

3. Гузеев А. Г. Технология строительства горных предприятий : учеб. [для студ. высш. уч. зав.] / Гузеев А. Г., Гудзь А. Г., Пономаренко А. К. Киев – Донецк : Вища школа, 1986. – 390 с.
4. Жиленко Н. П. Справочное пособие по реактивно-турбинному бурению / Н.П. Жиленко, А. А. Краснощек. - М. : Недра, 1987. – 309 с.
5. Хайн Норман Дж. Геология, разведка, бурение и добыча нефти / Хайн Норман Дж. - М. : Олимп-бизнес, 2010. – 752 с.
6. Стоев И. С. Технология и организация строительства вертикальных стволов шахт / И. С. Стоев, П. С. Стоев. – Донецк: ЦБНТИ, 1994. – 212 с.
7. Федюкин В. А. Проходка шахтных стволов и скважин бурением / Федюкин В. А. – Москва : Углетехиздат, 1959. – 454 с.
8. Левит В. В. О перспективах сооружения стволов и скважин большого диаметра / В.В. Левит, В.А. Турчин, А.А. Горелкин // Уголь Украины. – 2007.- № 8. – С. 14–16.
9. Буримов Ю. Г. Бурение верхних интервалов глубоких скважин большого диаметра / Буримов Ю. Г., Копылов А. С., Орлов А. В. - М. : Недра, 1975. – 232 с.
10. Бурение нефтяных и газовых скважин : учеб. [для студ. высш. и ср. уч. зав.] / [Шацов Н. И., Федоров В. С., Кулиев С. М. и др.] ; под ред. Н.И. Шацова. - М. : Гостоптехиздат, 1961. – 666 с.
11. Качан В. Г. Бурение шахтных стволов и скважин / В. Г. Качан, Купчинский И. А. – М. : Недра, 1984. – 278 с.
12. Пилипещь В. І. Буріння стволів шахт та технічних свердловин : підруч. [для студ. вищ. уч. закл.] / Пилипещь В. І., Тулуб С.Б., Левіт В.В. – Донецьк : Норд-Прес, 2009. – 559 с.
13. Гузеев А. Г. Основы проектирования технологии строительства и реконструкции шахт : учеб. [для студ. высш. уч. зав.] / Гузеев А. Г. – М. : Недра, 1972. – 232 с.
14. Калинин А. Г. Технология бурения разведочных скважин на нефть и газ / Калинин А. Г., Левицкий А. З., Никитин Б. А. - М. : Недра, 1998. – 437 с.
15. Ивачев Л. М. Промысловые жидкости и тампонажные смеси : учеб. [для студ. высш. уч. зав.] / Ивачев Л. М. - М. : Недра, 1987. – 242 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Шашенком О.М.  
Надійшла до редакції 25.03.10*

УДК [622.261 – 1123:622.281]:519.25

© Е.А. Сдвижкова, Д.В. Бабец, А.В. Мартовицкий

## **МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД В ПРЕДЕЛАХ ШАХТНОГО ПОЛЯ**

Разработан алгоритм прогноза прочностных свойств углевмещающих пород. Прочностные характеристики горных пород представлены как функция координат точки шахтного поля. Приведена последовательность построения математической модели прочности вмещающих пород в пределах шахтного поля.

Розроблено алгоритм прогнозу міцнісних властивостей вуглевміщуючих порід. Міцнісні характеристики гірських порід представлені як функція координат точки шахтного поля. Приведена послідовність побудови математичної моделі міцності вміщуючих порід в межах шахтного поля.

The algorithm of the rock properties forecast is developed. The rock characteristics are presented as function of mine field point coordinates. The stages of mathematical model construction for rock property within a mine field are resulted.

**Введение.** Физико-механические свойства являются одним из главных критериев, количественно отражающих состояние углевмещающих пород в зависимости от петрографического состава, текстурно-структурных особенностей, обводненности и стадии катогенеза. Именно поэтому эти свойства пород берутся за основу при проектировании, строительстве и эксплуатации угледобывающих предприятий.

В настоящее время существуют различные методики построения литолого-прочностных карт углевмещающих пород. Наиболее перспективным является метод представления характеристики свойств горных пород как функции координат точки шахтного поля. Такая функция может быть построена путем экстраполяции имеющихся данных о величине исследуемой характеристики в нескольких точках опробования.

**Цель данной работы** - разработка алгоритма прогноза прочностных свойств углевмещающих пород в пределах шахтного поля.

**Основная часть.** *Подготовка данных для построения математической модели распределения свойств горных пород в пределах шахтного поля.* Подготовка исходных данных сводится к их сбору, упорядочиванию и записи в таблицу в виде удобном для дальнейшего анализа. Для проведения анализа, создания математической модели распределения свойств горных пород и дальнейшего прогноза физико-механических и физико-технических характеристик породного массива в пределах шахтного поля необходимо упорядочить данные о породах основной кровли и почвы по слоям.

Важную роль при построении математической модели играет выбор системы координат, которая покрывает всю исследуемую область и связана с глобальными земными координатами объекта формулами перехода:

$$X = x - x_0, Y = y - y_0, \quad (1)$$

где  $X, Y$  - координаты объекта в новой (исследовательской) системе координат,  $x, y$  - географические координаты объекта,  $x_0, y_0$  - географические координаты начала отсчета новой системы координат.

Ниже приведены примеры таблиц данных (табл. 1 и 2) для проведения дальнейшего анализа. Общей их особенностью является наличие координат скважины (в исследовательской системе координат) и данные о исследуемом параметре для каждой скважины по слоям.

Таблица 1

Номер скважины, №	Координаты скважины		Предел прочности на сжатие пород основной кровли, $R_c$		Предел прочности на растяжение пород основной кровли, $R_p$		Предел прочности на сжатие пород основной почвы, $R_c$		Предел прочности на растяжение пород основной почвы, $R_c$	
	$X$	$Y$	слой 1	слой 2	слой 1	слой 2	слой 1	слой 2	слой 1	слой 2

Таблица 2

Номер скважины, №	Координаты скважины		Коэффициент буримости пород основной кровли, $K_s$		Коэффициент буримости пород основной почвы, $K_s$		Расстояние между трещинами, $l_T$		Коэффициент структурного ослабления, $K_c$	
	X	Y	слой 1	слой 2	слой 1	слой 2	кровля	почва	кровля	почва

Если для исследуемого участка основная кровля или почва состоит из 3-х слоев, то таблицу необходимо расширить.

*Теоретические основы интерпретации статистических данных о распределении физико-механических свойств пород в пределах шахтного поля.* Пусть имеется  $n$  точек опробования, то есть информация о прочностных свойствах пород по  $n$  разведочным скважинам. Каждой точке опробования с координатами  $x, y$  на плоскости  $XOY$  ставится в соответствие значение прочности  $R$ . Система координат выбирается наиболее удобная с точки зрения построения функциональной зависимости. В частности, для первого этапа исследований может быть выбрана прямоугольная система координат с таким началом отсчета, чтобы значения координат всех точек опробования имели положительные значения. В дальнейшем эти координаты могут быть преобразованы в любую иную систему по формулам (1) в зависимости от задач исследований.

Тогда на первом шага анализа имеем предел прочности  $R$  как функцию точки плоскости  $R = R(M)$ , или иначе – как функцию координат  $R = R(x, y)$  в табличном виде (табл. 3).

Графиком функции двух переменных является некоторая поверхность, которая может быть построена по имеющимся точкам (рис. 1).

Таблица 3

$x \backslash y$	$x_1$	$x_2$	.....	$x_n$
$y_1$	$R_{11}$	$R_{12}$	.....	$R_{1n}$
$y_2$	$R_{21}$	$R_{22}$	.....	$R_{2n}$
.	.			
.	.			
.	.			
$y_n$	$R_{n1}$	$R_{n2}$	.....	$R_{nn}$

С использованием двумерного регрессионного анализа полученная поверхность может быть аппроксимирована выражением  $R(x, y)=0$ , то есть с тем или иным коэффициентом корреляции  $r$  может быть получено аналитическое выражение для функции  $R = R(x, y)$ . Если коэффициент корреляции достаточно высок ( $R^2 = 0,7-0,8$ ) аппроксимацию можно считать удовлетворительной, а изучаемую переменную  $R$  – предел прочности на сжатие - непрерывной функцией координат. Тогда свойства и характер изменения этой функции могут быть исследованы средствами математического анализа.

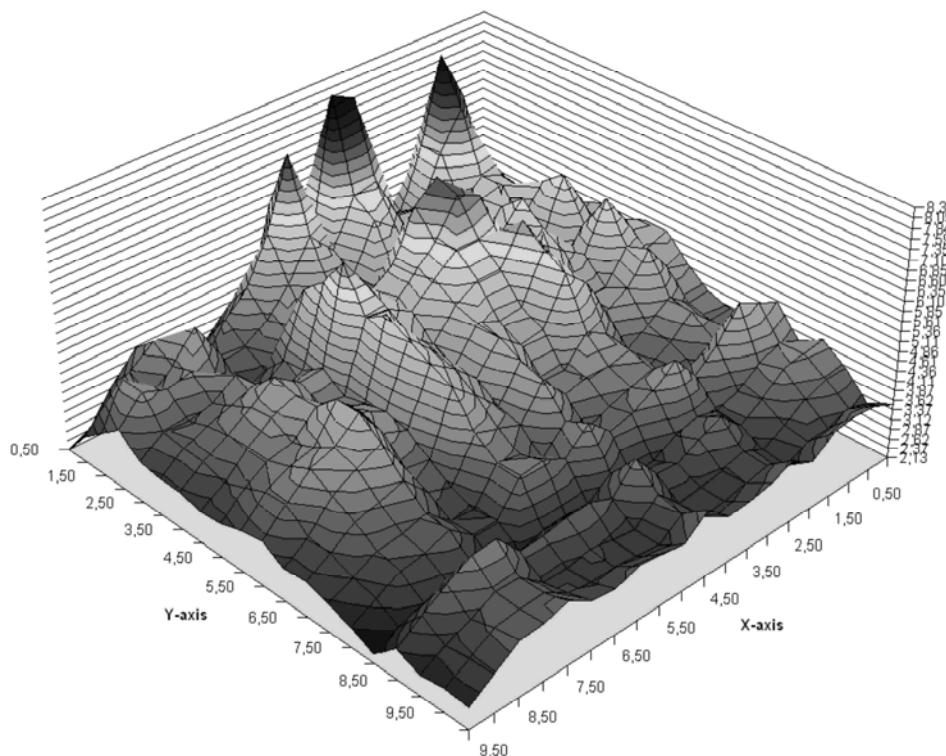


Рис.1. Гипотетический график функции распределения прочности

Функция  $R=R(x, y)$ , характеризующая прочностные свойства пород образует скалярное поле, заданное на части плоскости, ограниченной границами шахтного поля.

Множество точек, в которых скаляр  $R$  принимает постоянное значение, представляет собой семейство линий уровня поля

$$R(x, y) = C$$

Картина линий уровня позволяет судить о структуре поля, о направлениях, в которых поле изменяется быстрее либо медленнее. Таким образом, имея скалярное поле, которое характеризует распределение прочности в пределах шахтного поля, можем представить его в виде совокупности линий уровня, которые применительно к механике горных пород называются изолиниями напряжений (рис. 2).

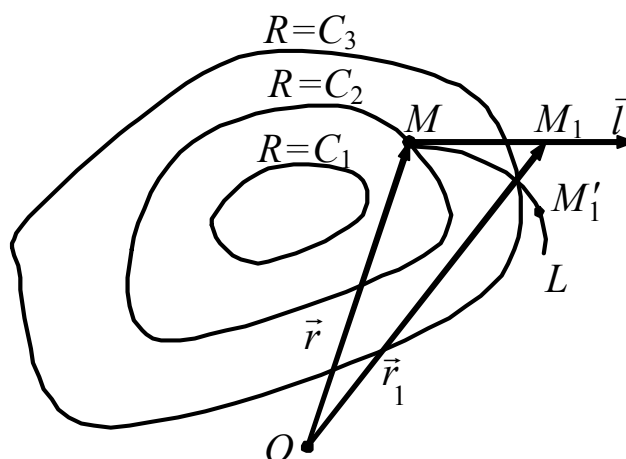


Рис. 2. Изолинии значений прочности как линии уровня скалярного поля

Аналитическое представление распределения прочности позволяет определить скорость изменения изучаемой величины в различных направлениях, то есть производные по направлению

$$\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\partial R}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial R}{\partial y} \cos \beta,$$

градиенты, те направления, в которых скорость изменения поля является наибольшей:

$$\text{grad } u = \frac{\partial R}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial R}{\partial y} \vec{j},$$

а также максимальные значения скорости изменения поля

$$\frac{\partial R}{\partial l}_{\max} = |\text{grad } R| = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial y}\right)^2},$$

где  $\frac{\partial R}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial R}{\partial y}$  – частные производные функции  $R=R(x, y)$ .

Таким образом, в каждой точке изолиний значений прочности можно определить направление наибыстрейшего изменения поля, то есть наибыстрейшего изменения прочности. Именно в этих направлениях исследование прочности представляет наибольший интерес. Поэтому следующим этапом исследований является выделение сечения поверхности  $R(x, y)=0$  плоскостью  $y = kx$  ( $k = \text{tg } \theta$ ), где  $k$  – угловой коэффициент прямой, совпадающей с направлением наибольшего по модулю градиента функции  $R=R(x, y)$ . Таких сечений может быть несколько, если рассмотреть последовательность модулей градиентов в различных точках. В каждом из этих сечений двумерная функция распределения прочности  $R=R(x, y)$  вырождается в функцию одной переменной, графиком которой есть линия  $R=R(X)$ . Здесь  $X$  – ось абсцисс в новой системе координат  $XOY$ , повернутой по отношению к начальной системе  $XOY$  на угол  $\theta$ . Данная линия может быть получена и из уравнения  $R=R(x, y)$  при фиксированных значениях одной из координат, и как уравнение регрессии по данным тех точек опробования, которые расположены вдоль выбранного направления. Уравнение линии регрессии в выбранном сечении может быть получено с более высоким коэффициентом корреляции с помощью известного метода наименьших квадратов.

*Аппроксимация функции методом наименьших квадратов.* Предположим, что между величинами  $x$  и  $y$  существует функциональная зависимость, но ее аналитический вид неизвестен, тогда возникает практически важная задача – найти эмпирическую формулу

$$y = f(x; a_1, a_2, \dots, a_m), \quad (2)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_m$  – параметры, значения которых при  $x = x_i$  мало отличаются от опытных значений  $y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Обычно указывают класс функций (например, множество линейных, степенных, показательных и т.п.) из которого выбирается функция  $f(x)$  и далее определяются наилучшие значения параметров.

Если в эмпирическую формулу (2) подставить исходные  $x_i$ , то получим теоретические значения  $y_i^T = f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m)$ , где  $i = 1, 2, \dots, n$ . Разности  $y_i^T - y_i$  называются отклонениями и представляют собой расстояния по вертикали от точек  $M_i$  до графика эмпирической функции.

Согласно методу наименьших квадратов наилучшими коэффициентами  $a_1, a_2, \dots, a_m$  считаются те, для которых сумма квадратов отклонений найденной эмпирической функции от заданных значений функции

$$S(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) - y_i]^2 \quad (3)$$

будет минимальной.

Построение эмпирической формулы состоит из двух этапов: выяснение общего вида этой формулы и определение ее наилучших параметров.

Если неизвестен характер зависимости между данными величинами  $x$  и  $y$ , то вид эмпирической зависимости является произвольным. Предпочтение отдается простым формулам, обладающим хорошей точностью. Удачный выбор эмпирической формулы в значительной мере зависит от знаний исследователя в предметной области, используя которые он может указать класс функций из теоретических соображений. Большое значение имеет изображение полученных данных в декартовых или в специальных системах координат (полулогарифмической, логарифмической и т.д.). По положению точек можно примерно определить общий вид зависимости путем установления сходства между построенным графиком и образцами известных кривых.

Для того, чтобы найти набор коэффициентов  $a_1, a_2, \dots, a_m$ , которые доставляют минимум функции  $S$ , определяемой формулой (3), используем необходимое условие экстремума функции нескольких переменных - равенство нулю частных производных. В результате получим нормальную систему для определения коэффициентов  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ):

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \dots; \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0. \quad (4)$$

Эта система упрощается, если эмпирическая формула (2) линейна относительно параметров  $a_i$ , тогда система (4) - будет линейной.

Конкретный вид системы (4) зависит от того, из какого класса эмпирических формул мы ищем зависимость (2).

Для проверки согласия построенной кривой с результатами эксперимента определяется коэффициент корреляции.

Коэффициент корреляции является мерой связи между зависимыми случайными величинами: он показывает, насколько хорошо в среднем может быть представлена одна из величин в виде функции от другой. Коэффициент корреляции вычисляется по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (5)$$

где  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ ,  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ ,  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — среднее арифметическое значение соответственно по  $x$  и  $y$ . Коэффициент корреляции между случайными величинами по абсолютной величине не превосходит 1. Чем ближе  $R^2$  к 1, тем теснее линейная связь между  $x$  и  $y$ .

Рассмотрим пример. Исходные данные сведены в таблицу 4.

Таблица 4

$x/y$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20								21	21
2	15	21		26		32		27		
3		24	35						21	
4				32			18	25		34
5		31	31		19					
6	24				23	32		36		32
7				27			26			
8			16	35				28	34	
9		32			27		25		29	
10	25					41				31

Существуют различные методы интерполяции пространственных данных. Необходимость их использования связана с тем, что конкретные экспериментальные данные, как правило, из-за небольшого их объема и варьирования не позволяют провести линии равных концентраций, соединяя между собой экспериментальные точки.

Проведем интерполяцию с использованием метода Кригинга. Это метод интерполяции, который основан на использовании методов математической статистики. В его реализации применяется идея регионализованной переменной, т.е. переменной, которая изменяется от места к месту с некоторой видимой непрерывностью, поэтому не может моделироваться только одним математическим уравнением. Поверхность рассматривается в виде трех независимых величин. Первая - тренд, характеризует изменение поверхности в определенном направлении. Далее предполагается, что имеются небольшие отклонения от общей тенденции, вроде маленьких пиков и впадин, которые являются случайными, но все же связанными друг с другом пространственно. Метод Кригинга включает две основные задачи: установить структуру пространственных дан-

ных, известную как вариография, а затем построить поверхность, используя значения вариограмм и известных измерений в отдельных точках.

Результат интерполяции графически представлен на рис. 3.

Зафиксируем сечение  $y = 5$ . Составим таблицу данных для этого сечения, дополнив известные данные измерений в некоторых точках результатами интерполяции.

$x/y$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	25,6	31	31	26,6	19	23,9	25,9	29,7	32	33,1

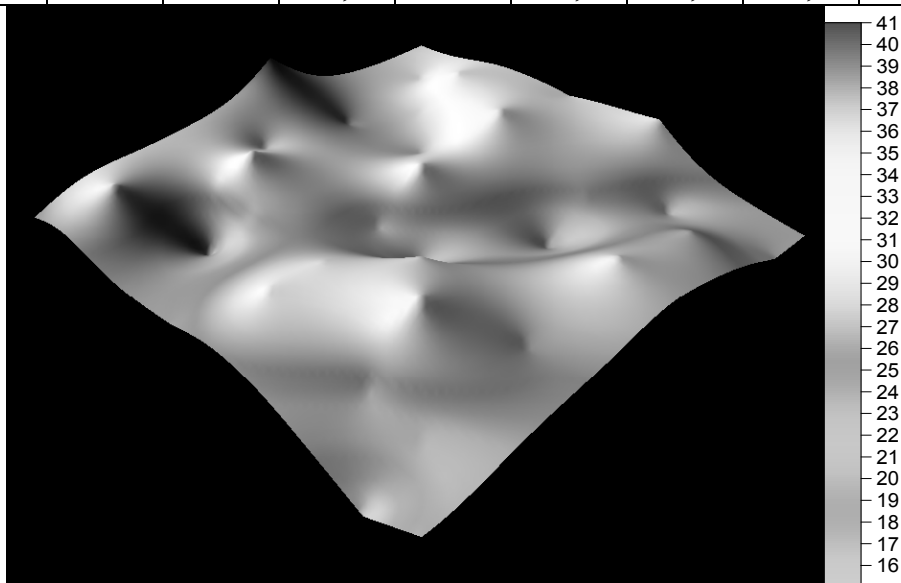


Рис.3. Прочность как функция координат шахтного поля

Используя метод наименьших квадратов, аппроксимируем данную зависимость (рис.4):

$$y = -0,0629x^4 + 1,4434x^3 - 10,78x^2 + 28,986x + 6,05.$$

Коэффициент корреляции составит:  $R^2 = 0,874$ .

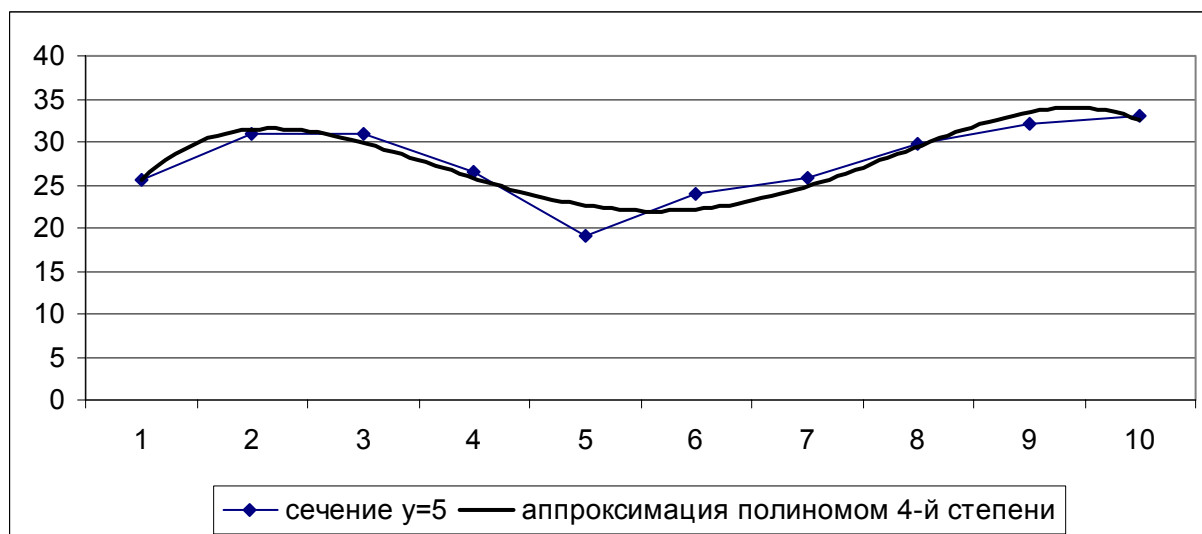


Рис.4. Аппроксимация данных сечения  $y = 5$



*Последовательность построения модели и прогноза прочности вмещающих пород в пределах шахтного поля:*

1. По каждой скважине заполняется таблица 1.
2. Для каждой литологической разности строится график распределения прочности как поверхность  $R(x,y)$  (рис.3).
3. Определяются изолинии значений предела прочности.
4. Определяются градиенты полученного поля в характерных точках и их модули (максимальная скорость изменения поля и направление, в котором это изменение имеет место).
5. В направлении наибольшего изменения прочности осуществляется сечение поля  $R = R(x,y)$  соответствующей плоскостью.
6. В плоском сечении осуществляется наиболее точная аппроксимация эмпирических данных.
7. На основе полученного аппроксимирующего выражения для изменения прочности в заданном направлении выполняется прогноз прочностных свойств на участках, не охваченных сетью разведочных скважин.

**Выводы.** Разработан алгоритм прогноза прочностных свойств углевмещающих пород в пределах шахтного поля на основе представления прочностной характеристики горных пород как функции координат точки шахтного поля. Такая функция представляет собой результат экстраполяции имеющихся данных о величине исследуемой характеристики в нескольких точках опробования.

#### Список литературы

1. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. – М.: Наука, 1983.
2. Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTICA – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Информационно-издательский дом "Филинь", 1998.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1999.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Шашенком О.М.  
Надійшла до редакції 25.03.10*

УДК 622.257.1

© П.Н. Должиков, А.А. Шубин, Д.В.Корсаков

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОВАЛА НАД ГОРНОЙ ВЫРАБОТКОЙ**

Показаны основные этапы формирования провала гидроактивизированной зоны массива  
Показані основні етапи формування провалу гідроактивізованої зони масиву  
The basic stages of forming of failure of the water-saturated rock are rotined

Основная цель моделирования провала гидроактивизированной зоны в породном массиве – изучить экспериментально процесс деформации песчано-глинистого грунта и установить закономерность влияния гидроактивизации на