

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГРАНИЦ СТАДИЙ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД ДВИЖУЩИМСЯ ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ

При решении задач горного производства, связанных с защитой сооружений и объектов на земной поверхности, существенное значение имеет установление динамики процесса сдвижения и выделение его характерных стадий. Общая продолжительность делится на три стадии: начальную, активную и затухания. Определение указанных стадий согласно нормативному документу [1] производится достаточно условно и в современных условиях больших глубин разработки существующий подход к их определению нельзя признать полностью корректным. Наиболее перспективным направлением в решении рассматриваемой проблемы представляется подход, предложенный профессором Гавриленко Ю. Н. [2, 3].

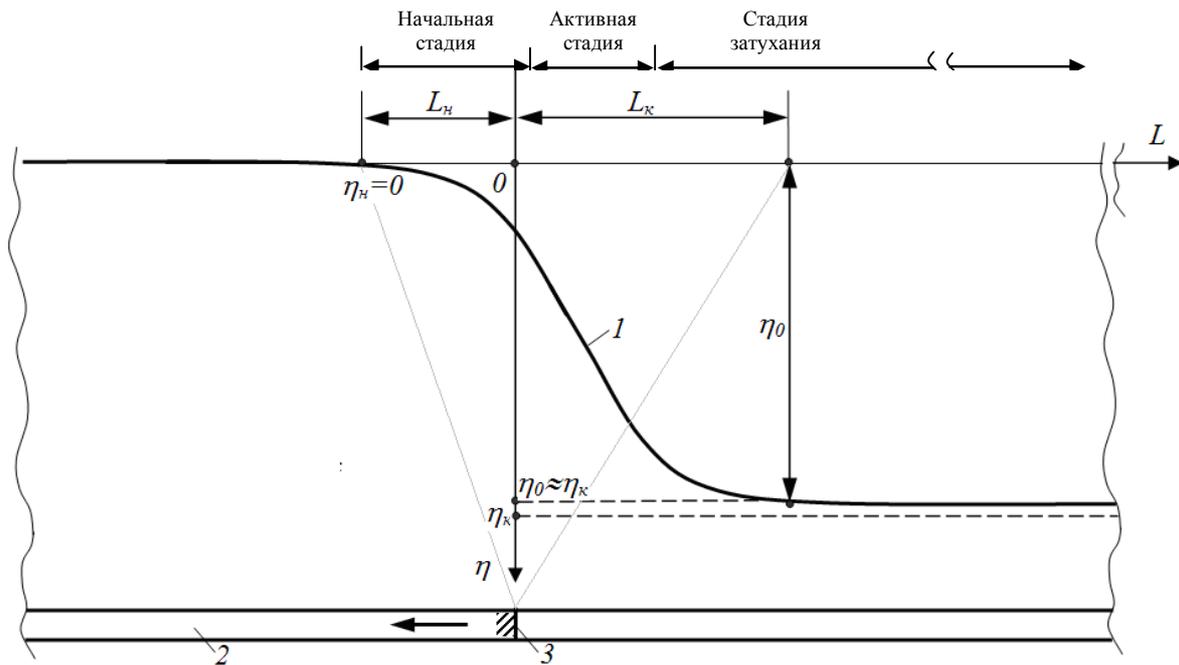
Деление процесса сдвижения земной поверхности на отдельные стадии предлагается производить с помощью характерных точек математической функции, описывающей развитие оседания земной поверхности во времени. В качестве таких точек использовались экстремумы первых трех производных по времени от основного уравнения, описывающего изменение оседания точки земной поверхности в процессе сдвижения [2–4].

В отличие от предложенного подхода [2–4], использование геометрических параметров при моделировании процесса сдвижения земной поверхности на отдельных стадиях является более целесообразным, так как они позволяют увязать между собой степень развития очистных работ, изменение углов полных сдвижений в подработанных породах и максимальное оседание земной поверхности.

Для описания всех стадий протекания процесса оседания точки земной поверхности подходят математические модели, которые отражают постепенное увеличение (начальная стадия) параметра, интенсивный рост (активная стадия) и стабилизацию процесса. Эти условия выполняются экспоненциальной [2, 3], логистической [5] зависимостями и функцией гиперболического тангенса [4].

На рисунке 1 представлен общий вид кривой, описывающей динамику оседания некоторой точки K земной поверхности относительно проекции очистного забоя. Воздействие горной выработки на рассматриваемую точку K земной поверхности начинается на расстоянии L_n при проявлении первых признаков сдвижения. Положение очистного забоя, соответствующее началу сдвижения точки K , определить на основании маркшейдерских замеров сложно. Вследствие чего началом координат считается момент прохождения горной выработки под рассматриваемой точкой земной поверхности. При отходе лавы от точки K на расстоянии L_k ее влияние на процесс сдвижения уменьшается. В этот момент значение конечного оседания (η_k) приближается к глубине плоского дна мульды сдвижения (η_0). Дальнейшее увеличение конечного оседания (η_k) связано, в большей степени, с процессами уплотнения вмещающих пород.

Следовательно, кривая I (рис. 1) оседания точки K земной поверхности относительно проекции очистного забоя характеризуется параметрами мульды сдвижения (η_n , η_k) и расстояниями (L_n , L_k) соответственно на начало и окончание ее оседания.



1 — кривая траектории оседания точки K земной поверхности; 2 — разрабатываемый пласт; 3 — момент прохождения очистным забоем под точкой наблюдения K ; η_n, η_k — соответственно начальное и конечное оседание точки K ; η_0 — глубина плоского дна мульды сдвижения; L_n, L_k — расстояния между проекцией очистного забоя и точкой K соответственно на начало и окончание ее сдвижения; δ_d — динамический граничный угол; ψ_d — динамический угол полных сдвижений

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

Расстояние (L_n) между проекцией очистного забоя и точкой K на начало ее сдвижения определяется при условии $\eta_n = 0$. Так как минимальное значение экспоненциальной и логистической функций асимптотически приближается к нулю, то для определения начала воздействия очистных работ на земную поверхность введем допущение $\eta_n = d \cdot \eta_k = 0,01\eta_k$. При определении L_k за окончание процесса сдвижения принимается момент, когда оседание достигает конечного значения $\eta = (0,97 \div 0,99)\eta_k$.

Кривая динамики оседания точки земной поверхности согласно экспоненциальной зависимости [2] описывается уравнением

$$\eta(L) = \eta_k \left[1 - \exp(-\beta_2 (L + L_0)^2) \right]. \quad (1)$$

Параметр η_k соответствует величине глубины мульды сдвижения, после образования которой конечное оседание остается практически неизменным при любом положении очистного забоя.

Условие начала сдвижения ($\eta_n = 0$) определяет расстояние L_0 от проекции линии забоя до точки наблюдений, при котором начинается влияние лавы. Согласно схеме оседания точки земной поверхности (рис. 1), расстояние L_0 соответствует размеру L_n .

Параметр β_2 эмпирического уравнения (1) устанавливается на основании статистической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Экстремумы уравнений первых трех производных функции (1)

$$\eta'(L) = 2\eta_k \cdot (L + L_0) \cdot \beta_2 \cdot \exp(-\beta_2 (L + L_0)^2), \quad (2)$$

$$\eta''(L) = 2\eta_{\kappa} \cdot \beta_2 \cdot \exp(-\beta_2(L + L_0)^2) \cdot [1 - 2\beta_2(L + L_0)^2], \quad (3)$$

$$\eta'''(L) = 4\eta_{\kappa} \cdot \beta_2^2(L + L_0) \cdot \exp(-\beta_2(L + L_0)^2) \cdot [-3 + 2\beta_2(L + L_0)^2] \quad (4)$$

определяют положение характерных точек кривой динамики оседания земной поверхности.

Начало активной стадии сдвижения (рис. 1, т. В) соответствует минимальному экстремуму функции $\eta'''(L) = f(L)$. Минимальный экстремум второй производной от основного экспоненциального уравнения $\eta''(L) = f(L)$ определяет точку D (окончание активной стадии и начало стадии затухания). Экстремум функции $\eta'(L) = f(L)$ дает точку перегиба кривой динамики оседания (рис. 1, т. С).

2. Применительно к предложенной схеме (рис. 1) функцию гиперболического тангенса можно представить уравнением

$$\eta(L) = n_1[1 + \tanh(n_2L + n_3)], \quad (5)$$

где n_1, n_2, n_3 — эмпирические коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов.

Уравнения производных функции гиперболического тангенса сводятся к выражениям [4]

$$\eta'(L) = n_1n_2[1 - \tanh^2(n_2L + n_3)], \quad (6)$$

$$\eta''(L) = -2n_1n_2^2 \tanh(n_2L + n_3)[1 - \tanh^2(n_2L + n_3)]. \quad (7)$$

Положительный и отрицательный экстремумы второй производной (7) функции гиперболического тангенса дает определение точек В и D, соответствующих границам активной стадии сдвижения. Экстремум первой производной (6) соответствует точке перегиба кривой динамики оседания.

3. Логистическая кривая представляет собой математическую модель, которая описывает изменение главного параметра при развитии системы согласно S — образному закону [5].

Уравнение логистической кривой для схемы (рис. 1) примет вид

$$\eta(L) = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(-c \cdot L)}, \quad (8)$$

где a — эмпирический коэффициент, соответствующий конечному, максимально возможному значению оседания земной поверхности η_{κ} . В рассматриваемом случае оно приравнивается глубине дна мульды сдвижения $\eta_0 \approx \eta_{\kappa}$;

b, c — эмпирические коэффициенты, определяющие положение кривой относительно оси абсцисс и ширину среднего участка, т. е. продолжительность активной стадии сдвижения.

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

Первая производная уравнения (8) имеет вид

$$\eta'(L) = \frac{abc \cdot \exp(-cL)}{(1 + b \cdot \exp(-cL))^2}. \quad (9)$$

Экстремальному значению функции $\eta'(L) = f(L)$ соответствует точка С перегиба логистической кривой.

Вторая производная от основного логистического уравнения (8)

$$\eta''(L) = \frac{-abc^2 \cdot \exp(-cL) \cdot (1 - b \cdot \exp(-cL))}{(1 + b \cdot \exp(-c \cdot L))^3} \quad (10)$$

имеет два экстремальных значения. Значения координат этих точек являются границами стадии интенсивного оседания земной поверхности (положительный экстремум определяет точку В, отрицательный — точку D кривой оседания).

Эмпирические коэффициенты зависимостей (1, 5 и 8) могут быть получены на основании маркшейдерских наблюдений в начале процесса оседания, что позволит прогнозировать дальнейшее развитие оседания земной поверхности и своевременно принять предупредительные меры защиты зданий и сооружений.

На основании теоретического исследования математических функций (1, 5 и 8) количественно определены координаты характерных точек кривых динамики оседания, которые предлагается использовать в качестве границ стадий сдвижения. Их значения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 — Определение координат характерных точек кривой динамики оседания земной поверхности

Характерные точки	Экспоненциальная зависимость $\eta(L) = \eta_k [1 - \exp(-\beta_2(L + L_0)^2)]$		Функция гиперболического тангенса $\eta(L) = n_1[1 + \tanh(n_2L + n_3)]$		Логистическая зависимость $\eta(L) = \frac{a}{1 + b \cdot \exp(-c \cdot L)}$	
	абсцисса, L , м	ордината, η , мм	абсцисса, L , м	ордината, η , мм	абсцисса, L , м	ордината, η , мм
A	$L_H = -L_0$	0	$L_H = -\frac{2,298 + n_3}{n_2}$	0	$L_H = \frac{4,595 - \ln b}{-c}$	0
O	0	$\eta_k(1 - \exp(-\beta_2 L_0^2))$	0	$n_1[1 + \tanh n_3]$	0	$\frac{\eta_k}{1 + b}$
B	$\frac{0,5246}{\sqrt{\beta_2}} - L_0$	$0,241\eta_k$	$-\frac{0,658 + n_3}{n_2}$	$0,21\eta_k$	$\frac{\ln(3,73/b)}{-c}$	$0,21\eta_k$
C	$\frac{0,7071}{\sqrt{\beta_2}} - L_0$	$0,393\eta_k$	$-\frac{n_3}{n_2}$	$0,50\eta_k$	$\frac{\ln b}{c}$	$0,50\eta_k$
D	$\frac{1,2247}{\sqrt{\beta_2}} - L_0$	$0,777\eta_k$	$\frac{0,658 - n_3}{n_2}$	$0,80\eta_k$	$\frac{\ln(0,268/b)}{-c}$	$0,79\eta_k$
F	$L_k = \sqrt{\frac{\ln(1-d)}{-\beta_2}} - L_0$	$(0,97 \div 0,99)\eta_k$	$L_k = \frac{1,946 - n_3}{n_2}$	$(0,97 \div 0,99)\eta_k$	$L_k = \frac{3,892 + \ln b}{c}$	$(0,97 \div 0,99)\eta_k$

Анализ координат характерных точек показывает, что их ординаты зависят только от параметра η_k , а абсциссы — от эмпирических коэффициентов рассмотренных кривых, описывающих динамику оседание точки земной поверхности.

Три стадии процесса сдвижения земной поверхности (начальная, активная и затухающая) имеют свои особенности, связанные с развитием очистных работ. При неполной подработке земной поверхности необходимо рассматривать математические модели с применением параметров, характеризующих геометрические размеры очистных выработок (выработанных пространств). После достижения полной подработки процессы сдвижения точек земной поверхности зависят только от их расположения по отношению к очистному забою.

Список литературы

1. ГСТУ 101.00159226.001–2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом. — К. : Минтопэнерго, 2004. — 128 с. — (Отраслевой стандарт Украины).

2. Гавриленко, Ю. Н. Математическое описание динамики процесса сдвижения на угольных шахтах Донбасса / Ю. Н. Гавриленко // International Society for Mine Surveying : XIII International Congress, Budapest, Hungary, 24–28 September. — 2007. — Report 032. — 6 p.
3. Гавриленко, Ю. Н. Прогнозирование сдвижений земной поверхности во времени / Ю. Н. Гавриленко // Уголь Украины. — 2011. — № 6. — С. 45–49.
4. 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.
5. Чепурная, Л. А. Определение эмпирических коэффициентов для прогнозирования динамики сдвижения земной поверхности при отработке угольных пластов / Л. А. Чепурная, Н. И. Антощенко, М. В. Филатьев // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск, 2013. — Вып. 42. — С. 6–14.