

**А. С. БАРЫШНИКОВ,**

магистр

(Национальный горный университет)

УДК 622.833

## Прогнозирование конвергенции подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ

Предложено использовать логистическую асимметричную функцию-модель для математического описания процесса смещений пород в подготовительной выработке под влиянием очистных работ. На базе модели реализован статистико-аналитический способ прогнозирования конвергенции выработки. Приведен пример использования данного способа для прогнозирования конвергенции штреков в условиях шахты «Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» при разной скорости подвигания очистных забоев.

**Ключевые слова:** подготовительная выработка, прогнозирование конвергенции, скорость подвигания очистного забоя, логистическая функция, слабые породы.

**Контактная информация:** as\_nmu@mail.ru

**Постановка проблемы.** Во время выемки угля неизбежен процесс деформирования подготовительных выработок, оконтуривающих лаву. Смещения породного контура в этих выработках определяются совокупностью влияющих горнотехнических факторов, которые формируют характер развития деформаций во времени и пространстве в зависимости от расстояния до очистного забоя. Между характером смещений и значениями горнотехнических факторов существуют зависимости, которые используются при прогнозировании развития процесса деформирования выработки.

На основании прогнозных смещений и их распределения по длине подготовительной выработки рассчитывают:

- оптимальную площадь сечения выработки;
- необходимый отпор крепи для уменьшения смещений;
- податливость крепи;
- конструкцию усиливающей крепи;
- время проведения ремонтных работ и их объем.

С учетом этих данных, основанных на прогнозировании деформирования контура выработки, которую предполагается использовать повторно,

можно выполнить экономическую оценку эффективности ее поддержания и обосновать мероприятия по снижению деформаций.

**Анализ публикаций.** Распространенный способ анализа характера развития смещений – их математическое описание с помощью функциональных зависимостей, параметры которых отражают влияние учитываемых горнотехнических факторов [1–7]. Такие функции являются аналитической интерпретацией пространственно-временного развития смещений в породном массиве и используются в качестве моделей при прогнозировании смещений пород вокруг выработки. Очевидно, что от выбора функции и входящих в нее параметров зависит качество прогноза ожидаемых смещений.

Особенность развития конвергенции под влиянием очистных работ – прохождение участка выемочной выработки через несколько зон, в которых различны как геомеханика процесса сдвижения пород, так и отпор крепи, а смещения представляют собой непрерывный интегральный процесс проявления этих факторов на контуре выработки. Указанную особенность следует принимать во внимание при математическом описании процесса конвергенции с помощью функций, так как возникает несимметричность кривой смещений относительно точки перегиба по обеим осям координат (рис. 1).

Кроме того, математические модели должны достоверно описывать скорости смещений как производные от смещений либо смещения как интегрированные скорости. Поэтому в процессе исследования закономерностей развития смещений породного контура были предложены различные подходы к моделированию процесса конвергенции с помощью математических функций. Так, для описания смещений (скоростей смещений) рекомендуется использовать:

- интегральную функцию Гаусса [1]. Особенность модели в симметричности относительно точки перегиба (рис. 2, кривая 1);
- полиномиальную функцию [2]. Однако для прогноза процесса смещений эта функция не используется, т. е. носит только описательный характер (рис. 2, кривая 2);

- асимметричную  $s$ -образную функцию для описания скоростей смещений [3], где смещения определяются интегрированием (см. рис. 2, кривые 3, 3'). Из анализа следует, что асимметрия функции фиксированная из-за жестко заданного значения степени, в которую возводится вторая множитель;

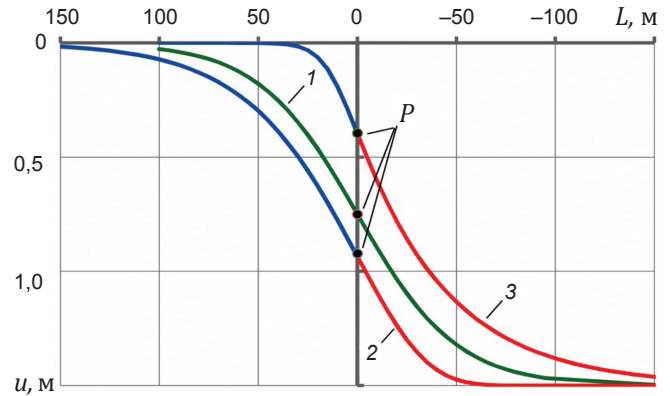
- двухпараметрическую  $s$ -образную функцию [4], которая также обладает фиксированной асимметрией (см. рис. 2, кривые 3, 3');

- разделение графика процесса на две части: смещения до точки перегиба описываются экспоненциальной функцией, за ней – гиперболической. Пример графика смещений приведен на рис. 2, кривая 4 [5]. Аналогичный способ описания смещений пород используется в нормативном документе [6]. При определении скоростей смещений путем дифференцирования функций возникает несостыковка скоростей смещений в точке перегиба (см. рис. 2, кривая 4'). Кроме того, в способе описания смещений, предложенном проф. С. Прусекком [1], модель представлена двумя гиперболическими четырех- и пятипараметрическими функциями, которые стыкуются в точке пересечения кривых производных для обеспечения непрерывности кривой скоростей смещений (см. рис. 2, кривая 5'). Но в таком случае между кривыми смещений возникает разрыв (рис. 2, кривая 5), который предлагается заполнить отрезком прямолинейной функции;

- разбиение измеренных данных на три участка и аппроксимация каждого линейной функцией (см. рис. 2, кривая 6). Параметры, определяющие развитие смещений, – координаты точек пересечения отрезков прямых и их углы наклона. Предложенный способ [7] описывает скорости смещений как отрезки прямых (см. рис. 2, кривая 6').

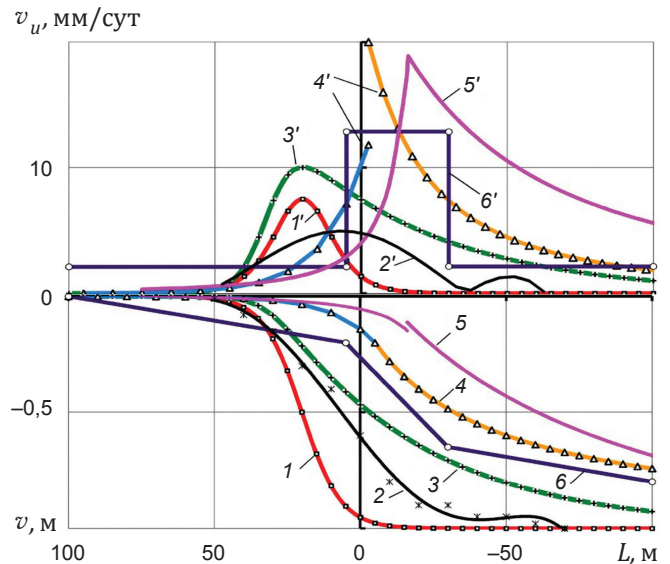
Обобщая результаты исследований [1–7], можно выделить следующие типы функций для математического описания процесса смещений пород:

- первый* – аппроксимация нелинейной функции с симметрией относительно точки перегиба или фиксированной асимметрией;
- второй* – аппроксимация полиномом;
- третий* – аппроксимация кусочно-линейными функциями;
- четвертый* – аппроксимация кусочно-нелинейными функциями.



**Рис. 1.** Функция, описывающая смещения породного контура  $u$  в зависимости от расстояния до очистного забоя  $L$  при разных положениях точки перегиба  $P$ : 1 – симметричная кривая; 2 – смещения до очистного забоя больше, чем за ним; 3 – смещения до очистного забоя меньше, чем за ним.

*Первый тип* функций достаточно прост и удобен, однако из-за симметричности или фиксированной асимметрии не универсален и может быть применен только в конкретных горнотехнических условиях. Для удовлетворительной аппроксимации полиномиальной модели – *второй тип* – необходимо применение многочлена 6-й степени и более, что затрудняет



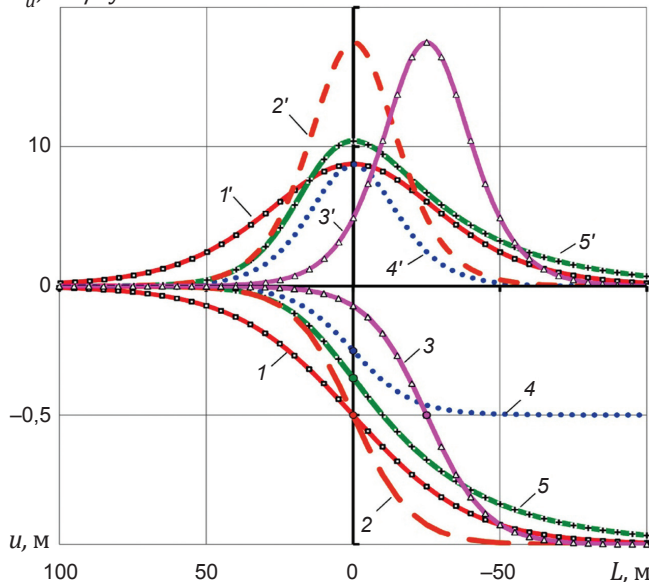
**Рис. 2.** Кривые функций, описывающих смещения  $u$  и скорости смещений  $v_u$  в зависимости от расстояния  $L$  до очистного забоя: 1, 1' – симметричная функция [1]; 2, 2' – полиномиальная функция [2]; 3, 3' – функция с фиксированной асимметрией [3, 4]; 4, 4' – кусочно-нелинейная функция с несостыковкой скоростей смещений [5, 6]; 5, 5' – кусочно-нелинейная функция с несостыковкой смещений [1]; 6, 6' – кусочно-линейная функция [7].

установление зависимостей между значениями параметров функции и горнотехнических факторов [8]. Функции *третьего* и *четвертого* типов, будучи кусочными, не отражают интегральность процесса смещений. Кроме того, функции третьего типа не позволяют достоверно описать изменение скоростей смещений. Функции четвертого типа имеют дополнительные условия относительно состыковки и не отражают переход скоростей смещений или смещений в точке перегиба, а также содержат в совокупности 6–10 параметров.

**Постановка задачи исследований.** Учитывая изложенное, для прогнозирования смещений пород в подготовительной выработке необходимо:

- рассмотреть более совершенную функцию-модель для описания смещений пород в подготовительных выработках под влиянием очистных работ;
- установить зависимости между значениями параметров модели и влияющими горнотехническими факторами. Так как в нормативном документе [6] при расчете смещений пород в подготовительной выработке не учитывается фактор скорости подвигания очистного забоя, а закономерности деформирования штрека при разной

$v_w$ , мм/сут



**Рис. 3.** Смещения  $u$  и скорости смещений  $v_w$ , задаваемые логистической функцией-моделью при разных значениях ее параметров в зависимости от расстояния  $L$  до очистного забоя: 1, 1' – вид функции при  $u_{\max} = 1$ ;  $d = 0,05$ ;  $m = -0,1$ ;  $x_p = 0$ ; вид функции при 2, 2' –  $d = 0,1$ ; 3, 3' –  $x_p = -25$ ,  $d = 0,1$ ; 4, 4' –  $u_{\max} = 0,5$ ; 5, 5' –  $m = -0,3$ .

скорости подвигания в условиях слабых боковых пород недостаточно изучены [9], то актуальной задачей является прогнозирование конвергенции при разных значениях данного фактора.

**Результаты исследований.** Для описания смещений пород, учитывая пространственно-временной характер их развития, целесообразно применение функций, в которых зависимая переменная растет, достигает точки перегиба, а затем замедляет свой рост и асимптотически стремится к некоторому пределу. Такие функции также называют интегральными, кумулятивными, S-образными, сигмоидальными, логистическими, они хорошо подходят для описания жизненного цикла процесса [10].

В работе [11] широко представлены логистические модели (рассмотрено 18 функций), из анализа которых следует, что характеру развития смещений пород наиболее соответствует модель Ричардса, обладающая произвольной асимметрией относительно точки перегиба. Исследования, проведенные авторами этой статьи, позволили адаптировать ее для описания смещений пород и записать в виде

$$u = u_{\max} - u_{\max}[1 - (e^{dx_p/m})e^{-dL}]^m, \quad (1)$$

где  $u$  – смещение пород, м;

$u_{\max}$ ,  $d$ ,  $m$ ,  $x_p$  – параметры функции;  $u_{\max}$  и  $x_p$  являются максимумом смещений за лавой и абсциссой точки перегиба, параметр  $d$  отражает скорость смещений пород, параметр  $m$  влияет на асимметрию кривой (рис. 3);

$L$  – расстояние до очистного забоя, м (впереди забоя знак «+», за забоем знак «-»).

Принятая модель смещений пород позволяет прогнозировать развитие вертикальной конвергенции с учетом изменения горнотехнических условий ведения горных работ путем установления их влияния на параметры  $u_{\max}$ ,  $x_p$ ,  $d$  и  $m$  функции-модели (1). Для этого необходимо:

- набрать исходный объем информации, т. е. замерять смещения пород при разных значениях влияющего горнотехнического фактора;
- аппроксимировать измеренные данные функцией-моделью (1);
- установить зависимости между значением влияющего фактора и параметрами модели;
- рассчитать параметры по полученным зависимостям, задаваясь значением влияющего фактора;

построить прогнозную функцию-модель по рассчитанным параметрам в координатах: расстояние до очистного забоя–смещение.

Такой способ прогнозирования называют статистико-аналитическим. Чтобы учесть одновременное изменение нескольких влияющих горно-технических факторов, можно применить множественную регрессию либо нейросетевое моделирование [1]. Для аппроксимации измеренных данных функцией-моделью (1) рекомендуется использовать метод последовательных приближений [12], который, например, реализован в программном продукте [13]. Поскольку входящие в функцию-модель параметры влияют на скорости смещений, то для оптимального соответствия как смещениям, так и скоростям смещений предлагается ее предварительная калибровка. Процесс заключается в аппроксимации смещений функцией-моделью (1), а затем скоростей смещений производной этой модели с дальнейшим усреднением полученных параметров  $m$  и  $d$ .

Рассмотрим применение данного способа прогнозирования в горнотехнических условиях шахты «Степная» при разных скоростях подвигания очистного забоя. Измерения выполнены в 163-м, 159-м и 165-м штреках при скоростях подвигания очистного забоя 3, 4 и 7 м/сут и при эквивалентных по отпору паспортах крепления и поддержания [9]. Полученные данные описаны функцией-моделью (1), параметры которой для каждого случая приведены в табл. 1.

Между скоростью  $v$  подвигания забоя лавы и параметрами модели  $d$ ,  $m$ ,  $u_{\max}$  и  $x_p$  установлены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} d &= 0,0243v^{0,6184} \text{ при } R^2 = 0,99; \\ m &= -1,7177v^{-1,2880} \text{ при } R^2 = 0,98; \\ u_{\max} &= -4,069v^{-0,67} \text{ при } R^2 = 0,96; \\ x_p &= -9,924\ln(v) + 12,7 \text{ при } R^2 = 0,67, \end{aligned}$$

где  $R^2$  – коэффициент детерминации.

По полученным зависимостям были рассчитаны параметры функции-модели для прогнозируемых скоростей подвигания лавы 2, 3, 4, 7 и 10 м/сут (табл. 2), а по параметрам построены прогнозные модели-кривые (рис. 4).

Результаты справедливы для таких условий:

- слабометаморфизованные породы, показатель  $\gamma H/\sigma_{\text{сж}} = 0,3...0,4$ ;
- отпор крепи впереди лавы и на сопряжении 550–650 кН/м. За лавой установлены

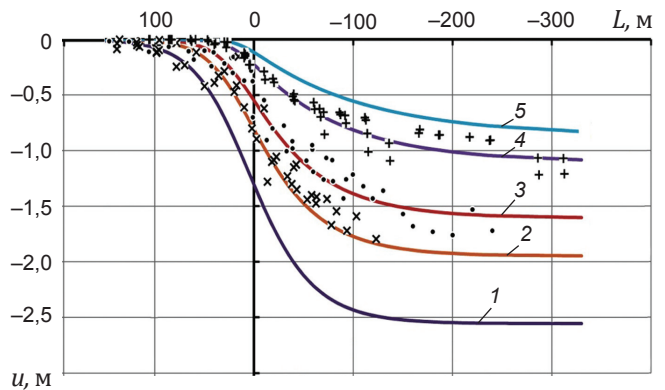
Таблица 1

Штрек	Скорость подвигания лавы, м/сут	Значение параметра функции-модели (1)			
		$d$	$m$	$u_{\max}$	$x_p$
163-й	3	0,0479	-0,4582	-1,87	4,0
159-й	4	0,0573	-0,2500	-1,72	-4,5
165-й	7	0,0809	-0,1470	-1,08	-5,5

две деревянные стойки усиления с шагом 0,7–0,8 м и охранная конструкция из органных рядов и накатных костров;

- отсутствие мощных слоев песчаника (>15 м) в кровле обрабатываемого пласта.

При другом значении показателя  $\gamma H/\sigma_{\text{сж}}$  и (или) отпоре крепи можно экстраполировать



**Рис. 4.** Прогнозируемые суммарные смещения  $u$  кровли и подошвы выработки в зависимости от расстояния  $L$  до очистного забоя при: 1, 2, 3, 4 и 5 – скорости подвигания лавы 2, 3, 4, 7 и 10 м/сут; •, ×, + – измеренные смещения в 159-м, 163-м и 165-м штреках шахты «Степная».

полученные результаты, приняв указанные условия за единичные и используя относительные изменения параметров  $u_{\max}$ ,  $d$ ,  $m$  и  $x_p$ . Порядок действий в таком случае следующий (верхний индекс «Л» применяется для обозначения параметров модели, полученных аппроксимацией смещений, измеренных при другом значении

Таблица 2

Скорость подвигания лавы, м/сут	Прогнозируемое значение параметра			
	$d$	$m$	$u_{\max}$	$x_p$
2	0,0373	-0,7034	-2,56	5,8
3	0,0479	-0,4173	-1,95	1,8
4	0,0573	-0,2881	-1,61	-1,1
7	0,0809	-0,1401	-1,10	-6,6
10	0,1009	-0,0885	-0,87	-10,2



## ЛИТЕРАТУРА

показателя  $\gamma H / \sigma_{сж}$  и (или) отпоре крепи; «<sup>п</sup>» – для обозначения параметров прогнозной модели):

1) провести натурные наблюдения за смещениями пород в других горнотехнических условиях (при значениях показателя  $\gamma H / \sigma_{сж}$  и отпора крепи, отличающихся от указанных выше) при скорости подвигания забоя  $v^д$ ;

2) аппроксимировать полученные данные функцией-моделью (1) и получить значения параметров  $u_{max}^д$ ,  $d^д$ ,  $m^д$  и  $x_p^д$ ;

3) рассчитать коэффициент увеличения скорости подвигания очистного забоя  $k_v$  для прогноза значений смещений при скорости подвигания  $v^п$ , отличной от  $v^д$ :

$$k_v = v^п / v^д,$$

где  $v^п$  – прогнозируемая скорость подвигания очистного забоя;

4) рассчитать параметры  $u_{max}^п$ ,  $d^п$ ,  $m^п$  и  $x_p^п$  для прогнозной модели смещений при скорости подвигания  $v^п$  по формулам:

$$d^п = d^д k_v^{0,6184}, \quad m^п = m^д k_v^{-1,2880},$$

$$u_{max}^п = u_{max}^д k_v^{-0,67}, \quad x_p^п = x_p^д - 9,924 \ln(k_v).$$

В целях совершенствования статистико-аналитической модели рекомендуется проводить наблюдения за смещениями пород в условиях, для которых выполнялось прогнозирование. Результаты наблюдений служат для оценки достоверности и пополнения базы данных модели.

**Выводы.** Для описания смещений пород в подготовительных выработках в зоне влияния лавы предложена нелинейная функция-модель, отличительная особенность которой – непрерывность и произвольное положение точки асимметрии. Параметры функции определяются путем аппроксимации измеренных смещений пород в выработках.

На основании логистической функции-модели можно реализовать статистико-аналитический способ прогнозирования, заключающийся в установлении зависимостей между значениями параметров функции-модели и горнотехническими параметрами, в условиях которых выполнялись замеры смещений пород.

Для условий слабых боковых пород Западного Донбасса выполнено прогнозирование конвергенции выработки с учетом разной скорости подвигания очистного забоя. В случае увеличения количества наблюдений прогнозную модель необходимо уточнять.

1. Prusek S. Metody prognozowania deformacji chodników przyścianowych w strefach wpływu eksploatacji z zawalem stropu / S. Prusek // Prace Naukowe GIG. – Katowice, 2008. – № 874. – 186 s.
2. Бондаренко В. И. Закономерности сдвижения пород на контуре выемочных штреков / В. И. Бондаренко, С. Л. Денисов, М. С. Демидов // Уголь Украины. – 2011. – № 3. – С. 3–5.
3. Федотов А. П. Устойчивость откаточных штреков на крутых пластах Донбасса / А. П. Федотов // Уголь Украины. – 1964. – № 5. – С. 14–18.
4. Волков А. Е. Исследование характера сдвижения горных пород в связи с выбором порядка проведения нарезных выработок при слоевой отработке мощных пологих пластов Томусинского района Кузбасса / А. Е. Волков // Труды ВНИМИ. – 1971. – № 83. – С. 59–65.
5. Biliński A. Geomechaniczny monitoring zmechanizowanych ścian zlokalizowanych na dużych głębokościach / A. Biliński, B. Dreinert, T. Kostyk // Prace Naukowe GIG. – 1996. – № 812. – 104 s.
6. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони: СОУ 10.1.00185790.011:2007 / Мінвуглепром України. – К., 2007. – 113 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
7. Prusek S. Geometrical Description of Gateroad Roof Sag / S. Prusek, Z. Lubosik // 29-th International Conf. on Ground Control in Mining, July 27–29, 2010. – Morgantown, 2010. – P. 192–198.
8. Назаренко В. А. Аналитическое описание вертикальных сдвижений и деформаций земной поверхности над движущимся очистным забоем в условиях Западного Донбасса / В. А. Назаренко // Наук. праці ДонНТУ. – 2003. – № 62. – С. 135–143.
9. Халимендик Ю. М. Влияние скорости подвигания очистного забоя на деформирование контура подготовительной выработки в условиях слабометаморфизованных пород / Ю. М. Халимендик, А. С. Барышников // Форум горняков–2015: междунар. науч.-практ. конф. – Днепрпетровск, 2015. – Т. 2. – С. 124–128.
10. Семенычев В. К. Моделирование экономической динамики логистическими кривыми с произвольной асимметрией / В. К. Семенычев, В. Н. Кожухова // Вест. Поволж. гос. ун-та сервиса. – 2012. – № 4 (24). – С. 86–91.
11. Семенычев В. К. Параметрическая идентификация рядов динамики: модели, эволюция / В. К. Семенычев, Е. В. Семенычев. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2011. – 364 с.
12. Алгоритм Левенберга–Марквардта [Электронный ресурс]: Материал из Википедии – свободной энциклопедии: Версия 68090591, сохраненная в 18:49 UTC 21 января 2015 / авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2015. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=68090591>
13. Программное обеспечение CurveExpert Professional. – Режим доступа: [www.curveexpert.net](http://www.curveexpert.net)