методом наименьших квадратов (Рис. 2). Установленные зависимости практически функционально описывают динамику сдвига пород на контуре участковых выработок ($R = 0.964 - 0.986$). Это свидетельствует о возможности их применения в инженерных расчетах.

Таким образом, на основании анализа имеющихся экспериментальных данных определили эмпирические коэффициенты логистической зависимости (1), характеризующих как оседание земной поверхности, так и сдвигение пород кровли и почвы участковых выработок. Применение одной исходной зависимости позволяет установить степень близости или отличия параметров оседания земной поверхности и сдвига пород на контуре участковых выработок.

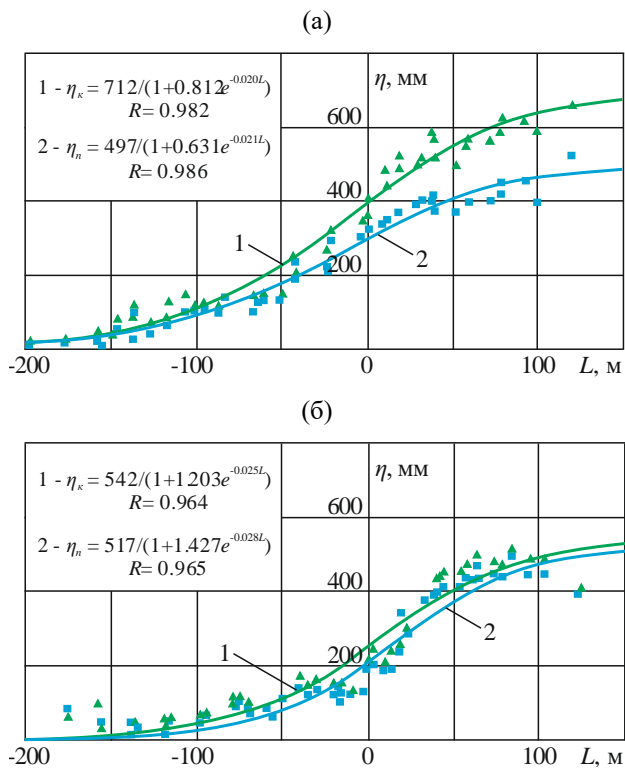


Рисунок 2. Зависимость сдвижения пород (η) на контуре 159-го (а) и 163-го (б) штреков от расстояния до очистного забоя (L) при отработке 157-й и 161-й лав шахтой “Степная”: 1, 2 – усредняющие кривые при сдвижении пород соответственно кровли и почвы; \blacktriangle , \blacksquare – экспериментальные данные; R – корреляционное отношение

Для установления стадий протекания процессов оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре участковых выработок (определения координат характерных точек) использовали методические подходы (Gavrilenko, 2011) исследования функций с применением их производных. Результаты исследования логистической кривой и общие уравнения для определения координат характерных точек приведены в Таблице 1.

Подставив в эти уравнения значения эмпирических коэффициентов (a , b и c) определили координаты характерных точек оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре участковых выработок при отработке 157-й и 161-й лав шахтой “Степная”.

На основании численных значений координат характерных точек (Таблица 1) и расположения кривых относительно очистного забоя (Рис. 3), произвели сравнительный анализ процессов оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре участковых выработок.

Коэффициент a характеризует окончание процессов. Максимальное его значение соответствовало оседанию земной поверхности (809 мм), что несколько меньше вынимаемой мощности разрабатываемого пласта ($m = 1.04$ м). Сдвижение кровли на контуре 159-го и 163-го штреков соответственно достигало 705 и 537 мм. Конечное сдвижение поч-

вы в этих выработках составило 492 и 512 мм. Сдвижение пород почвы, по характеру проявления и по абсолютным значениям параметров мало отличается от сдвижения пород кровли. Это, очевидно, обусловлено низкими прочностными свойствами вмещающих пород. В условиях прочных вмещающих пород различия в сдвижении кровли и почвы участковых выработок, следует ожидать более существенными.

Коэффициенты b и c определяют координаты характерных точек по оси абсцисс. От их соотношения зависят размеры отдельных стадий, характеризующих интенсивность процессов. Коэффициент $b = 6.81$ для земной поверхности в 5 – 10 раз превышал его значения (0.631 – 1.422) для контура участковых выработок, а величина $c = 0.032$ была сопоставима с аналогичными коэффициентами для выработок ($c = 0.020 - 0.028$).

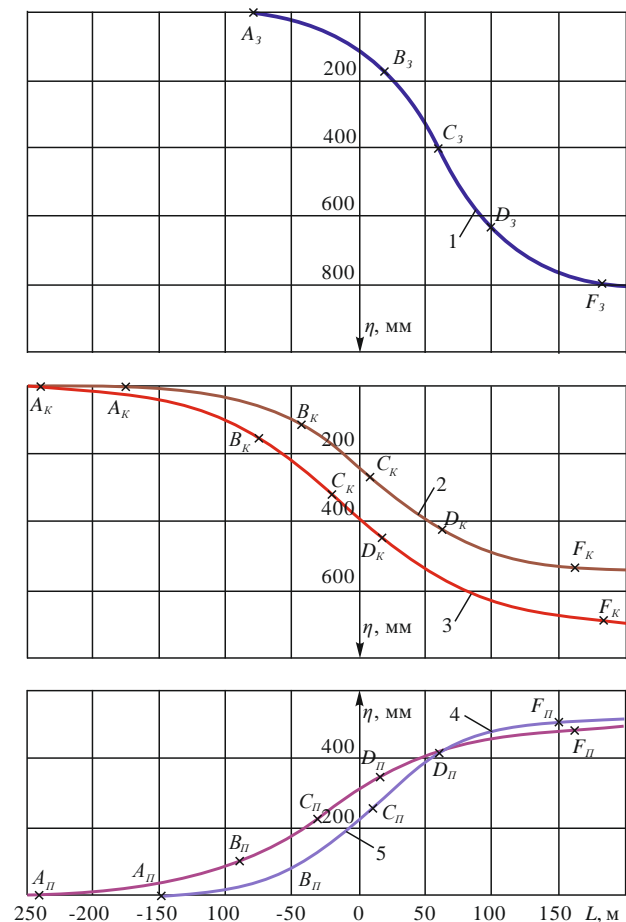


Рисунок 3. Зависимости оседания точек земной поверхности и сдвижения пород на контуре подготовительных выработок (η) от их положения относительно очистного забоя (L) в условиях шахты “Степная”: 1 – кривая оседания земной поверхности; 2, 4 – кривые сдвижения кровли и почвы на контуре 159-го штрека; 3, 5 – кривые сдвижения кровли и почвы на контуре 163-го штрека; A_n, B_n, C_n, D_n, F_n – характерные точки сдвижения пород почвы; A_k, B_k, C_k, D_k, F_k – характерные точки сдвижения пород кровли; A_3, B_3, C_3, D_3, F_3 – характерные точки оседания земной поверхности

Таблица 1. Результаты определения координат характерных точек оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре выемочных 159-го и 163-го штреков шахты “Стенная”

Характерные точки логистической кривой	Уравнения для определения координат характерных точек логистической кривой		Значения эмпирических коэффициентов (a, b, c) логистической зависимости и координаты характерных точек (L, η)									
			Земная поверхность	159-й штрек				163-й штрек				
	абсцисса, L , м	ордината, η , мм		кровля		почва		кровля		почва		
			$a = 809$ $b = 6.800$ $c = 0.032$	$a = 712$ $b = 0.812$ $c = 0.020$	$a = 497$ $b = 0.630$ $c = 0.021$	$a = 542$ $b = 1.203$ $c = 0.025$	$a = 517$ $b = 1.427$ $c = 0.028$					
		$L, м$	$\eta, мм$	$L, м$	$\eta, мм$	$L, м$	$\eta, мм$	$L, м$	$\eta, мм$	$L, м$	$\eta, мм$	
A	$\frac{4.595 - \ln b}{-c}$	0	-84	0	-240	0	-241	0	-176	0	-151	0
O	0	$\frac{\eta_K}{1+b}$	0	104	0	393	0	305	0	246	0	213
B	$\frac{\ln\left(\frac{3.73}{b}\right)}{-c}$	$0.21 \cdot \eta_K$	19	170	-76	150	-85	104	-45	114	-34	109
C	$\frac{\ln b}{c}$	$0.50 \cdot \eta_K$	60	405	-10	356	-22	249	7	271	13	259
D	$\frac{\ln\left(\frac{0.286}{b}\right)}{-c}$	$0.79 \cdot \eta_K$	101	639	17	562	20	393	60	428	60	408
F	$\frac{3.892 - \ln b}{c}$	$0.99 \cdot \eta_K$	182	801	184	705	163	492	163	537	152	512

Разные значения эмпирических коэффициентов обусловили неодинаковое расположение характерных точек мульды сдвижения на дневной поверхности и пород на контуре участков выработок относительно очистного забоя. Начало сдвижения пород кровли и почвы происходило на расстоянии -151...-241 м (Рис. 3, Табл. 1), что значительно больше расстояния от проекции точки A_3 земной поверхности до створа очистного забоя ($L_A = -84$ м).

Начало оседания земной поверхности соответствует началу активных стадий сдвижения пород (точкам B_{II} и B_K) на контуре выработок. Во всех случаях активная стадия сдвижения пород началась впереди очистного забоя. Это указывает на то, что расположение точки A_3 земной поверхности определяет начало активного проявления повышенного горного давления впереди очистного забоя (зону ПГД). Полученные результаты указывают на участие в формировании зон ПГД всей породной толщи от разрабатываемого пласта до земной поверхности. Они подтверждаются прямо пропорциональными экспериментальными зависимостями смещений пород в выработках от глубины ведения очистных работ. Максимальная интенсивность сдвижения пород на контуре выработок наблюдалась (Рис. 3) в непосредственной близости к очистному забою в точках C_{II} и C_K . Активная же стадия оседания земной поверхности происходила (точки A_3, B_3, C_3) после прохода очистного забоя над выработанным пространством.

Окончанию процессов оседания земной поверхности и сдвижения пород контура выработок соответствовали примерно одинаковые расстояния (152 – 184 м) от очистного забоя (точки F_{II}, F_K, F_3).

3. ВЫВОДЫ

Приведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили сделать следующие важные для науки и производственной деятельности выводы:

- начало оседания земной поверхности соответствует началу стадии интенсивного сдвижения пород кровли и почвы впереди очистного забоя;
- активная стадия сдвижения пород контура подготовительных выработок начинается впереди очистного забоя, а заканчивается после его прохода;
- активная стадия оседания земной поверхности происходит над выработанным пространством позади очистного забоя;
- процессы оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре участков выработок прекращаются примерно на одном расстоянии после прохода очистного забоя.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья написана в рамках госбюджетной научно-исследовательской тематики №208, выполняемой Донбасским государственным техническим университетом, с использованием исходных данных из статьи В.И. Бондаренка, С.Л. Денисова и М.С. Демидова (Bondarenko, Denisov, & Demidov, 2011), за что авторы выражают признательность данному коллективу.

REFERENCES

- Antoshchenko, N.I., Filat'yev, N.I., & Chepurayeva, L.A. (2014). Opredelenie empiricheskikh koeffitsientov dlya prognozirovaniya dinamiki sdvizheniya zemnoy poverkhnosti pri otrabotke ugol'nykh plastov. *Zbirnyk naukovykh prats DonDTU*, 1(42), 6-14.
- Balek, A.E. (1988). Rock Pressure Control in Chamber Mining. *Soviet Mining Science*, 24(1), 21-26. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02498067>
- Bondarenko, V.I., Denisov, S.L., & Demidov, M.S. (2011). Zakonomernosti sdvizheniya porod na konture vyemochnykh shtrekov. *Ugol' Ukrainy*, (3), 3-5.
- Brady, B.H.G., & Brown, E.T. (1999). Mining-Induced Surface Subsidence. *Rock Mechanics*, 438-465. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-015-8129-5_16
- Chepurayeva, L.A., Filatiev, M.V., & Antoshchenko, N.I. (2013). Forecasting of Process Parameters of Earth Surface Movement during Coal Seams Extraction. *Mining of Mineral Deposits*, 7(1), 105-113. <http://dx.doi.org/10.15407/mining07.01.105>
- Demina, T.V., Aliev, S.B., Mausymbaeva, A.D., & Kamarov, R.K. (2013). Smeshchenie konturov podgotovitel'nykh vyrabotok pri geomekhanicheskikh protsessakh. *Ugol'*, (4), 69-72.
- Gavrilenko, Yu.N. (2011). Prognozirovaniye sdvizheniy zemnoy poverkhnosti vo vremeni. *Ugol' Ukrainy*, (6), 45-49.
- Han, H.L., Hu, N.L., & Cui, B. (2011). Dynamic Modeling of Surface Subsidence Induced by Underground Mining. *Advanced Materials Research*, (382), 323-327. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.382.323>

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Установить характерные стадии оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре участковых выработок под влиянием движущегося очистного забоя.

Методика. Разработка общей схемы оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре подготовительных выработок. Подбор и статистическая обработка экспериментальных данных для конкретных условий отработки угольного пласта. Установление эмпирических зависимостей и их исследование с применением производных для установления характерных стадий протекания процессов. Анализ полученных результатов.

Результаты. Установлены характерные стадии оседания земной поверхности и сдвижения пород на контуре участковых выработок.

Научная новизна. Начало оседания земной поверхности определяет начало активной стадии проявления повышенного горного давления впереди очистного забоя – зону ПГД.

Практическая значимость. Результаты работы позволяют прогнозировать зоны максимального проявления горного давления и заблаговременно разрабатывать мероприятия по поддержанию участковых выработок.

Ключевые слова: земная поверхность, пласт, отработка, оседание, участковая выработка, очистной забой, кровля, почва

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Встановити характерні стадії осідання земної поверхні та зрушення порід на контурі дільничних виробок під впливом рухомого очисного вибою.

Методика. Розробка загальної схеми осідання земної поверхні та зрушення порід на контурі підготовчих виробок. Підбір і статистична обробка експериментальних даних для конкретних умов відробки вугільного пласта. Встановлення емпіричних залежностей та їх дослідження із застосуванням похідних для встановлення характерних стадій протікання процесів. Аналіз отриманих результатів.

Результати. Встановлені характерні стадії осідання земної поверхні і зрушення порід на контурі дільничних виробок.

Наукова новизна. Початок осідання земної поверхні визначає початок активної стадії прояву підвищеного гірського тиску попереду очисного вибою – зону ПГТ.

Практична значимість. Результати роботи дозволяють прогнозувати зони максимального прояву гірського тиску й завчасно розробляти заходи щодо підтримки дільничних виробок.

Ключові слова: земля поверхня, пласт, відробка, осідання, дільнична виробка, очисний вибій, покрівля, підшова

ARTICLE INFO

Received: 11 May 2016

Accepted: 8 August 2016

Available online: 30 September 2016

ABOUT AUTHORS

Mykola Antoshchenko, Doctor of Technical Sciences, Rector of Donbas State Technical University, 84 Peremohy Ave., 93100, Lysychansk, Ukraine. E-mail: donstu.lisichansk@ukr.net

Vladimir Mel'nik, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Geotechnology Exploration of Resources, National University of Science and Technology "MISIS", 6 Leninskiy Ave, 119991, Moscow, Russia. E-mail: msmu-prpm@yandex.ru

Mykhailo Filatiev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour Protection, Donbas State Technical University, 84 Peremohy Ave., 93100, Lysychansk, Ukraine. E-mail: mfilatev@gmail.com

Oleksandr Dubovyk, General Director, State Enterprise "Coal Company "Krasnolymanska", 9 Peremohy St, 85310, Rodynske, Ukraine. E-mail: company@krasnolimanskaya.com.ua