

Раздел 2. Прогнозирование и управление состоянием горного массива

УДК 622.268.1

И.В. Антипов, Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко

ВЫБОР МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И УСТАНОВЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ЛАВЫ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Обоснована возможность использования метода группового учета аргументов (МГУА) для установления зависимости размера зоны деформирования подготовительной выработки от длины лавы. Впервые установлено, что рациональная длина лавы составляет около 260 м при наличии в кровле мощных (10–30 м) слоев крепкой породы.

Высокая производительность передовых шахт Донбасса обеспечивается за счет повышения скорости подвигания очистных забоев и увеличения длины лав. Большая скорость подвигания во многих случаях препятствует резким сдвигениям и обрушениям пород в призабойном пространстве, что способствует сокращению простоев очистных забоев до минимума. Это требует определенной организации труда, обеспечивающей стабильную скорость подвигания лавы при отработке всего выемочного поля. Увеличение длины лавы снижает удельный вес подготовительных работ в процессе добычи угля, в результате чего снижается себестоимость. Однако с увеличением длины лавы до 300–350 м увеличивается число породных слоев, приходящих в сдвигение над выработанным пространством, что приводит к увеличению опорного давления, росту зон сдвигения пород и деформирования подготовительных выработок впереди очистного забоя.

При выборе рациональной длины лавы необходимо учитывать множество геологических, технических, технологических и др. факторов, влияющих на работу очистного забоя. Для решения таких задач используются методы математического моделирования.

Математические модели по своему назначению делятся на три группы: функциональные (детерминированные), модели для управления и модели для прогнозирования.

Функциональные модели используются для решения задач, в которых известна функциональная связь между элементами исследуемой системы. Для разработки этих моделей применяются методы нелинейного моделирования. Функциональные модели, как правило, структурно сложные, трудные для понимания и применения. Формализовать технологические

процессы в очистных забоях как систему взаимосвязанных процессов и операций с помощью функциональных моделей не представляется возможным.

В решении задач управления могут применяться модели, которые содержат факторы, подконтрольные исследователю. Для получения управляющих моделей используются методы множественной регрессии, если возможно планирование экспериментов для управляемых переменных [1, 2]. Однако в условиях действующего промышленного производства, особенно угледобывающей промышленности, поставить такой эксперимент очень сложно.

Прогнозирующая модель не всегда функциональна и пригодна для управления, хотя другая возможность не исключается. Такая модель хоть и менее реалистична, но все же воспроизводит основные черты и характер поведения исследуемой системы. Прогнозирующая модель позволяет наиболее точно предсказать поведение объекта при изменении влияющих факторов в значительных пределах.

Наиболее распространенным методом получения математических моделей является множественная регрессия [3, 4]. Однако жесткие количественные и качественные требования к исходным данным для корректного применения регрессионного анализа несколько ограничивают область его применения. Кроме нормального распределения факторов и значительного превалирования объема наблюдений над количеством аргументов (10–12 раз), к таким требованиям относятся: стохастическая независимость результатов наблюдений и пропорциональность величины условной дисперсии зависимой переменной некоторой известной функции. Наличие этих и ряда других требований к корректному использованию множественной регрессии не позволяет использовать ее для решения многофакторных задач в условиях дефицита информации – задач моделирования производственных процессов.

Кроме того, известные методы математического моделирования основываются на следующем принципе: чем больше переменных содержит модель и чем она сложнее, тем точнее описывает действительность. Поэтому для получения наиболее точного результата структура модели искусственно усложняется, перегружается малоинформированными аргументами. Но для работы с более простой моделью мы удаляем из нее часть факторов, сохраняя точность результатов в заданных пределах с помощью методов факторного, дисперсионного анализа и др. Намного эффективнее было бы сразу получать модель оптимальной сложности путем отсева малоинформированных факторов в процессе формирования модели.

Существенным недостатком некоторых методов математического моделирования является низкая помехозащищенность, что приводит к появлению теории планирования экспериментов. При разработке моделей используется

только один, внутренний критерий оценки точности. Внешние критерии отсутствуют. Поэтому в применении множественной регрессии для обработки зашумленных исходных данных, которыми являются результаты шахтных наблюдений, математические модели имеют невысокую точность – отклонения в поле исходных данных достигают 30–40%.

Достоверность и устойчивость математических моделей существенно повышается при использовании метода группового учета аргументов (МГУА) [5].

Алгоритмы МГУА реализуют принципы самоорганизации сложных систем [6–8]. Согласно этим принципам при постепенном усложнении структуры модели значение внешнего критерия сначала уменьшается, а затем возрастает, проходя при этом через минимум, определяющий модель оптимальной сложности и максимальной точности. Поскольку аналитическая зависимость величины критерия от сложности модели неизвестна, задача поиска минимума критерия решается методом математической индукции при помощи целенаправленного перебора многих моделей-претендентов.

Однорядные алгоритмы МГУА предназначены для решения определенных и переопределенных задач, когда количество наблюдений значительно превышает число аргументов. Многорядные алгоритмы применяются для решения недоопределенных задач моделирования [9] при наличии несоответствия между объемом имеющейся информации и количеством моделируемых факторов.

В алгоритмах МГУА используются следующие виды опорных функций: линейные уравнения, полиномы с ковариациями переменных и квадратичные зависимости. Другие алгоритмы МГУА – с последовательным выделением трендов, с мультипликативными моделями, со случайным выбором партнеров, а также обобщенные алгоритмы [10], применяемые в основном для решения кибернетических задач.

В зависимости от назначения будущей модели используются критерии регулярности, несмещенности и баланса переменных [11]. Возможно также последовательное или комбинированное применение нескольких критериев.

Сравнительные исследования [12, 13] показали, что метод группового учета аргументов, основанный на самоорганизации моделей и определении структуры модели оптимальной сложности, и имеющий высокую помехозащищенность за счет применения внешних критериев селекции, позволяет получать наиболее простые и точные модели при решении многофакторных задач в условиях дефицита наблюдений и высокой зашумленности исходных данных шахтного эксперимента. Поэтому для установления зависимости длины лавы от комплекса влияющих факторов целесообразно использовать этот метод формализации зависимостей.

Сравнительный анализ методов восстановления зависимостей показал, что при обработке результатов шахтных инструментальных наблю-

дений точность результатов значительно повышается, если использовать метод группового учёта аргументов [14]. Алгоритмы МГУА, виды опорных полиномов и критерии оценки точности результатов подробно изложены в работах [5–12], поэтому далее будут приведены только некоторые особенности алгоритма, применяемого для восстановления зависимости длины лавы от размера зоны деформаций выработки впереди очистного забоя.

В качестве исходных данных принимаются результаты показателей работы добычных участков и шахтных инструментальных наблюдений. Среднемесячная скорость подвигания v и длина лавы m определялись по плану горных выработок пласта d_4 шахты «Красноармейская–Западная №1». Непосредственная кровля пласта d_4 в пределах шахтного поля изменяется от алевролитов мощностью 1,5–8,2 м до песчаников мощностью 4,0–33,0 м. Основная кровля представлена песчаником и алевролитом.

Размер зоны деформаций выработки впереди лавы $l_{з.д.}$ и максимальное изменение высоты выработки k вычислялись по результатам замеров деформирования выработок (рис. 1). Высота выработки измерялась жесткой маркшейдерской лентой.

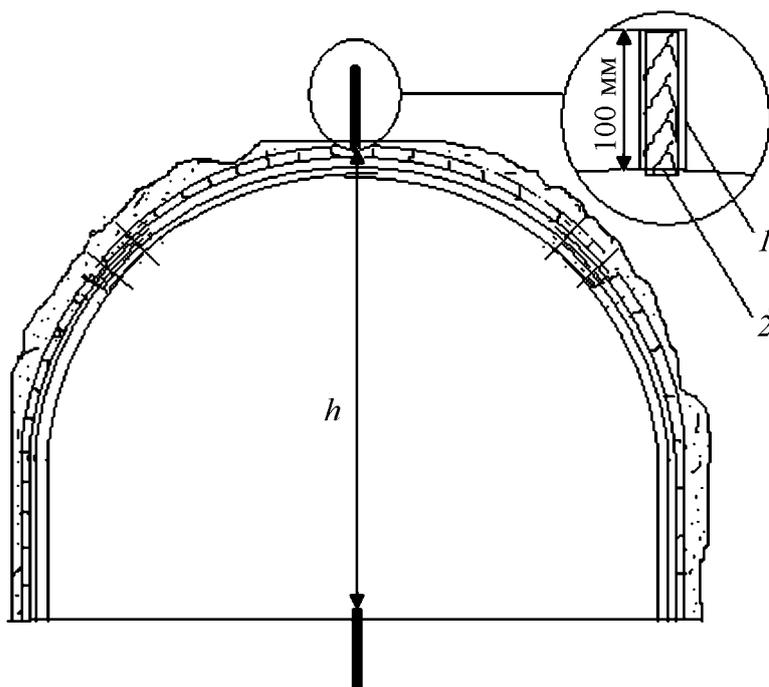


Рис. 1. Схема измерения деформирования выработок

Исходные данные представляют собой массив аргументов и факторов:

$$L_{з.д.} = f(v, m, k), \quad (1)$$

где $l_{з.д.}$ – размер зоны деформаций выработки впереди лавы, м; v – скорость подвигания лавы, м/мес.; m – длина лавы, м; $k = h_i/h_0$ – максимальное изменение высоты выработки; h_0 и h_i – начальный и последующие измерения высоты выработки соответственно.

Таблица 1

Исходные данные для формализации зависимости длины лавы от влияющих факторов

№	Лава	$L_{э.л.}$	v	m	$k = h_{д}/h_0$	h_0	$h_{д}$
1	1 северная лава бл. № 5	36	41,7	240	0,95	3,15	2,99
2	6 северная лава бл. № 2	19	25,7	300	0,897	3,20	2,87
3	2 северная лава Ц.П.	30	36,1	230	0,915	3,18	2,91
4	4 южная лава Ц.П. бл. № 8	74	120,6	273	0,987	3,21	3,17
5	1 северная лава бл. № 2	79	113,5	145	0,975	3,19	3,11
6	1 северная лава бл. № 4	91	180,3	160	0,991	3,26	3,23
7	8 южная лава бл. № 2	90	153,3	150	0,989	3,24	3,20
8	8 северная лава Ц.П. бл. № 8	77	117,5	300	0,971	3,16	3,07
9	2 северная лава Ц.П. бл. № 8	68	103,2	232	0,958	3,11	2,98
10	5 южная лава бл. № 2	53	77,3	300	0,985	3,22	3,17
	Средние значения	62	97	233	0,96	3,19	3,06

Массивы аргументов и факторов нормируются относительно средних значений [11]:

$$l_{ni} = \frac{l_i - L}{L}; \quad x_{jn,i} = \frac{x_{ji} - X_j}{X_j}, \quad (2)$$

где i – количество наблюдений (отчетов); j – количество факторов (аргументов); l_{ni} – нормированные значения функции; $x_{jn,i}$ – нормированные значения аргументов; X_j – среднее значение j -го фактора; L – среднее значение функции.

Массив исходных данных разделяется на обучающую и проверочную последовательности. При этом длина проверочной последовательности составляет около 1/3 от общего объема наблюдений. Отбор данных в проверочную последовательность выполняется по критерию, приведенному в работе [12].

По данным обучающей последовательности формируются $2n(n - 1)$ систем уравнений вида [11]:

$$\begin{cases} L_a = A_0 + A_1 X_{ai} + A_2 X_{aj} + A_3 X_{ai} X_{aj} \\ L_b = A_0 + A_1 X_{bi} + A_2 X_{bj} + A_3 X_{bi} X_{bj} \\ L_c = A_0 + A_1 X_{ci} + A_2 X_{cj} + A_3 X_{ci} X_{cj} \\ L_d = A_0 + A_1 X_{di} + A_2 X_{dj} + A_3 X_{di} X_{dj} \end{cases}, \quad (3)$$

где a, b, c, d - номера отчетов обучающей последовательности.

Решение систем линейных уравнений (3) выполняется методом Крамера, поскольку этот метод наиболее приемлем для расчета на ЭВМ. При этом определяются коэффициенты A_0, A_1, A_2, A_3 и формируются $2n(n-1)$ полиномов вида:

$$L_k = A_0 + A_1 X_i + A_2 X_j + A_3 X_i X_j. \quad (4)$$

Для каждого полинома вычисляются значения критерия регулярности S_k (внешний критерий) и несмещенности $N_{см}$ (внутренний критерий) [12]:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L_k)^2}{n}; \quad N_{см} = \frac{\sum_{i=1}^f (L_{iо} - L_{iп})}{\sum_{i=1}^f L_i}, \quad (5)$$

где $L_{iо}$, $L_{iп}$ - значения функции, вычисленные на обучающей и проверочной последовательностях.

Полиномы (4) ранжируются по величине критерия регулярности (5) и из них выбираются полиномы, которые имеют меньшее значение S_k .

С помощью этого алгоритма была установлена следующая зависимость:

$$l_{з.д.} = 14131,4 \cdot \frac{k^5}{v^2} - 3160,37 \cdot \frac{k^4}{v} + 22,6802 \cdot \frac{k^3 \cdot v}{m} + 1,32438 \cdot 10^{-18} \cdot m^5 \cdot v^3 + 84,5721. \quad (6)$$

Проверка установленной зависимости (6) показала, что в поле исходных данных погрешность не превышает 10% (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчета точности модели в поле исходных данных

№	$l_{з.д.ф}$ фактическое	$l_{з.д.р}$ расчетное	$\Delta = l_{з.д.ф} - l_{з.д.р}$	Δ , %
1	36	32,59	3,41	9,48
2	19	18,84	0,16	0,83
3	30	32,93	-2,93	-9,77
4	74	73,77	0,23	0,31
5	79	76,95	2,05	2,59
6	91	93,77	-2,77	-3,04
7	90	88,20	1,80	1,99
8	77	74,90	2,10	2,73
9	68	69,70	-1,70	-2,49
10	53	55,35	-2,35	-4,43

Зависимость (6) является многофакторной, поэтому невозможно воспользоваться известными процедурами математического анализа для исследования этой функции. Зафиксировав переменные v и k на уровне средних значений, а именно $v = 97$ и $k = 0,96$, получим следующее уравнение:

$$l_{з.д.} = 1,2 \cdot 10^{-12} \cdot m^5 + \frac{1947}{m} + 58,1. \quad (7)$$

Минимум функции (7) находится в районе $m \approx 260$ м (рис. 2).

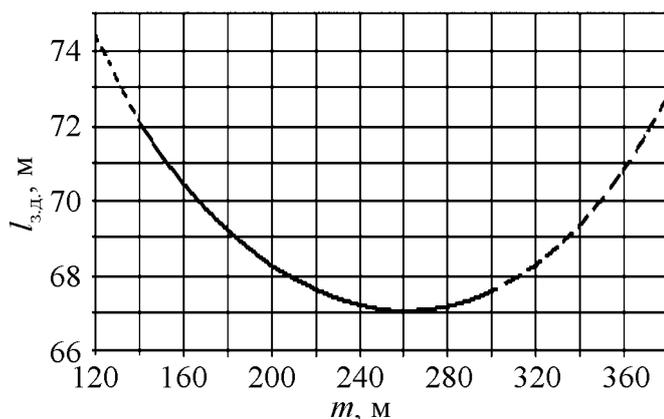


Рис. 2. Зависимость размера зоны деформаций подготовительной выработки ($I_{з.д.}$) от длины лавы (m)

Таким образом, на основании шахтных экспериментальных данных установлена многофакторная зависимость размеров зоны деформаций горного массива от длины, скорости подвигания очистного забоя и изменения высоты горных выработок. При этом установлено, что рациональная длина лавы составляет около 260 м при наличии в кровле пласта мощных (10–30 м) слоев прочной породы.

1. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
2. Тимошенко Г.М. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – Донецк: ДПИ, 1984. – 60 с.
3. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ [Текст] / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 2 т.
4. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичной обработки данных [Текст] / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
5. Ивахненко А.Г. Метод группового учета аргументов в задачах прогнозирования [Текст] / Ивахненко А.Г. // Автоматика. – 1976. – № 6. – С. 24–34.
6. Юрачковский Ю.П. Восстановление полиномиальных зависимостей на основе самоорганизации [Текст] / Юрачковский Ю.П. // Автоматика. – 1981. – № 4. – С. 15–20.
7. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации сложных систем [Текст] / А.Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с.
8. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей [Текст] / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер. – К.: Техника; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник, 1984. – 223 с.
9. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным [Текст] / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
10. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования [Текст] / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашков. – К.: Наукова думка, 1985. – 216 с.

11. Антипов И.В. Моделирование надежности технологических процессов методом группового учета аргументов [Текст] / Антипов И.В., Корнеев М.В. // Теория и практика проектирования, строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников. – М., 1990. – С. 202–203.
12. Антипов И.В. Моделирование производственных процессов методом группового учета аргументов [Текст] / Антипов И.В., Шкуматов А.Н. // Проблемы экологии. – Общегосударственный научно-технический журнал. – 2000. – № 1. – С. 5–9.
13. Антипов И.В. Принятие решений в условиях многокритериального выбора [Текст] / Антипов И.В., Демин В.Н. // Менеджер. – Научный журнал ДГАУ. – 1999. – № 1. – С. 9–13.
14. Антипов И.В. Стратегия и критерии принятия решений [Текст] / Антипов И.В. // Проблемы экологии. – Общегосударственный научно-технический журнал. – 1999. – № 1. – С. 70–75.

І.В. Антипов, М.І. Лобков, О.І. Сергієнко

ВИБІР МЕТОДУ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ДОВЖИНИ ЛАВИ

Обґрунтовано можливість використання методу групового обліку аргументів (МГОА) для встановлення залежності розміру зони деформування підготовчої виробки від довжини лави. Вперше встановлено, що раціональна довжина лави становить близько 260 м при наявності в покрівлі потужних (10–30 м) шарів міцної породи.

I.V. Antypov, N.I. Lobkov, A.I. Sergienko

SELECTION OF MATHEMATICAL MODELING METHOD AND ASCERTAINMENT OF THE RATIONAL LONGWALL LENGTH

Possible using of the Group Method of Data Handling (GMDH) for ascertaining dependence of the deformation zone size around a development excavation on the longwall length is substantiated. It is first established that the rational longwall length is about 260 meters if there is strong enough rock beds in roof (10–30 m).