

УДК 622.834

д. т. н. Антощенко Н. И.,
к. т. н. Филатьев М. В.,
Чепурная Л. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Установлены на основании корреляционного анализа зависимости эмпирических коэффициентов логистического уравнения оседания точки земной поверхности от основных параметров горно-геологических и горнотехнических условий, что позволяет прогнозировать динамику оседания точки земной поверхности на основании данных о мощности разрабатываемого пласта, глубине ведения очистных работ, скорости подвигания очистного забоя и длине лавы.

Ключевые слова: земная поверхность, сдвигение, эмпирические коэффициенты, моделирование, логистическая зависимость, комплексные параметры, динамика.

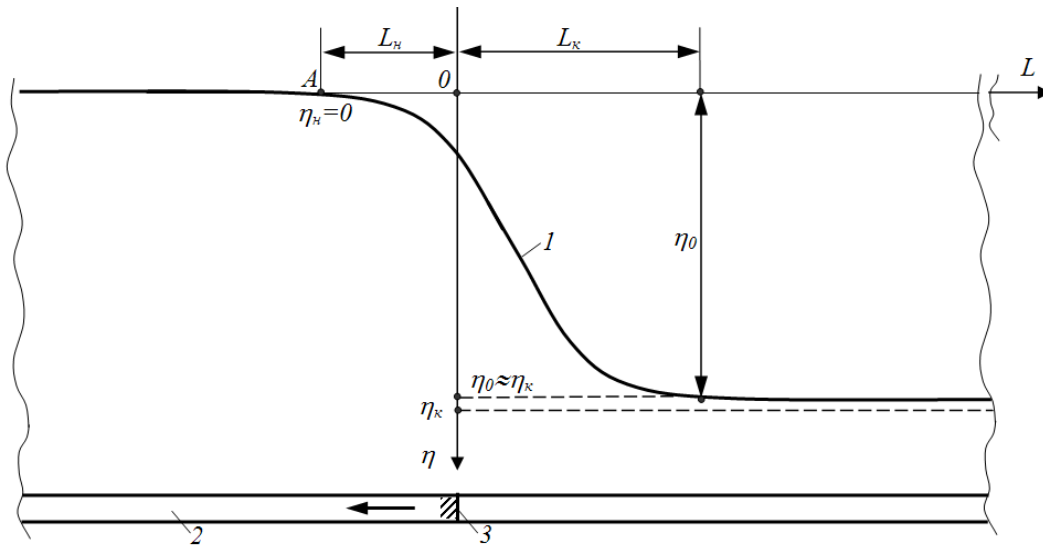
Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Прогнозирование динамики закономерностей процесса сдвигения земной поверхности является одной из наиболее важных задач при установлении возможных негативных последствий отработки угольных пластов. Перспективным направлением решения такой задачи является математическое моделирование оседания точки земной поверхности при ее подработке очистным забоем. Для описания рассматриваемых процессов предложено несколько видов математических уравнений [1, 2]. Достоверное прогнозирование параметров оседания земной поверхности для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий возможно только после экспериментального установления значений эмпирических коэффициентов рассматриваемых уравнений. Их определение в настоящее время предлагается производить на основании минимум трех маркшейдерских наблюдений в начальный период подработки земной поверхности с последующим вводом необходимых поправок [1]. Такой подход требует дополнительных финансовых затрат и не гарантирует полностью избежать возможных ошибок в определении искомых параметров.

Постановка задачи. Задачей данной работы является в дополнение к предложенному подходу расчета эмпирических коэффициентов математических уравнений, разработать способ их определения на основании корреляционного анализа.

Изложение материала и его результаты. Идея работы состоит в установлении вида зависимостей и тесноты связи эмпирических коэффициентов с параметрами горно-геологических и горнотехнических условий с последующим использованием их для математического моделирования без проведения дополнительных трудоемких и длительных наблюдений.

Кривая (1) оседания точки А земной поверхности относительно проекции очистного забоя характеризуется параметрами мульды сдвигения (η_n , η_k) и расстояниями (L_n , L_k) соответственно на начало и окончание ее оседания (рис. 1).

Для достижения поставленной цели необходимо значения эмпирических коэффициентов математического уравнения, адекватно описывающую кривую 1, увязать с горно-геологическими и горнотехническими параметрами.



1 — кривая траектории оседания точки A земной поверхности; 2 — разрабатываемый пласт; 3 — положение очистного забоя на момент начала оседания точки A ; η_n , η_k — соответственно начальное и конечное оседание точки A ; η_0 — глубина плоского дна мульды сдвижения; L_n , L_k — расстояния между проекцией очистного забоя и точкой A соответственно на начало и окончание ее сдвижения; \leftarrow — направление подвигания очистного забоя.

Рисунок 1 — Графическое представление оседания точки земной поверхности относительно проекции очистного забоя

Предварительный анализ экспериментальных данных показал, что для описания всех стадий протекания процесса оседания точки земной поверхности в большей степени подходит логистическая зависимость. Она применяется, как правило, для математического моделирования процессов перехода от одного стабильного состояния в другое. Применительно к предложенной схеме (рис. 1) логистическую зависимость можно представить уравнением

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

где a , b , c — эмпирические коэффициенты; L — расстояние от точки наблюдения до проекции линии очистного забоя.

Для одних горно-геологических условий при мало изменяющихся значениях мощности разрабатываемого пласта (m), глубины ведения очистных работ (H) и прочностных свойств подрабатываемых пород, динамика оседания точки земной поверхности зависит только от положения

проекции очистного забоя относительно рассматриваемой точки.

Для одних горно-геологических и горнотехнических условий наиболее достоверно эмпирические коэффициенты (a , b , c) уравнения (1) можно определить путем обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Результаты такой обработки показывают (табл. 1), что при постоянных значениях мощности разрабатываемого пласта (m), глубины ведения очистных работ (H), прочностных свойств вмещающих пород, длины лавы (L_n) и скорости подвигания очистного забоя ($V_{оч}$), зависимость η от L описывается, практически функционально эмпирическими уравнениями 2–10. Это подтверждается близостью для всех случаев корреляционных отношений ($R = 0,995 \div 0,999$) к единице. По этой причине можно считать, что с помощью коэффициентов a , b , c , рассчитанных методом наименьших квадратов, достоверно прогнозируется оседание земной поверхности для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий.

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Таблица 1 — Результаты обработки экспериментальных данных [1–7] согласно логистической зависимости

Шахта, пласт (лава), литературный источник	Условия проведения экспериментов				Эмпирические уравнения	R
	Мощность пласта m , м	Глубина работ H , м	Длина лавы L_n , м	Скорость продвижения очистного забоя $V_{оч}$, м/мес		
«Белозерская», [1]	1,30	420	-	63	$\eta = \frac{810}{1+4,1 \cdot \exp(-0,0158L)}$ (2)	0,998
Шахта №22 «Коммунарская», k_3 (11-я вост. лава), [2]	1,47	652	305	45	$\eta = \frac{900}{1+9,3 \cdot \exp(-0,01L)}$ (3)	0,998
«Степная», C_6 , [3]	0,91	106	150	57	$\eta = \frac{832}{1+5,8 \cdot \exp(-0,064L)}$ (4)	0,996
Польская шахта, [4]	1,65	200-240	190	240	$\eta = \frac{980}{1+26 \cdot \exp(-0,04L)}$ (5)	0,995
«Грамотеинская», пласт Сычевский-III (лава №631), [5]	4,20	210-230	210	210	$\eta = \frac{2375}{1+13 \cdot \exp(-0,028L)}$ (6)	0,999
«Юбилейная», C'_6 (лава 530) [6]	1,00	150	206	20	$\eta = \frac{915}{1+12,5 \cdot \exp(-0,05L)}$ (7)	0,997
Ш. им. А.Ф. Засядько, m_3 (13-я зап. Лава) [7]	2,10	1195	250	90	$\eta = \frac{400}{1+7 \cdot \exp(-0,006L)}$ (8)	0,996
Германия, (Рур), пласт Grimberg 2/3 (лава 31), [7]	2,20	920	330	125	$\eta = \frac{1420}{1+5,75 \cdot \exp(-0,01L)}$ (9)	0,998
Польша, «Сташиц», пласт 352 (лава 1002), [7]	2,10	480	275	105	$\eta = \frac{980}{1+4,1 \cdot \exp(-0,02L)}$ (10)	0,998

Возможность и целесообразность применения для прогнозирования параметров оседания земной поверхности эмпирических коэффициентов (a_p , b_p , c_p), определенных другим способом, можно доказать их близостью с коэффициентами (a , b , c), рассчитанных методом наименьших квадратов (табл. 2). Степень зависимости коэффициентов a , b , c от параметров горно-геологических и горнотехнических условий устанавливали по величине парных коэффициентов корреляции между ними. Известные экспериментальные данные [1–7] позволили оценить тесноту связи коэффициентов a , b , c с мощностью разрабатываемых пластов (m), глубиной ведения очистных работ (H), скоростью продвижения очистных забоев ($V_{оч}$), длиной лав (L_n), а также с разным их сочетанием (табл. 3).

В дальнейших расчетах эмпирических коэффициентов a_p , b_p , c_p использовали горно-геологические и горнотехнические параметры или их комплексные сочетания при условии максимальных значений парных коэффициентов корреляции. Наряду с формальным определением величин парных коэффициентов корреляции, учитывали физический смысл зависимости эмпирических коэффициентов от рассматриваемых параметров. Например, коэффициент a в уравнении (1) характеризует конечное оседание земной поверхности η_k после образования плоского дна мульды. По абсолютной величине η_k , исходя из расчетной схемы, не может быть больше мощности разрабатываемого пласта (m).

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Таблица 2 — Результаты определения эмпирических коэффициентов логистической зависимости

Шахта, пласт (лава), литературный источник	Коэффициенты логистического уравнения					
	определенные мето- дом наименьших квадратов			определенные мето- дом корреляционного анализа		
	a	b	c	a_p	b_p	c_p
«Белозерская», [1]	810	4,1	0,016	836	5,9	-
Шахта №22 «Коммунарская», k_3 (11-я вост. лава), [2]	900	9,3	0,010	868	5,5	0,019
«Степная», C_6 , [3]	832	5,8	0,064	769	8,7	0,063
Польская шахта, [4]	980	26,0	0,040	905	26,8	0,040
«Грамотеинская», пласт Сычевский-III (лава №631), [5]	2375	13,0	0,028	2319	17,7	0,025
«Юбилейная», C'_6 (лава 530) [6]	915	12,5	0,050	784	5,8	0,052
Ш. им. А.Ф. Засядько, m_3 (13-я зап. Лава) [7]	400	7,0	0,006	1015	5,6	0,007
Германия, (Рур), пласт Grimberg 2/3 (лава 31), [7]	1420	5,8	0,010	1043	5,8	0,007
Польша, «Сташиц», пласт 352 (лава 1002), [7]	980	4,1	0,020	1015	6,3	0,020

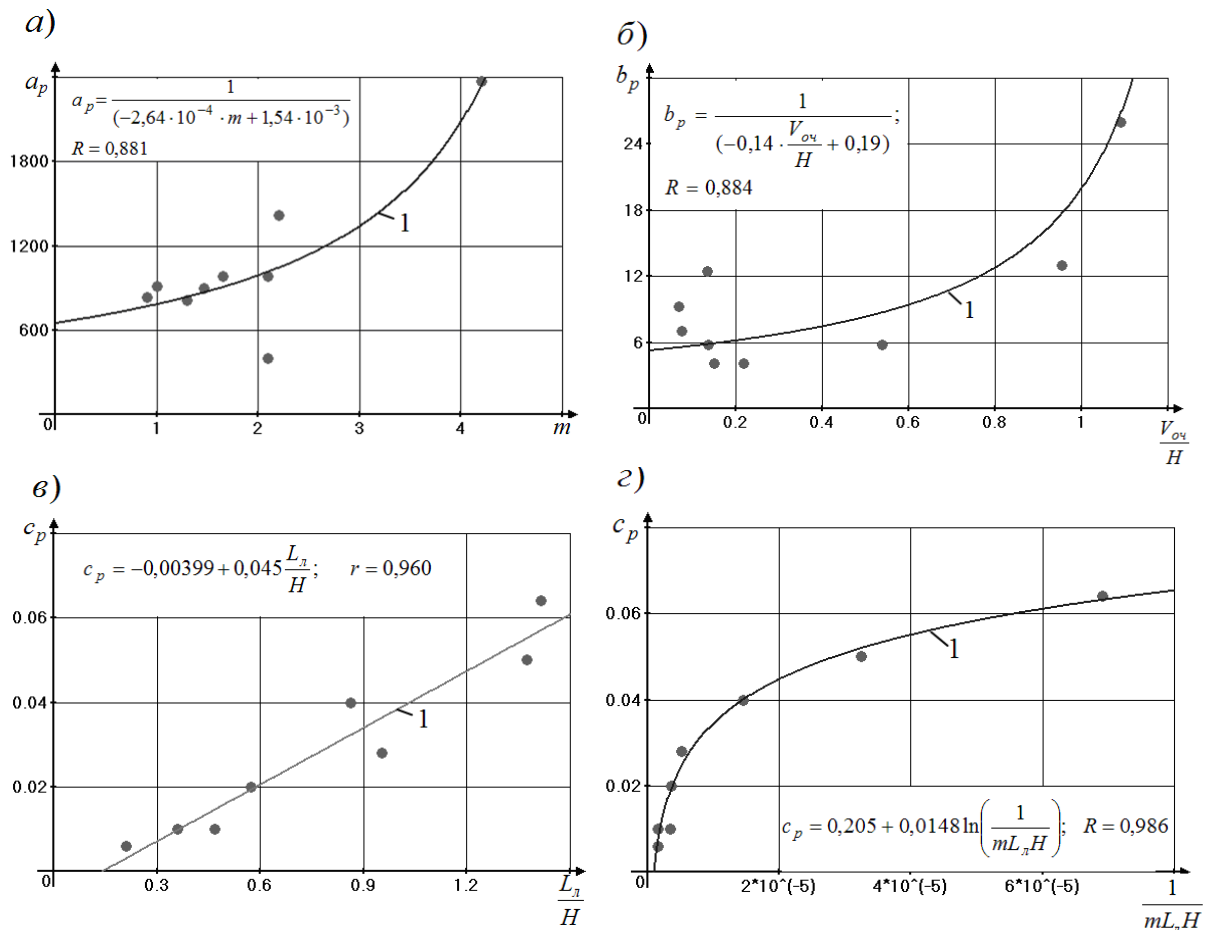
Таблица 3 — Результаты определения парных коэффициентов корреляции между коэффициентами (a , b , c) логистических уравнений (2–10) и параметрами горно-геологических и горнотехнических условий

Коэффици- енты эм- пири- ческих уравнений	Парные коэффициенты корреляции с параметрами, характеризующими горно-геологические и горнотехнические условия																
	m	H	$V_{оч}$	L_l	mH	$\frac{m}{H}$	$mV_{оч}$	$\frac{H}{L_l}$	$\frac{V_{оч}}{m}$	$\frac{V_{оч}}{L_l}$	$\frac{V_{оч}}{H}$	$\frac{V_{оч}m}{H}$	HL_l	$\frac{L_l}{H}$	$\frac{V_{оч}}{HL_l}$	$\frac{1}{mHL_l}$	$\frac{1}{HL_l}$
a	0,81	-0,31	0,56	0,01	-0,06	0,80	0,85	-0,39	0,03	0,47	0,53	0,84	-0,25	0,15	0,42	-0,22	-0,02
b	0,10	-0,38	0,65	-0,42	-0,33	0,37	0,39	-0,35	0,72	0,73	0,74	0,49	-0,46	0,25	0,73	-0,05	0,12
c	-0,34	-0,82	-0,03	-0,87	-0,78	0,46	-0,09	-0,79	0,24	0,14	0,46	0,15	-0,87	0,96	0,55	0,90	0,96

Парный коэффициент корреляции между a и m для рассматриваемой выборки составлял 0,81. Для комплексных параметров $mV_{оч}$ и $\frac{V_{оч}m}{H}$ парные коэффициенты корреляции соответственно равны 0,85 и 0,84 (табл. 3). Дополнительное применение параметров $V_{оч}$ и H мало повлияло на увеличение парных коэффициентов корреляции, но их использование в дальнейших расчетах может привести к несоблюдению соотношения $\eta_k \leq m$. Для исключения “диких” результатов целесооб-

разно коэффициент a в первом приближении определять в зависимости только от мощности пласта (рис. 2, а). Высокое корреляционное отношение ($R=0,881$) указывает на существенное влияние мощности пласта на величину коэффициента a . Имеющиеся отдельные значительные отклонения точек от аппроксимирующей кривой получены для условий глубоких шахт. Это указывает на необходимость дальнейшего изучения коэффициента a и уточнения его зависимости от дополнительно влияющих факторов.

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН



1 — аппроксимирующие кривые (прямая); ● — значения коэффициентов a , b , c , определенные способом наименьших квадратов при обработке экспериментальных данных [1–7] для отдельных объектов наблюдений (табл. 2); m , H , $V_{оч}$, $L_{л}$ — соответственно мощность разрабатываемых пластов, глубина ведения очистных работ, скорость подвигания очистных забоев и длина лав.

Рисунок 2 — Зависимость коэффициентов a , b , c уравнения (1) от горно-геологических и горнотехнических параметров

Коэффициенты b и c уравнения (1) характеризуют положение кривой относительно оси абсцисс и ширину среднего участка, определяющего активную стадию оседания земной поверхности.

Коэффициент b прямопропорционально зависит ($r = 0,65$) от скорости подвигания очистного забоя (табл. 2). Значительно меньшее обратно-пропорциональное влияние оказывали глубина ведения очистных работ ($r = -0,38$) и длина лавы ($r = -0,42$). Связь коэффициента b с мощностью разрабатываемых пластов не установлена ($r = 0,10$). Примерно одинаковая теснота связи коэффициента b для рассматриваемой выборки установлена для комплекс-

ных параметров $\frac{V_{оч}}{H}$, $\frac{V_{оч}}{HL_{л}}$ и $\frac{V_{оч}}{L_{л}}$. Парные

коэффициенты корреляции для этих зависимостей соответственно были равны 0,74, 0,73 и 0,73. Во всех случаях зависимости коэффициента b от рассматриваемых комплексных параметров носили криволинейный характер. Корреляционное отношение (R) соответственно равнялись 0,884, 0,865 и 0,836. В дальнейших расчетах коэффициента b_p использовалась его зависимость

от комплексного параметра $\frac{V_{оч}}{H}$ (рис. 2, б),

так как корреляционное отношение было максимальным ($R=0,884$).

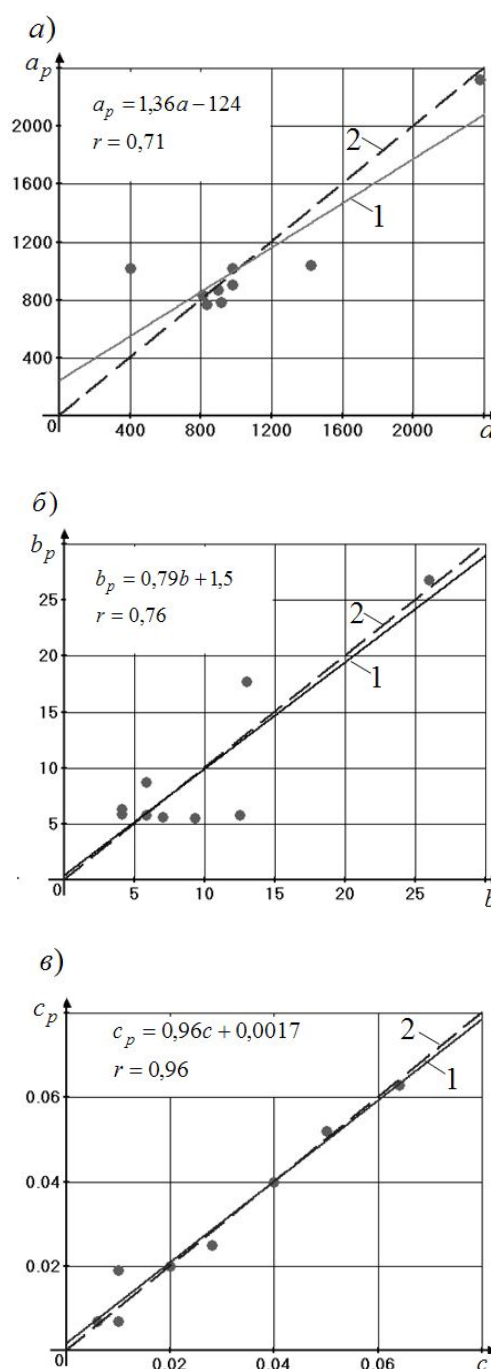
Коэффициент c из четырех рассматриваемых факторов (m , H , $V_{оч}$, L_l) в большей степени определялся глубиной ведения очистных работ и длиной лав (парные коэффициенты корреляции (r) соответственно составляли $-0,82$ и $-0,87$). Мощность разрабатываемого пласта оказывала значительно меньшее влияние ($r = -0,34$). Из комплексных параметров более высокие парные коэффициенты корреляции установлены для $\frac{L_l}{H}$ ($r = 0,96$) и

$$\frac{1}{mL_l H} \quad (r = 0,90).$$

Зависимость $c_p = \varphi_1\left(\frac{L_l}{H}\right)$ была прямой (рис. 2, в), а $c_p = \varphi_2\left(\frac{1}{mL_l H}\right)$ носила криволинейный характер (рис. 2, г). Прямолинейная зависимость характеризовалась высоким коэффициентом корреляции ($r = 0,96$), а криволинейная — практически функционально определялась комплексным параметром ($R=0,986$). В окончательном варианте эмпирический коэффициент c_p рассматривали от комплексного параметра $\frac{1}{mL_l H}$.

Используя установленные зависимости эмпирических коэффициентов (рис. 2, а, б, г) и значения параметров (m , H , $V_{оч}$, L_l), для каждого объекта рассчитали значения a_p , b_p , c_p (табл. 2). Достоверность прогнозирования динамики сдвижения земной поверхности оценили по близости между собой эмпирических коэффициентов уравнения (1), рассчитанных разными способами (рис. 3).

Эталоном такой оценки могут служить эмпирические коэффициенты, определенные методом наименьших квадратов для конкретных горно-геологических и горно-технических условий.



- 1 — усредняющие прямые;
 2 — биссектрисы координатных сеток;
 ● — точки, характеризующие соотношение значений коэффициентов a , b , c с коэффициентами a_p , b_p , c_p , установленных для конкретных объектов.

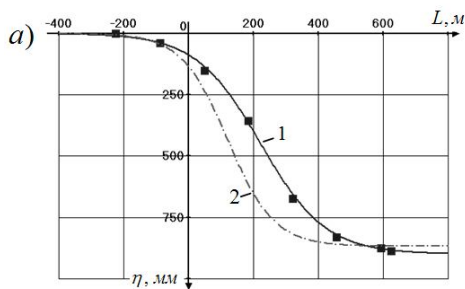
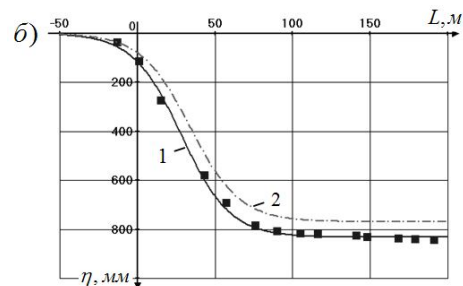
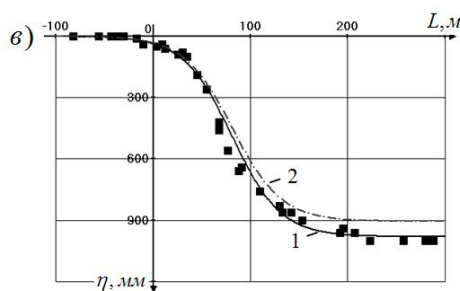
Рисунок 3 — Связь коэффициентов уравнения (1), рассчитанных соответственно методом наименьших квадратов (a , b , c) и предлагаемым методом (a_p , b_p , c_p).

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

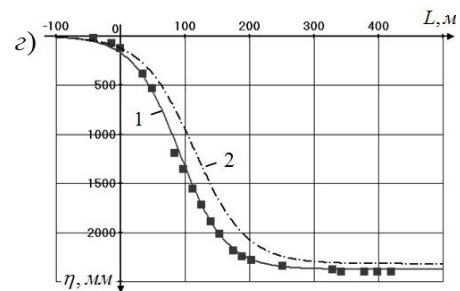
Степень тесноты связи между эмпирическими коэффициентами, определенными разными способами, характеризовались высокими парными коэффициентами корреляции ($r = 0,71 \div 0,96$). Аппроксимирующие прямые (1) практически совпадали с биссектрисами координатных сеток (2), что подтверждает близость значений эмпирических коэффициентов, определенных разными способами. Примерно равное количество точек выше и ниже усредняющих прямых свидетельствует о случайном характере их отклонения под влиянием неучтенных факторов. Такими могут быть прочностные свойства подработанных пород, мощность наносов, угол падения пластов, наличие выработанных пространств ранее отработанных лав и некоторые другие. Для повышения точности прогноза

динамики сдвижения земной поверхности необходимо дополнительно изучить влияние указанных факторов. Несмотря на это, используя полученные уравнения (рис. 2, а, б, г), можно довольно точно спрогнозировать динамику оседания земной поверхности, учитывая влияние m , H , $V_{оч}$, L_l (рис. 4).

Некоторые уточнения необходимы для глубоких шахт с высокой скоростью подвигания очистных забоев. Так для немецкой шахты (рис. 4, ж) необходимы корректировки в сторону увеличения η_k , а для шахты им. А. Ф. Засядько (рис. 4, е) наоборот, в сторону уменьшения этого параметра. Для остальных объектов получены приемлемые результаты.

Шахта №22 «Коммунарская», k_3 (11-я вост. лава), [2]«Шапная», C_6 , [3]

Польская шахта, [4]

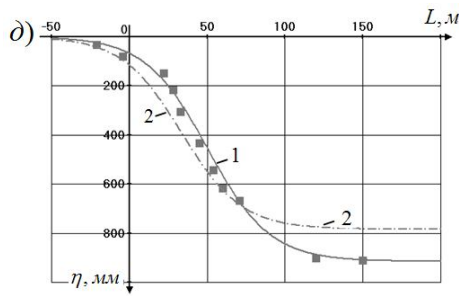
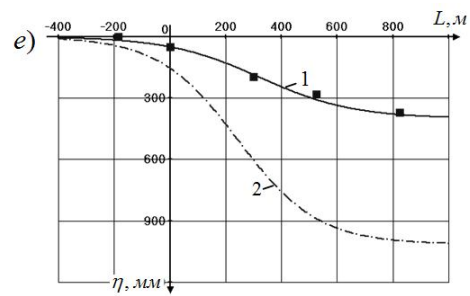
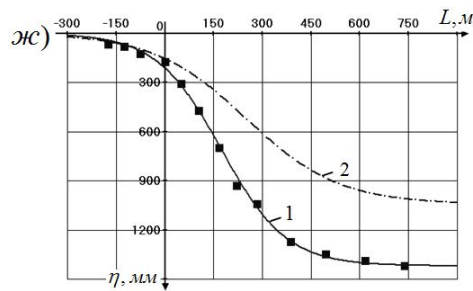


«Грамотенінська», пласт Сычевский-III (лава №631), [5]

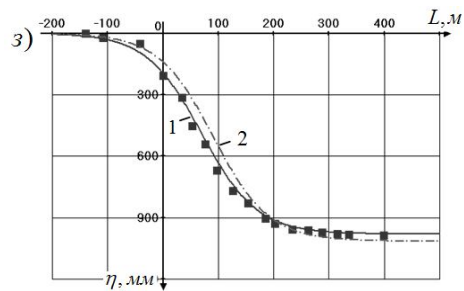
1 — кривые, определенные способом наименьших квадратов; 2 — кривые динамики оседания, определенные методом корреляционного анализа; ■ — экспериментальные данные;
 η — оседание земной поверхности;

L — расстояние от точки наблюдения до проекции линии очистного забоя.

Рисунок 4 — Оседание земной поверхности под влиянием движущегося очистного забоя

«Юбилейная», C_6' (лава 530) [6]Шахта им. А.Ф. Засядько, m_3 (13-я зап. лава) [7]

Германия, (Рур), пласт Grimberg 2/3 (лава 31), [7]



Польша, ш. «Сташице», пласт 352 (лава 1002), [7]

1 — кривые, определенные способом наименьших квадратов; 2 — кривые динамики оседания, определенные методом корреляционного анализа; ■ — экспериментальные данные; η — оседание земной поверхности; L — расстояние от точки наблюдения до проекции линии очистного забоя.

Продолжение рисунка 4 — Оседание земной поверхности под влиянием движущегося очистного забоя

Выводы и направление дальнейших исследований.

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- оседание точки земной поверхности относительно проекции очистного забоя удовлетворительно описывается логистической кривой;

- при постоянных или незначительно изменяющихся горно-геологических и горнотехнических условиях оседание точки земной поверхности при изменении размеров очистной выработки происходит по зависимости, близкой к функциональной;

- эмпирические коэффициенты логистического уравнения оседания точки земной поверхности описываются криволинейными зависимостями при изменении параметров m , $\frac{V_{оч}}{H}$, $\frac{1}{mL_d H}$;

- для прогнозирования динамики оседания земной поверхности доказана возможность теоретического определения эмпирических коэффициентов логистического уравнения с учетом изменения параметров горно-геологических и горнотехнических условий;

- получены примерно одинаковые значения эмпирических коэффициентов логистического уравнения при обработке экспериментальных данных методом наименьших квадратов и их определением на основании корреляционного анализа;

- в первом приближении динамику оседания точки земной поверхности можно прогнозировать на основании данных о мощности разрабатываемого пласта, глубине ведения очистных работ, скорости подвигания очистного забоя и длине лавы. Возможное влияние других факторов требует дополнительного изучения.

Бібліографічний список

1. Гавриленко Ю. Н. Прогнозирование сдвижений земной поверхности во времени / Ю. Н. Гавриленко // Уголь Украины. — 2011. — №6. — С. 45–49.
2. Кулибаба С. Б. Характер развития процесса сдвижения земной поверхности во времени над движущимся очистным забоем / С. Б. Кулибаба, М. Д. Рожко, Б. В. Хохлов // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. — 2010. — №7. — С. 40–54.
3. Ларченко В. Г. Влияние подземной разработки угольных пластов на состояние земной поверхности / В. Г. Ларченко // Вестник МАНЭБ, №4(12). — С.-Петербург. — 1998. — С. 39–41.
4. Бабенко Е. В. Настройка модели для моделирования сейсмических событий техногенной природы / Е. В. Бабенко // Проблемы гірського тиску. — 2009. — №17. — С. 67–93.
5. Ягунов А. С. Исследование влияния высоких скоростей подвигания очистного забоя на характер и параметры процесса сдвижения поверхности / А. С. Ягунов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2007. — №2 — С. 36–43.
6. Назаренко В. О. Розвиток осідань земної поверхні при відході лави від розрізної печі / В. О. Назаренко, П. П. Пилипенко // Вісник ЖДТУ. — 2012. — №1 (60). — С. 126–130.
7. Гавриленко Ю. Н. Динамика оседаний земной поверхности при большой глубине разработки и высокой скорости подвигания забоя / Ю. Н. Гавриленко, Н. М. Папазов, Т. В. Морозова // Проблемы гірського тиску. — 2000. — №4. — С. 108–119.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Окалеловым В. Н.,
д.т.н. МакНИИ Мнухиным А. Г.**

Статья поступила в редакцию 21.02.14.

**д.т.н. Антощенко М. І., к.т.н. Філат'єв М. В., Чепурна Л. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)
ВИЗНАЧЕННЯ ЕМПІРИЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ
ЗРУШЕННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ**

Встановлені на підставі кореляційного аналізу залежності емпіричних коефіцієнтів логістичного рівняння осідання точки земної поверхні від основних параметрів гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов, що дозволяє прогнозувати динаміку осідання точки земної поверхні на підставі даних про потужність розроблюваного пласта, глибину ведення очистних робіт, швидкість посування очистного вибою і довжини лави.

Ключові слова: *земна поверхня, зрушення, емпіричні коефіцієнти, моделювання, логістична залежність, комплексні параметри, динаміка.*

Antoshchenko N. I. Doctor of Engineering Sciences, Filatiev M. V. Candidate of Engineering Sciences, Cherpurna L. A. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

DETERMINATION OF EMPIRICAL COEFFICIENTS TO PREDICT THE DYNAMICS OF THE EARTH'S SURFACE SHIFTING WHEN COAL SEAMS MINING

Dependencies of empirical coefficients of the logistic equation of shifting the earth's surface are determined on the basis of the correlation analysis; they depend on the main parameters of the geological and mining conditions, which allow to predict the dynamics of the earth's surface shifting on the data basis of the mined seam power, depth of extraction works, advance rates of the stope and length of lava.

Key words: *earth's surface, shifting, empirical coefficients, modeling, logistical dependence, complex parameters, dynamics.*