

УДК 622.834

к.т.н. Ларченко В. Г.,
Коваленко Е. В.,
Маталкина Ю. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МАКСИМАЛЬНЫЕ ОСЕДАНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОДРАБОТКЕ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Установлена необходимость корректировки действующих отраслевых «Правил подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом» при подработке сооружений на больших глубинах, предложена формула расчёта максимальных оседаний.

Ключевые слова: максимальные оседания, деформации земной поверхности, глубина подработки, зависимость.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Ежегодно увеличивается глубина разработки угольных пластов. В настоящее время на многих действующих угольных шахтах очистные работы ведутся на глубинах значительно больше 1000 м. Третья часть оставшихся в Донбассе балансовых запасов угля находится под застроенными территориями, коммуникациями и природными объектами. Безопасная подработка сооружений земной поверхности возможна принятием горных или конструктивных мер их охраны, выбор которых зависит от ожидаемых величин сдвижений и деформаций земной поверхности. Определить последние можно трудоёмкими натурными инструментальными наблюдениями, автоматизированной наблюдательной станцией [1] и вычислением по методике отраслевых «Правил подработки ...» [2], применимой при подработке на глубинах до 1000 м (и более).

Предварительные исследования [3] указывают на необходимость корректировки методик расчёта [2, 4] ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при её подработке на больших глубинах, что является актуальной научной и практической задачей.

Постановка задачи. Задачей этапа исследований является обоснование необходимости корректировки действующих нормативных «Правил подработки ...» [2]

для расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций подрабатываемых на больших глубинах сооружений и предложение формулы вычисления максимальных оседаний земной поверхности.

Изложение материала и его результаты. На параметры процесса сдвижений и деформаций земной поверхности влияет ряд факторов: глубина подработки, вынимаемая мощность пласта, размеры выработанного пространства, угол падения пласта, крепость пород, тектонические нарушения, способ управления кровлей, литология покрывающей толщи, нарушенность толщи первичной подработкой, кливаж и другие.

Целью этапа исследований является дифференцирование глубины подработки из многофакторного влияния на величину максимального оседания и деформации земной поверхности при подземной подработке угольных пластов.

Исследования выполнялись методом натуральных наблюдений [5], математическим моделированием методом конечных элементов [6] и расчётом ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [3, 7] по методике отраслевого стандарта Украины [2], где максимальное оседание η_m рекомендовано вычислять по формуле

$$\eta_m = q_o \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2, \text{ м}, \quad (1)$$

где q_0 — относительная безразмерная величина максимального оседания, принимается в зависимости от марки угля и отношения мощности четвертичных отложений h к глубине разработки H по таблице А.1 [2]; m — вынимаемая мощность пласта, м; α — угол падения пласта, градус; N_1, N_2 — условные коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности, соответственно по падению и по простиранию пласта, определяемые по формулам

$$N_1 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_1}{H} + \Delta D_{II} + \Delta D_B \right)}, \quad (2)$$

$$N_2 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_2}{H} + \Delta D_{III} + \Delta D_{OIII} \right)}, \quad (3)$$

где D_1, D_2 — размеры очистной выработки соответственно по падению и по простиранию пласта, м; $\Delta D_{II}, \Delta D_B, \Delta D_{III}, \Delta D_{OIII}$ —

поправки к относительной длине лавы за счёт целика соответственно со стороны падения, восстания, простирания и обратной простиранию (м), определяемые по таблице А.2 [2] с учётом размера целика l у соответствующей границы, средней глубины H (от 100 м и менее до 1000 и более), марки угля и мощности наносов h .

С целью выделения влияния глубины разработки H на максимальные оседания земной поверхности выполнен расчёт η_m по методике [2] при H от 100 до 1600 м и постоянных горно-геологических условиях: $m=1$ м, $\alpha=5^\circ$, $D_I=2000$ м, первичная подработка, отношение $\frac{l}{H} \geq 0,8$, $\frac{h}{H} \leq 0,3$, $\frac{D_2}{H} = 1,2$ (полная подработка) для углей марки антрацит ($q_0=0,75$) и других марок ($q_0=0,8$).

Результаты вычислений η_m приведены в таблице 1, по ним построены графики зависимости η_m от H (рис. 1).

Таблица 1

Максимальные оседания η_m и деформации i_m, ε_m при различных H

$q_0=0,75$				$q_0=0,8$				
$H, \text{ м}$	$\eta_m, \text{ м}$	$i_m, 1 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_m, 1 \cdot 10^{-3}$	$\eta_m, \text{ м}$		$L_3, \text{ м}$	$i_m, 1 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_m, 1 \cdot 10^{-3}$
				$\frac{l}{H} \geq 0,8$	$\frac{l}{H} = 0,4$			
100	0,618	12,3	-6,7	0,741	0,798	106,4	14,2	-6,7
200	0,65	6,6	-3,4	0,742	0,798	212,8	7,10	-3,4
300	0,68	4,7	-2,2	0,749	0,798	319,2	4,80	-2,3
400	0,709	3,8	-1,84	0,757	0,798	425,5	3,72	-1,79
500	0,713	3,1	-1,5	0,764	0,798	532	3,03	-1,47
600	0,716	2,6	-1,27	0,771	0,798	638,4	2,58	-1,25
700	0,720	2,3	-1,1	0,779	0,798	744,8	2,27	-1,09
800	0,723	2,0	-0,98	0,786	0,798	851,2	2,01	-0,98
900	0,727	1,8	-0,88	0,794	0,798	957,6	1,82	-0,90
1000	0,730	1,64	-0,81	0,797	0,798	1064	1,65	-0,82
1100	0,73	1,49	-0,73	0,798	0,798	1170,4	1,50	-0,74
1200	0,73	1,37	-0,69	0,798	0,798	1276,8	1,37	-0,68
1300	0,73	1,26	-0,63	0,798	0,798	1383,2	1,27	-0,63
1400	0,73	1,17	-0,58	0,798	0,798	1489,5	1,18	-0,59
1500	0,73	1,1	-0,54	0,798	0,798	1596	1,10	-0,55
1600	0,73	1,0	-0,51	0,798	0,798	1702,4	1,0	-0,51

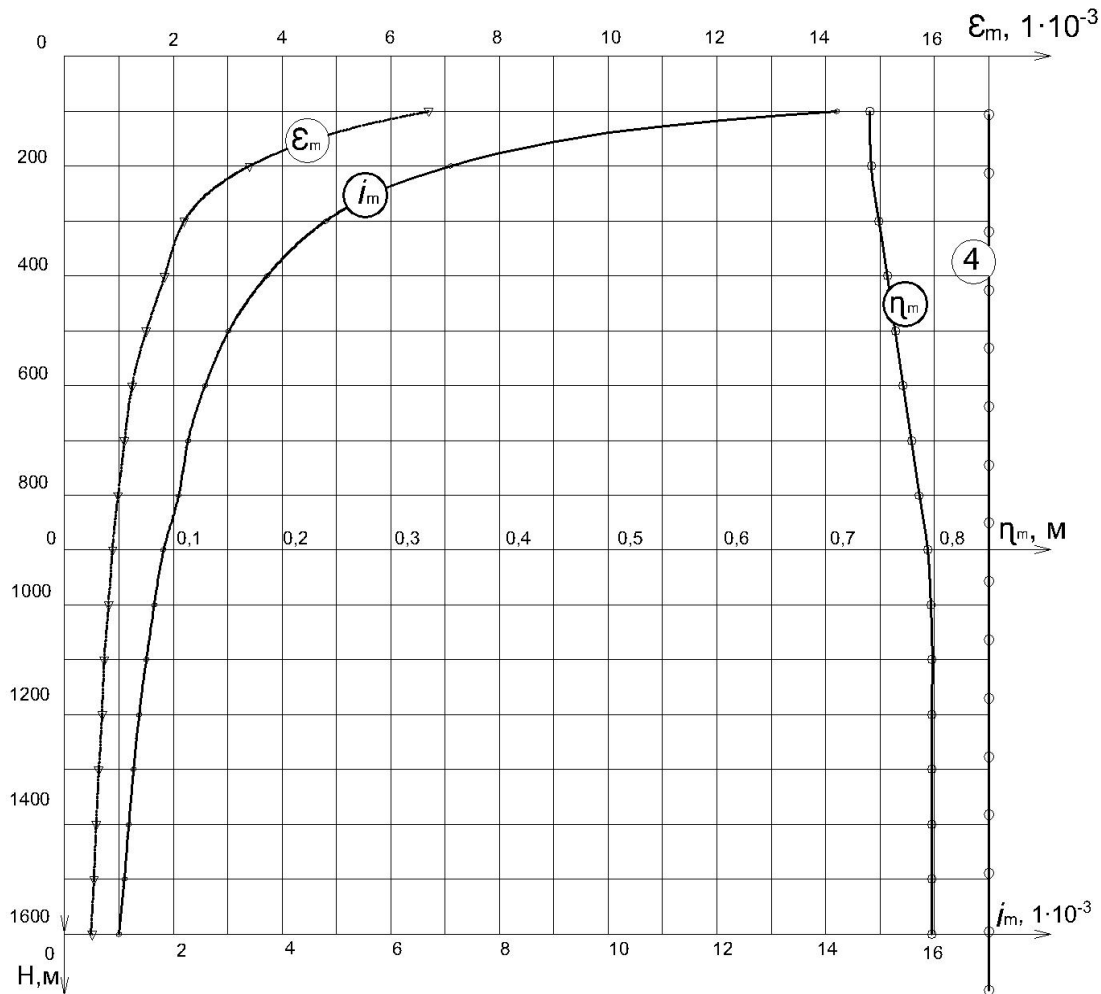


Рисунок 1 Графики зависимости максимальных оседаний η_m , наклонов i_m и горизонтальных деформаций ε_m земной поверхности от H по методике [2] при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $q_0 = 0,8$, $\frac{l}{H} \geq 0,8$

Анализ вычисленных по методике [2] максимальных оседаний (табл. 1) и графиков (рис. 1) показывает, что при постоянном отношении $\frac{D_2}{H} = 1,2$ в тех же горно-геологических условиях η_m возрастает до глубины 1000 м, а с дальнейшим увеличением H η_m остаётся постоянной величиной и не зависит от H , как и при $\frac{l}{H} = 0,4$ (прямая 4, рис. 1), что противоречит теории прочности и процесса сдвижения слоистой толщи горных пород.

Наглядным подтверждением этому являются вычисленные по методике [2] максимальные наклоны $i_{x \max}$ и горизонтальные деформации ε_m земной поверхности в полумульде по простиранию пласта при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $q_0 = 0,8$, $a_0 = 0,3$ и мощности наносов менее 10 м по формулам (4, 5):

$$i_x = \frac{\eta_m}{L_3} \cdot S'(Z_x)_m \cdot S(Z_y), 1 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = 0,5 a_0 \frac{\eta_m}{L_3} S''(Z_x)_m S(Z_y), 1 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где L_3 — длина полумульды по простиранию пласта, м,

$$L_3 = H(\operatorname{ctg}\delta_0 + \operatorname{ctg}\psi_3), \text{ м}, \quad (6)$$

где δ_0 , ψ_3 — соответственно граничный угол и угол полных сдвижений в полумульде по простиранию пласта [2]; $S(Z)$, $S'(Z)$, $S''(Z)$ — значения функций, принятые интерполяцией в таблицах А.3, А.4, А.5 [2], в зависимости от вычисленных по формулам (2), (3) коэффициентов подработанности N_1 , N_2 ; η_m — максимальное оседание земной поверхности (табл. 1). Результаты вычислений L_3 , i_m , ε_m сведены в таблицу 1, по ним построены кривые зависимостей i_m и ε_m от H по методике [2] при постоянных $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $D_l = 2000$ м, $m = 1$ м, $\alpha = 5^\circ$ (рис. 1).

Анализ зависимости максимальных наклонных i_m и горизонтальных деформаций ε_m земной поверхности от H (табл. 1, рис. 1) показывает, что их значения уменьшаются на 82 % при глубине до 600 м, а от 600 м и до 1600 м снижение их величин составляет только 11 % при остальных постоянных факторах. Это убедительно свидетельствует, что действующие отраслевые методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [2, 4] недостаточно учитывают влияние глубины подработки, особенно при H более 600 м.

Анализ влияющих на η_m факторов (формула 1) показывает, что q_0 только косвенно учитывает крепость покрывающих пород через марку угля и мощность наносов. Влияние крепости пород на η_m рассмотрено в работе Посыльного Ю. В. и Тетерина Е. А. [8]. Прямолинейная зависимость η_m от вынимаемой мощности пласта m многократно подтверждена натурными наблюдениями [3], математическим моделированием [6], в расчётах при-

нята постоянной величиной ($m = 1$ м), как и угол падения $\alpha = 5^\circ$.

Зависимость η_m от D_2 в этих же горно-геологических условиях соответствует общепризнанной теории сдвижения слоистых пород (рис. 2), где η_m увеличиваются с возрастанием D_2 до 1100 м при $\frac{D_2}{H} = 1,2$. При дальнейшем увеличении D_2 η_m остаётся постоянным, то есть образовалось плоское дно, наступила полная подработка.

В безразмерных коэффициентах N_1 , N_2 (формулы 2, 3) значения поправок ΔD к относительной длине лавы за счёт размера целика l у соответствующей границы недостаточно обоснованы. Так, в таблице А.2 [2] при $\frac{l}{H} = 0$, то есть целика нет, а поправки ΔD приведены от 0,14 до 0,02 со знаком плюс. При $\frac{l}{H} = 0,4$ ΔD для всех марок угля, кроме антрацита, равны нулю при всех H , таким образом η_m при $\frac{D_2}{H} = 1,2$ согласно [2] является постоянной величиной при H от 100 до 1600 м (прямая 4, рис. 1).

Но при $\frac{l}{H}$ менее 0,7 над целиком в полумульде по простиранию пласта происходит суммирование оседаний, горизонтальных деформаций растяжений и кривизны выпуклости от двух полумульд: со стороны простирания и обратной простиранию, что установлено равноточными натурными наблюдениями [5].

На этом этапе исследований, оставляя прежней структуру формулы (1), предлагаем вычислять η_m по формуле

$$\eta_m = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2 - K_P \cdot H^2, \text{ м}, \quad (7)$$

где K_P — коэффициент остаточных расслоений (разуплотнений) подработанной слоистой толщи горных пород, установленный натурными наблюдениями автора

статьи за сдвижением глубинных реперов, заложенных в пробуренные с поверхности вертикальные скважины [9], исследованиями Клишина Н. К., Кизиярова О. Л., Четверика М. С. и анализом результатов фактических оседаний земной поверхности при подработке на больших глубинах [10], $K_p = 3 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{м}^2}$. K_p требует дальнейшего

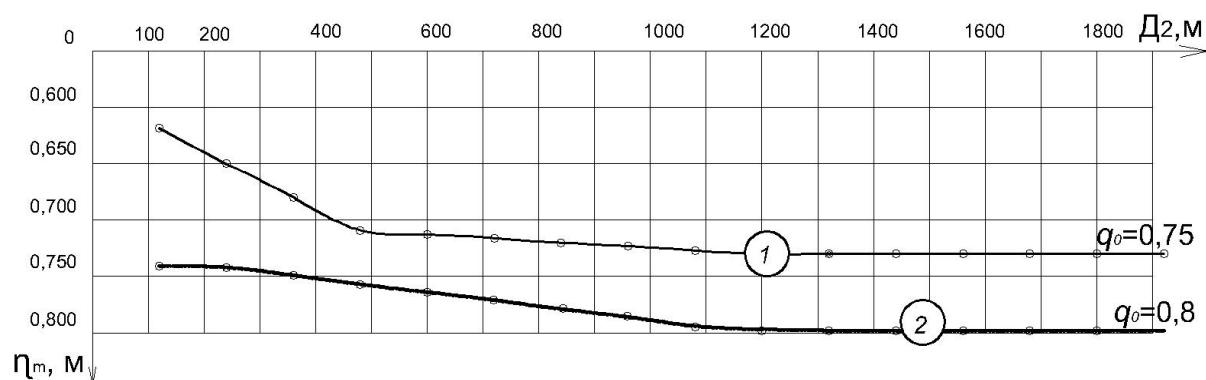
уточнения по результатам натуральных наблюдений на больших глубинах.

Результаты вычислений η_m по формуле (7) при $\frac{l}{H} = 0,4$ сведены в таблицу 2, по ним определены максимальные деформации i_m , ε_m по методике [2] и построены графики их зависимости от H (рис. 3) по тем же исходным данным, что и прямая 4 (рис. 1).

Таблица 2

Результаты η_m , вычисленных по формуле (7), и i_m , ε_m

$q_0=0,8, D_1=2000 \text{ м}, m=1\text{м}, \alpha=5^\circ \frac{D_2}{H}=1,2, \frac{l}{H}=0,4$				
$H, \text{ м}$	$\eta_m, \text{ м}$	$L_3, \text{ м}$	$i_m, 1 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_m 1 \cdot 10^{-3}$
100	0,795	106,4	15,24	7,17
200	0,786	212,8	7,57	3,6
300	0,771	319,2	5,0	2,39
400	0,750	425,5	3,68	1,77
500	0,723	532	2,85	1,39
600	0,690	638,4	2,31	1,12
700	0,651	744,8	1,9	0,92
800	0,606	851,2	1,55	0,75
900	0,555	957,6	1,27	0,63
1000	0,498	1064	1,03	0,51
1100	0,435	1170,4	0,82	0,41
1200	0,366	1276,8	0,63	0,31
1300	0,291	1383,2	0,46	0,23
1400	0,210	1489,5	0,31	0,15
1500	0,123	1596	0,17	0,08
1600	0,030	1702,4	0,04	0,02

Рисунок 2 Графики зависимости максимальных оседаний η_m земной поверхности от D_2

при $\frac{D_2}{H} = 1,2 : 1$ — при $q_0=0,75$; 2 — $q_0=0,8$ по методике [2]

Вычисленные значения максимальных горизонтальных деформаций в этом варианте при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $\frac{l}{H} = 0,4$, $m=1$ м уменьшились до граничного критерия мульды сдвига ($0,5 \cdot 10^{-3}$) на глубине 1000 м (табл. 2, рис. 3), а по методике [2] — при $H=1600$ м (табл. 1, рис. 1). Это значит, что при $D_2=1920$ м, $D_l=2000$ м мульда не достигает земной поверхности по критерию ε даже по методике [2] при $H=1600$ м, а η_m при $\frac{l}{H} = 0,4$ согласно [2] составляет 0,798 м? То есть область влияния очистных выработок размером 3840×2000 м по критерию ε имеет эллипсоидальную форму, а не перевернутой усечённой пирамиды, ограниченной граничными углами $\delta_0=70^\circ$ [2]. Горизонталь-

ные сдвигения и все виды деформаций земной поверхности зависят от η_m , что указывает на необходимость корректировки методики прогноза ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при добыче угля на больших глубинах [2], а также определений длин полумульд, граничных и углов сдвига, области и зон сдвига подработанной толщи пород.

Отдельный прогноз ожидаемых сдвижений и деформаций требуется при наличии в покрывающей пласт толще крепких песчаников мощностью более 30 м, задерживающих процесс сдвига на длительное время, затем мгновенным обрушением вызывающих «техногенные» землетрясения местного значения, что неоднократно отмечалось на шахтах ПО «Ровенькиантрацит».

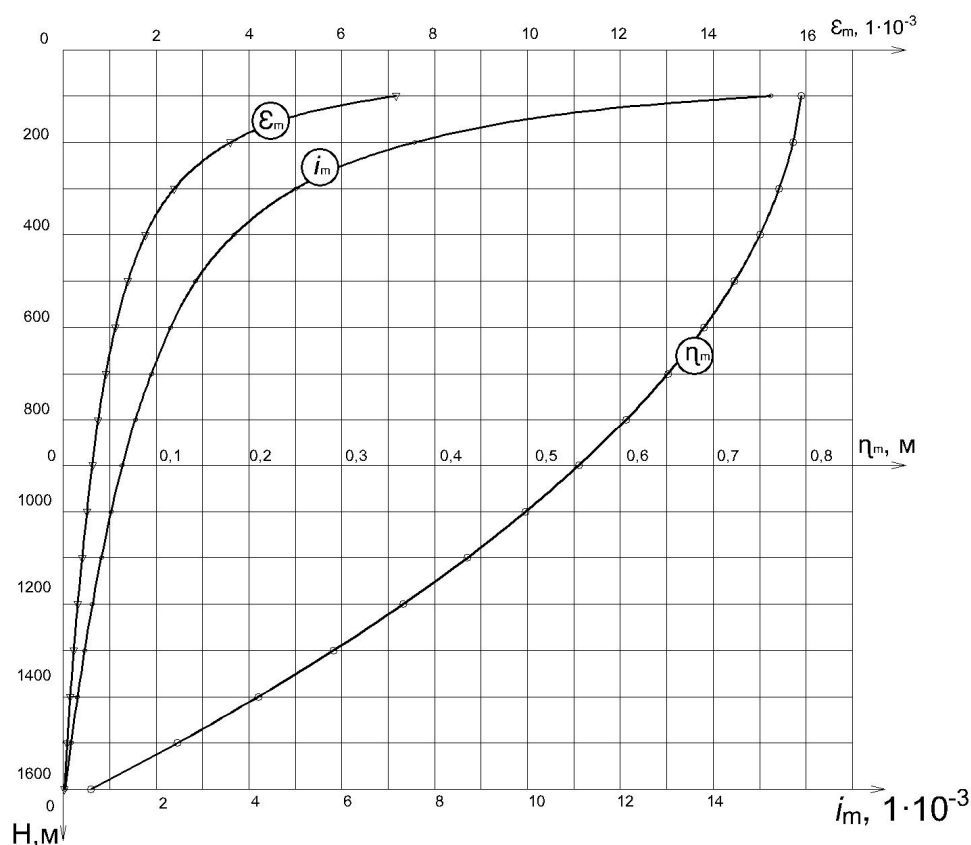


Рисунок 3 Графики зависимости η_m , i_m , ε_m земной поверхности от H при $m=1$ м, $\alpha=5^\circ$, $D_l=2000$ м,

$$\frac{D_2}{H} = 1,2; q_0=0,8; \frac{l}{H} = 0,4$$

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Действующие отраслевые методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [2, 4] требуют корректировки при добыче угля на больших глубинах (табл. 1, рис. 1).

2. Коэффициент остаточных расслоений K_p в предлагаемой формуле (7) требует уточнений по результатам натурных наблюдений или с помощью автоматизиро-

ванной наблюдательной станции [1], позволяющей повысить точность измерения линейных деформаций до 2400 раз.

3. Определение длин полумульд, граничных и углов сдвижения, области и зон деформирования подработанной толщи, корректировка методики расчёта ожидаемых деформаций земной поверхности при подработке на глубинах более 600 м являются задачей дальнейших исследований авторов.

Библиографический список

1. Ларченко, В. Г. Автоматизированная наблюдательная станция для мониторинга сдвижений и деформаций горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко, О. М. Куценко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2015. — Вып. 1 (44). — С. 49–55.
2. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом [Текст] : утв. Минтопэнерго Украины 28.11.2003. — Введ. 2003-11-28. — К. : 2004. — 128 с. — (Отраслевой стандарт Украины).
3. Ларченко, В. Г. Исследование влияния глубины подработки на параметры процесса сдвижения земной поверхности [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2017. — Вып. 7 (50). — С. 53–57.
4. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст] : утв. и введ. Минтопэнерго РФ РАН. Гос. НИИ горн. геомеханики и маркшейдерского дела. — Санкт-Петербург, 1998. — 291 с.
5. Ларченко, В. Г. Практические результаты исследований деформаций земной поверхности при отработке свиты пологих угольных пластов [Текст] / В. Г. Ларченко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2009». — Днепропетровск : НГУ, 2009. — С. 222–230.
6. Ларченко, В. Г. Определение зависимости параметров сдвижений и деформаций подработанной толщи пород от определяющих факторов методом конечных элементов [Текст] / В. Г. Ларченко, О. А. Черных // Вестник МАНЭБ. — Санкт-Петербург, 2006. — №. 22. — С. 16–24.
7. Ларченко, В. Г. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от основных определяющих факторов [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2016. — Вып. 4 (47). — С. 45–51.
8. Посыльный, Ю. В. Методика исследования влияния толщи горных пород на максимальные оседания земной поверхности [Текст] / Ю. В. Посыльный, Е. А. Тетерин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М. : МГГУ. — 2008. — №. 1. — С. 115–121.
9. Ларченко, В. Г. Процесс сдвижений и деформаций подработанного массива горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях : материалы 7-го Международного симпозиума. — Белгород : ВИОГЕМ, 2003. — С. 238–244.
10. Посыльный, Ю. В. Максимальные оседания земной поверхности в антрацитовых районах Донбасса [Текст] / Ю. В. Посыльный, А. А. Джулай, Е. А. Тетерин // Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. трудов ШИЮРГТУ (НПИ). — Новочеркасск : Набл, 2007. — 4.2. — С. 282–294.

© Ларченко В. Г.

© Коваленко Е. В.

© Маталкина Ю. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ Леоновым А. А.,
гл. маркшейдером шахты им. XIX съезда КПСС Кияненко Н. А.*

Статья поступила в редакцию 04.06.18.

к.т.н. Ларченко В. Г., Коваленко О. В., Маталкіна Ю. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**МАКСИМАЛЬНІ ОСІДАННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ПІДРОБЦІ
НА ЗНАЧНИХ ГЛИБИНАХ**

Обґрунтовано необхідність корегування галузевих «Правил підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом» для розрахунку очікуваних зрушень та деформацій земної поверхні при підземній розробці вугільних пластів на значних глибинах. Наведено скореговану формулу обрахування максимальних осідань гірських порід.

Ключові слова: *максимальні осідання, деформації земної поверхні, глибина підробки, залежність, корегування.*

PhD Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**MAXIMUM EARTH CRUST SUBSIDENCE AND DEFORMATION AT GREAT DEPTH
UNDERMINING**

There has been proved the necessity to correct the branch “Rules of undermining the buildings, constructions and natural surroundings at underground coal mining” for calculating the expected displacements and deformations of the earth crust at undermining the coal layers at great depths. There has been given the corrected calculation formula for maximum rock subsidence.

Key words: *maximum subsidence, earth crust deformation, undermining depth, dependence, correction.*