

УДК 622.83:622.023.23

к.т.н. Аверин Г. А.,  
к.т.н. Доценко О. Г.,  
Корецкая Е. Г.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, galagena1959@yandex.ru)

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПЕСЧАНИКОВ И ИЗВЕСТНЯКОВ НА МАКСИМАЛЬНОЕ ОСЕДАНИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ВЫЗВАННОЕ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ

*В работе предлагается повысить точность прогноза величины максимальных оседаний земной поверхности по нормативной методике путем применения корректирующего коэффициента, учитывающего долю крепких породных слоев в подрабатываемом массиве и соотношение ширины выработанного пространства к глубине разработки.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, метод конечных элементов, максимальные оседания земной поверхности, доля песчаников и известняков в подработанном массиве, отношение ширины выработанного пространства к глубине разработки.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Выемка пластов угля и других залежей полезных ископаемых вызывает образование в недрах земли пустот значительных размеров. Породы, залегающие в кровле очистных забоев, под действием горного давления и силы тяжести приходят в движение, обуславливая развитие процесса сдвижения всей толщи, включая земную поверхность.

Продолжительные наблюдения за подработкой объектов показали, что при соблюдении определенных условий возможна подработка объектов без нарушения их нормальной эксплуатации. Такими условиями являются: значительная глубина разработки, специально разработанные способы выемки полезных ископаемых, оборудование объектов перед подработкой специальными конструктивными мероприятиями и др.

Правильный и научно обоснованный подход к выбору мер охраны зданий и сооружений требует всестороннего изучения проявлений и установления закономерностей развития процесса сдвижения подработанной толщи пород и земной поверхности. Важно достоверно прогнозировать величины сдвижений и деформаций, рассчитываемых в главных сечениях мульды сдвижения земной поверхности. Нормативный прогноз основан на методе типовых кривых [1]. Во все расчетные формулы определения параметров сдвижения земной поверхности (безразмерные функции распределения оседаний, наклоны, кривизна, горизонтальные сдвижения и относительные горизонтальные деформации) входит величина максимальных оседаний. Точность определения последней влияет на погрешность величин деформаций, используемых при выборе мер охраны подрабатываемых объектов.

Расчитанные по рекомендациям [1] максимальные величины оседаний земной поверхности превышают фактические более чем на 50 %. Нормативная методика дает значительную погрешность прогноза. В настоящее время причины расхождений достаточно не изучены, поэтому важно исследовать влияние отдельных факторов на величину оседаний.

Впервые формулу для расчета максимальных оседаний земной поверхности при пологом залегании угольного пласта предложил профессор С. Г. Авершин [2]

$$\eta_o = \frac{a}{a + \sqrt{H}} \cdot m, \quad (1)$$

где  $a$  — коэффициент, равный 22 для условий Донбасса;

$H$  — глубина ведения очистных работ, м;  
 $m$  — мощность разрабатываемого пласта, м.

В правилах охраны 1972 года [3] приводится формула для расчета максимальных оседаний при первичной подработке, учитывающая угол падения пласта

$$\eta_m = q_o \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{t_1 \cdot t_2}, \quad (2)$$

где  $q_o$  — коэффициент, для района залегания антрацитов составляет 0,75;

$\alpha$  — угол падения пласта, град;

$t_1$  и  $t_2$  — коэффициенты подработанности земной поверхности соответственно по падению и простиранию пласта.

В правилах охраны 2004 г. [1] в расчет максимальных оседаний добавлена ширина выработанного пространства

$$\eta_m = q_o \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2, \quad (3)$$

где  $q_o$  — коэффициент, зависящий от марки угля и района залегания [1];

$N_1$  и  $N_2$  — коэффициенты, определяемые в зависимости от отношения расчётной ширины выработанного пространства  $D$  к глубине разработки  $H$ .

Рассмотренные методики [1–3] не учитывают влияния крепких горных пород, в частности наличия породных слоев-мостов, расположенных в подрабатываемой толще.

**Постановка цели.** В работе поставлена цель — повысить точность прогноза величины максимальных оседаний земной поверхности путем учета процентного содержания в подрабатываемом массиве крепких слоев пород (песчаников и известняков).

**Изложение материала и его результаты.** Полный учет исходной информации о

горно-геологических и горнотехнических условиях разработки месторождения возможен при использовании численного моделирования. Эксперимент выполнен с помощью программно-вычислительного комплекса «Лира», реализующего метод конечных элементов.

Базовая расчетная модель с размерами 3000 м по простиранию и 1200 м по падению разбивалась на прямоугольные элементы шириной 5 м и высотой 0,2–7 м в зависимости от мощности породных слоев. Чередующиеся слои различных типов пород, моделирующие подработанную толщу, отличаются между собой деформационными и прочностными свойствами (табл. 1).

Процесс оседания земной толщи моделировался по мере выемки выемочного столба, когда поведение пород максимально приближено к упругопластическому деформированию. Шаг подвигания очистного забоя в численной модели принимался равным 5–30 м.

Процесс оседаний земной поверхности моделировался для условий пяти очистных забоев, основные сведения о которых представлены в таблице 2.

Результаты моделирования процесса оседаний, вызванных отработкой данных лав, опубликованы в работах [4–8].

Полученные при решении численной задачи величины оседаний сравнивались с фактическими и с рассчитанными по нормативной методике [1]. Результаты сравнения приведены в таблицах 3–7. При прогнозе учитывалось соотношение ширины выработанного пространства ( $D$ ) к глубине разработки ( $H$ ).

Таблица 1

Физико-механические свойства угля и вмещающих его пород

Порода	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Коэффициент сцепления, МПа	Угол внутреннего трения
аргиллит	$2 \cdot 10^4$	0,2	5	30
алевролит	$2 \cdot 10^4$	0,2	8	35
песчаник	$2,5 \cdot 10^4$	0,2	8	35
известняк	$2,5 \cdot 10^4$	0,2	8	35
уголь	$0,5 \cdot 10^4$	0,3	3,4	37

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

Таблица 2

Основные сведения об условиях отработки лав, для которых проводилось численное моделирование оседания земной поверхности

Шахта	Наименование лавы	Взаимное расположение выемочного столба и подрабатываемого участка железной дороги	Глубина разработки, м	Вынимаемая мощность пласта, м	Угол падения пласта, град	Доля песчаников и известняков в подрабатываемой толще пород
им. XIX Съезда КПСС	4 вост. по пласту $l_1$	диагонально и частично параллельно	560	1,2	6–10	25
№ 5 ш/у «Ворошиловское»	№ 352 по пласту $i_3$	перпендикулярно	500	1,0	2–4	29
им. М. В. Фрунзе	8 зап. по пласту $h_8$	параллельно	950	1,4	4–18	25
им. М. В. Фрунзе	35 вост. по пласту $h_8$	по диагонали	880	1,56	1–2	29
им. Володарского	№ 62 по пласту $h_8$	перпендикулярно	870	1,4	16–17	35

Таблица 3

Максимальные оседания земной поверхности, полученные в условиях шахты им. XIX Съезда КПСС при отработке 4 вост. лавы пл.  $l_1$  (время работы лавы 1997–1999 гг.)

$\frac{D}{H}$	Величина максимальных оседаний, мм			Относительное отклонение прогнозной величины максимальных оседаний от фактической величины, %	
	фактические	прогнозные		по методике [1]	в численной модели
		по методике [1]	в численной модели		
0,3	–41	–99	–44	141	7
0,53	–72	–200	–88	178	22
0,72	–132	–300	–126	127	5
0,94	–198	–393	–169	98	15
0,98	–239	–403	–177	69	26
1,04	–242	–415	–188	71	22
1,21	–292	–423	–217	45	26
1,43	–318	–423	–254	33	20
1,5	–355	–423	–263	19	26
Ошибка прогноза, %				87	19

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

Таблица 4

Максимальные оседания земной поверхности, полученные в условиях шахты № 5 ш/у «Ворошиловское» при отработке лавы № 352 пласта  $i_3$  (время работы лавы 1999–2000 гг.)

$\frac{D}{H}$	Величина максимальных оседаний, мм			Относительное отклонение прогнозной величины максимальных оседаний от фактической величины, %	
	фактические	прогнозные		по методике [1]	в численной модели
		по методике [1]	в численной модели		
0,96	-128	-259	-125	102	2
1,6	-205	-270	-210	68	2
1,68	-245	-270	-239	43	2
1,77	-281	-270	-278	25	1
2,0	-330	-270	-326	6	1
Ошибка прогноза, %				49	2

Таблица 5

Максимальные оседания земной поверхности, полученные в условиях шахты им. Фрунзе при отработке вост. 35 лавы пласта  $h_8 i_3$  (время работы лавы 1999 по 2000 гг.)

$\frac{D}{H}$	Величина максимальных оседаний, мм			Относительное отклонение прогнозной величины максимальных оседаний от фактической величины, %	
	фактические	прогнозные		по методике [1]	в численной модели
		по методике [1]	в численной модели		
0,27	-38	-72	-43	89	14
0,55	-126	-177	-115	40	9
0,75	-160	-192	-159	20	1
0,95	-192	-192	-190	0	1
Ошибка прогноза, %				37	6

Таблица 6

Максимальные оседания земной поверхности, полученные в условиях шахты им. Фрунзе при отработке 8 зап. лавы пласта  $h_8$  (время работы лавы 2000 по 2002 гг.)

$\frac{D}{H}$	Величина максимальных оседаний, мм			Относительное отклонение прогнозной величины максимальных оседаний от фактической величины, %	
	фактические	прогнозные		по методике [1]	в численной модели
		по методике [1]	в численной модели		
0,26	-95	-279	-106	194	12
0,42	-189	-352	-186	86	2
0,61	-243	-425	-283	75	16
0,77	-381	-480	-361	26	5
0,96	-419	-546	-446	30	6
Ошибка прогноза, %				82	8

Таблица 7

Максимальные оседания земной поверхности, полученные в условиях шахты им. Володарского при отработке лавы № 62 пласта  $h_8$  (время работы лавы 1983–1984 гг.)

$\frac{D}{H}$	Величина максимальных оседаний, мм			Относительное отклонение прогнозной величины максимальных оседаний от фактической величины, %	
	фактические	прогнозные		по методике [1]	в численной модели
		по методике [1]	в численной модели		
0,57	-105	-114	-118	9	4
0,69	-129	-137	-146	6	7
0,76	-158	-151	-166	4	10
0,82	-161	-164	-182	2	11
0,9	-214	-179	-199	16	11
0,96	-230	-191	-214	17	12
1,03	-236	-205	-227	13	11
1,09	-248	-216	-235	13	9
1,18	-250	-236	-248	6	5
Ошибка прогноза, %				10	9

Как видно из таблиц (3–7), нормативной методике прогноза присуща высокая погрешность. При этом погрешность тем больше, чем меньше значение отношения ширины выработанного пространства к глубине разработки. Повысить точность прогноза предлагается путем корректировки рассчитанного по нормативной методике значения максимального оседания на некоторый корректирующий коэффициент, учитывающий отношение  $D/H$  и долю крепких пород в подработанном массиве ( $C$ ).

Корректирующий коэффициент  $K_k$  показывает, во сколько раз прогнозная величина оседаний отличается от фактических. На рисунках (1–2) представлены графики

изменения корректирующих коэффициентов  $K_k$  в зависимости от влияющих параметров:  $D/H$  и  $C$ . Математическая модель определения величины коэффициента  $K_k$  имеет вид

$$K_k = a \cdot \left(\frac{D}{H}\right)^b, \quad (4)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры зависимости (4), зависящие от доли крепких пород в подработываемом массиве ( $C$ ). Вычисленные значения параметров приведены в таблице 8.

Таблица 8

Значения параметров зависимости (4)

$C, \%$	При $H=500\dots750$ м			При $H=750\dots1000$ м		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
80	1,87	-0,34	0,79	1,13	-0,56	0,95
70	1,8	-0,34	0,78	1,07	-0,57	0,95
60	1,73	-0,35	0,77	1,02	-0,59	0,96
50	1,67	-0,35	0,76	0,98	-0,6	0,96
40	1,65	-0,38	0,76	0,93	-0,61	0,96
30	1,6	-0,38	0,76	0,91	-0,61	0,97
20	1,54	-0,4	0,75	0,87	-0,59	0,96
10	1,48	-0,42	0,74	0,83	-0,43	0,93

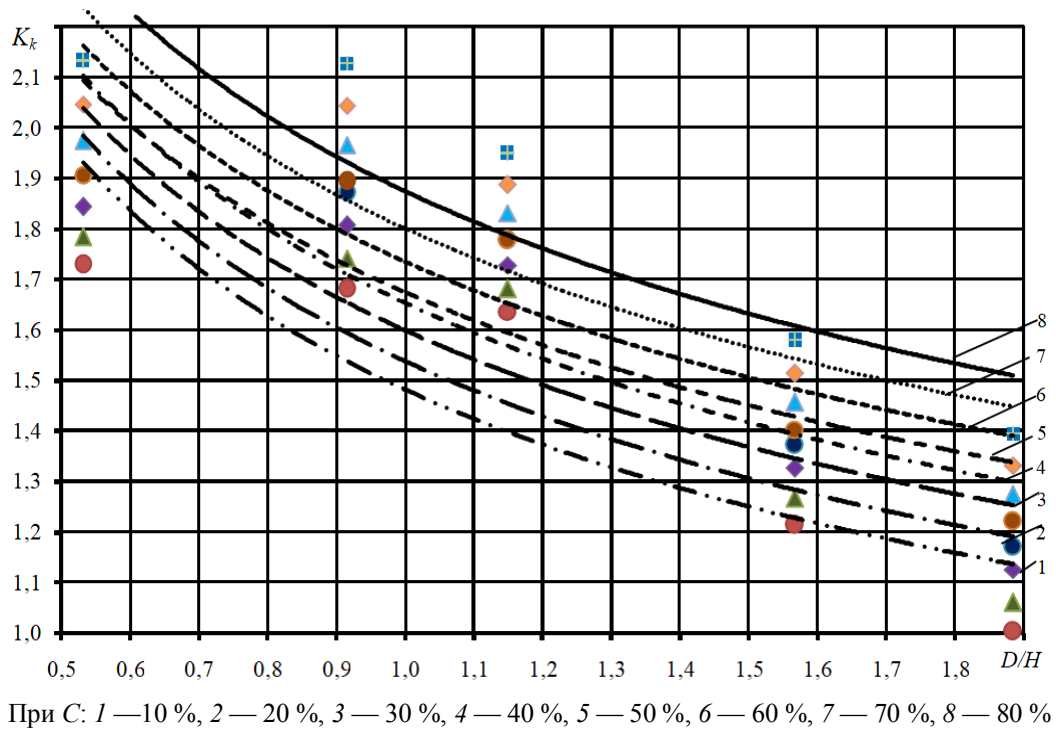


Рисунок 1 — Изменение корректирующего коэффициента  $K_k$  при  $H=500\dots750$  м

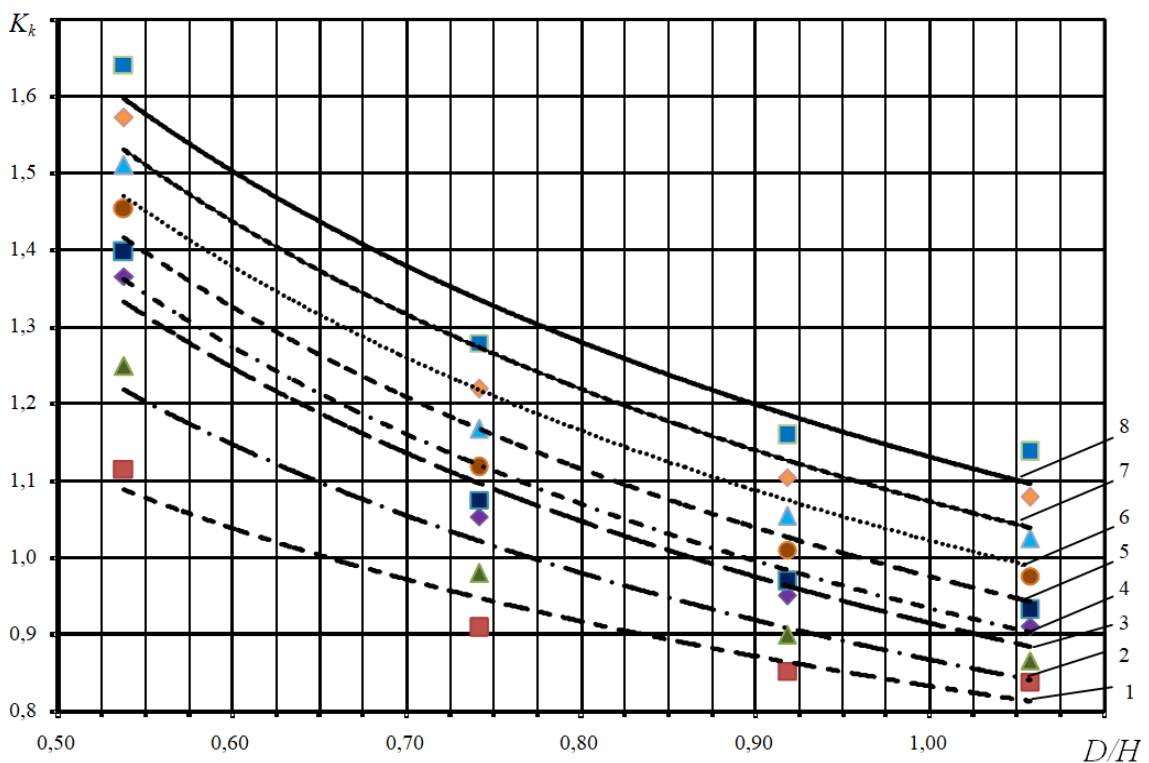


Рисунок 2 — Изменение корректирующего коэффициента  $K_k$  при  $H=750\dots1000$  м

Параметры  $a$  и  $b$  описываются линейными зависимостями, коэффициенты корреляции которых составляют  $R^2 = 0,92-0,98$ :

– при глубине разработки 500–750 м

$$\begin{aligned} a &= 0,005 \cdot C + 1,43, \\ b &= 0,001 \cdot C - 0,42; \end{aligned} \quad (5)$$

– при глубине разработки 750–1000 м

$$\begin{aligned} a &= 0,004 \cdot C + 0,78, \\ b &= 0,00009 \cdot C^2 - 0,0092 \cdot C - 0,39. \end{aligned} \quad (6)$$

Средняя ошибка аппроксимации зависимости (4) не превышает 25 %.

#### Выводы:

– нормативная методика [1] прогноза максимальных оседаний земной поверхности не учитывает наличие крепких породных слоев в подрабатываемом массиве, что значительно увеличивает ошибку прогноза;  
– ошибка прогноза также зависит от соотношения ширины выработанного про-

странства к глубине разработки: чем меньше значение соотношения, тем выше погрешность;

– величина оседаний земной поверхности уменьшается с ростом процентного содержания песчаников и известняков в подрабатываемом массиве;

– при наличии крепких пород в подработанном массиве предлагается использовать корректирующий коэффициент  $K_k$ , определяемый долей крепких слоев в массиве ( $C$ ) и соотношением  $D/H$  (где  $D$  — ширина выработанного пространства,  $H$  — глубина разработки), что позволит более чем в 4 раза повысить точность прогноза максимальных оседаний земной поверхности.

В дальнейшем планируется установить влияние на величину оседаний расстояния между вынимаемым пластом и крепкими породными слоями.

#### Библиографический список

1. ГСТУ 101,00159226,001–2003. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом [Текст] : чинний з 2004-01-01. — К. : Мінпаливенерго України, 2004. — 128 с.
2. Авершин, С. Г. Сдвигение горных пород при подземных разработках [Текст] / С. Г. Авершин. — М. : Углетехиздат, 1954. — 245 с.
3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных выработок в Донецком угольном бассейне [Текст]. — М. : МУПСССР, 1972. — 133 с.
4. Корецкая, Е. Г. Моделирование оседаний земной поверхности в условиях подработки лавой № 35<sup>60см</sup> пл. h<sub>8</sub> шахты им. М. В. Фрунзе [Текст] / Е. Г. Корецкая // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2017. — № 55 — С. 58–64.
5. Аверин, Г. А. Влияние крепких пород на максимальные оседания земной поверхности в условиях шахты им. М. В. Фрунзе [Текст] / Г. А. Аверин, В. Г. Ларченко, Е. Г. Корецкая // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2016. — № 47. — С. 40–44.
6. Влияние крепких пород на максимальные оседания земной поверхности в условиях шахты № 5 ш/у «Ворошиловское» [Текст] / Г. А. Аверин, Н. К. Клишин, Е. С. Смекалин, Е. Г. Корецкая // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2018. — № 52. — С. 29–35.
7. Аверин, Г. А. Прогнозирование максимальных оседаний земной поверхности при различном содержании крепких породных слоев подработанного массива [Текст] / Г. А. Аверин, В. Г. Ларченко, Е. Г. Корецкая, О. Г. Доценко // Уголь Украины. — 2016. — № 8. — С. 4–7.
8. Аверин, Г. А. Моделирование оседания земной поверхности в условиях шахты им. Володарского [Текст] / Г. А. Аверин, Е. Г. Корецкая // Современные проблемы маркшейдерии и геологии : сборник материалов конференции, посвященной 20-летию подготовки горных инженеров-маркшейдеров в ДонГТУ и Дню Науки / под ред. В. Г. Ларченко. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». — 2019. — С. 43–48.

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

*Статья поступила в редакцию 11.03.2021.*

**PhD in Engineering Averin G. A., PhD in Engineering Dotsenko O. G., Koretskaia E. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR, galagena1959@yandex.ru)**

**ACCOUNTING FOR THE EFFECT OF SANDSTONE AND LIMESTONE ON  
THE MAXIMUM SUBSIDENCE OF THE EARTH'S CRUST CAUSED BY MINING**

*The paper proposes to increase the accuracy of prediction of maximum subsidence of the earth's crust according to the normative method by applying a corrective coefficient that takes into account the proportion of strong rock layers in the undermining mass and the ratio of width of the mined-out space to the mining depth.*

**Key words:** *mathematical modeling, finite elements method, maximum subsidence of the earth's crust, percentage of sandstone and limestone in the undermining mass, ratio of width of the mined-out area to the mining depth.*