

И.В. Антипов, И.А. Турбор

ПРИМЕНЕНИЕ МГУА ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И ОПЕРАЦИЙ В ОЧИСТНЫХ ЗАБОЯХ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Выполнена структуризация затрат времени на выполнение процессов и операций очистного цикла в комплексно-механизированном очистном забое. Описан алгоритм МГУА как метод индуктивного моделирования. Получена математическая модель производительности лавы от затрат времени на выполнение штатных операций очистного цикла.

С позиций системного подхода комплексно-механизированные технологии выемки угля рассматриваются как совокупность взаимосвязанных производственных процессов и операций в очистном забое [1]. Поэтому для формализации производственных процессов в лаве необходимо структурировать затраты времени на выполнение процессов и операций очистного цикла. Продолжительность производственных процессов и операций обуславливается совокупностью производительных и непроизводительных затрат времени, т.е. предусмотренных и не предусмотренных технологическим паспортом. Продолжительность технологических процессов и операций – только производительные затраты времени на процессы и операции, предусмотренные технологическим паспортом и программой ведения очистных работ в лаве.

Ведение очистных работ с применением механизированных комплексов предусматривает выполнение технологических (штатных) процессов и операций, которые условно можно разделить на три группы [2]:

- 1) выемка угля комбайном, механизированная зачистка угля при односторонней схеме работы комбайна, передвижка секций механизированной крепи и забойного конвейера;
- 2) концевые операции: передвижка головок конвейера, профилактический осмотр оборудования и др.;
- 3) прочие затраты времени: прием-сдача смены, буровзрывные работы, противовыбросные мероприятия и др.

Особую категорию производственных операций составляют нештатные – обусловленные необходимостью устранения отказов [3]. Продолжительность выполнения нештатных операций определяется временем простоев по внутривалным причинам. Отдельную группу непроизводительных затрат времени (простоев) составляют остановки по внелавным причинам, зависящим от общешахтного и участкового транспорта, перебоев в снабжении электроэнергией, запрещения работ из-за нарушения ПБ и др.

Нештатные операции в зависимости от вызывающих их причин делятся на следующие группы:

- непроизводительные затраты времени в процессе выемки угля;
- непроизводительные затраты времени в процессе транспортирования угля к подготовительной выработке;
- непроизводительные затраты времени в процессе крепления и управления кровлей;

– непроизводительные затраты времени при выполнении концевых операций, проведения противовыбросных мероприятий, буровзрывных работ, упрочнения пород и др.

Структура затрат времени выполнения производственных процессов и операций в комплексно-механизированном очистном забое представлена в табл. 1.

Таблица 1

Структура затрат времени на выполнение производственных процессов и операций в очистном забое

Производственные процессы и операции в очистном забое			Обозначения
Категории		Группы	
Производительные затраты времени	Работоспособное состояние очистного забоя (штатные технологические процессы и операции)	Выемка, зачистка и транспортирование угля, крепление и управление кровлей	t_1
		Концевые операции	t_2
		Прочие процессы и операции	t_3
Непроизводительные затраты времени	Неработоспособное состояние очистного забоя, или простои по внутрилавным причинам в технологическом процессе (нештатные операции)	Выемка угля (комбайн)	t_4
		Транспортирование угля (конвейер)	t_5
		Крепление и управление кровлей (механизированная крепь)	t_6
		Горно-геологические причины	t_7
		Прочие внутрилавные причины	t_8
	Простои по внелавным причинам	Транспорт	t_9
		Энергоснабжение	t_{10}
		Прочие внелавные простои	t_{11}

Комплексно-механизированная выемка угля, как и любая технология, характеризуется определенной цикличностью выполнения процессов и операций во времени.

Выемка угля комбайном осуществляется одновременно с передвижкой секций механизированной крепи и става конвейера. Исключение составляют технологии, предусматривающие одностороннюю схему работы комбайна или фронтальную передвижку конвейера. В этом случае процессы не совмещаются во времени. Концевые операции предусматривают передвижку головок конвейера, профилактический осмотр и мелкий ремонт комбайна и др. К прочим производственным затратам времени относятся концевые операции, буровзрывные работы, мероприятия по дегазации, упрочнению пород и др.

Рассмотрение технологии очистных работ как взаимосвязанной системы (совокупности) процессов и операций добычи угля позволяет формализовать зависимости надежности и производительности комплексно-механизированных технологий от продолжительности производственных процессов и операций. Математические модели системы "очистные работы" позволяют установить закономерности формирования надежности и производительности комплексно-механизированных технологий добычи угля.

Шахтные хронометражные наблюдения, выполняемые непосредственно в очистных забоях, позволяют получить наиболее точные данные о продолжительности выполнения

штатных и нештатных процессов и операций. Однако, проведение хронометражных наблюдений требует значительных непроизводительных трудовых затрат от группы наблюдателей, которые должны выполнять непрерывные наблюдения в течение определенного периода. Продолжительность наблюдений определяется методами теории планирования экспериментов [4, 5]. При этом задается желаемая точность результатов, от которой зависит минимальная продолжительность наблюдений с учетом точности каждого отчета о наблюдениях. Чем меньше точность отдельных отчетов, тем продолжительнее будет период наблюдений для получения результатов с заданной точностью. При проведении непрерывных хронометражных наблюдений группой наблюдателей непосредственно в очистном забое минимальный срок наблюдений меньше, чем при использовании в качестве исходных данных отчетов горных мастеров добычных участков, которые фиксируются дежурным по шахте в диспетчерском журнале.

В качестве исходных данных приняты затраты времени при отработке 1-й северной лавы блока 3 пласта d_4 ш/у "Покровское", зафиксированные в диспетчерском журнале с марта по октябрь 2008 г.

Длина выемочного столба – 978 м, длина 1-й северной лавы блока 3 – 256 м, промышленные запасы угля – 472 тыс. тонн.

Угольный пласт d_4 имеет сложное строение, по площади выемочного столба его мощность составляла 1,3–1,76 м.

Выемка угля велась столбовой системой разработки по простиранию обратным ходом с помощью механизированного комплекса в составе выемочного комбайна МВ-12(450Е), механизированной крепи ЗКД-90Т и скребкового конвейера СПЦ-230. Отбитый уголь из лавы перегружался на скребковый конвейер PZF-05/800 и далее транспортировался по 1-му северному конвейерному штреку бл. 5 ленточным конвейером 2ЛТ-100У. Схема лавы представлена на рис. 1.

Всего	46	31	28	31	136	
-------	----	----	----	----	-----	--

Выемка угля осуществлялась комбайном по челноковой схеме и самозарубкой косыми заездами на конечных участках лавы. Верхняя приводная головка конвейера располагалась в лаве, а нижняя приводная головка конвейера вынесена на штрек. На сопряжениях лавы со штреками вынимались ниши длиной 2,7 и 1,5 м (рис. 1). Для охраны подготовительных выработок устанавливалась органная крепь. На рис. 2 представлена планограмма работ в лаве.

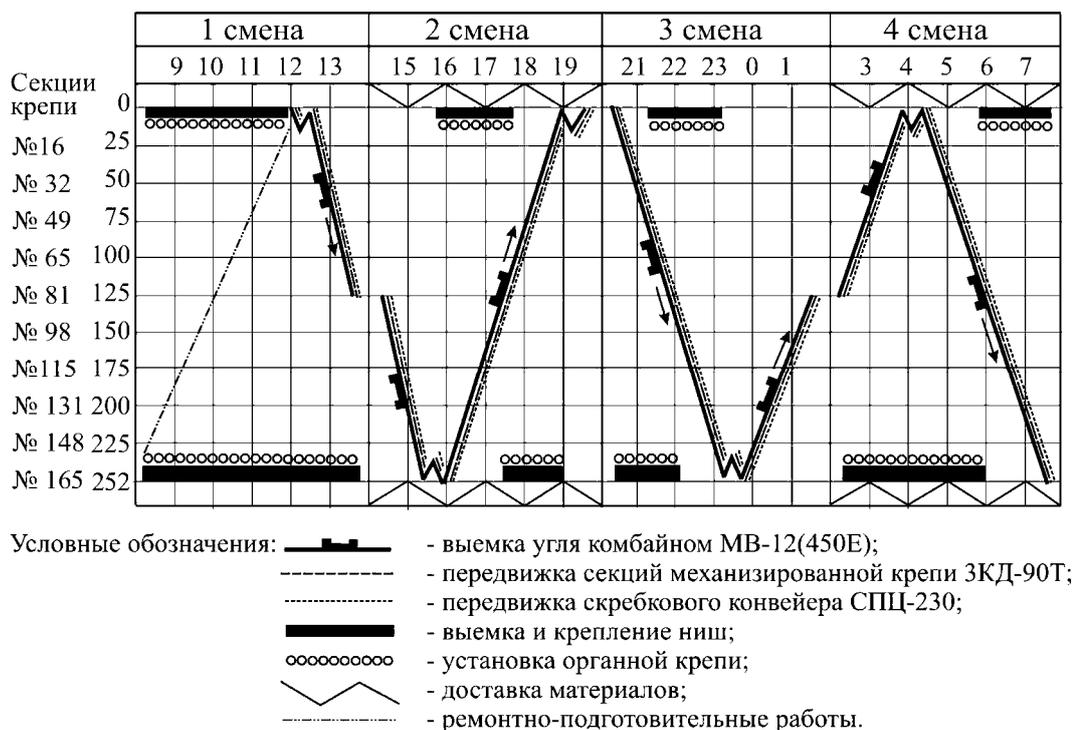


Рис. 2. Планограмма работ в 1-й северной лаве блока 3 пласта d_4 ш/у "Покровское"

Среднемесячная добыча угля составила 99317 т, среднесуточная – 3267 т, подвигание забоя лавы – 4 м/сут. Общее количество наблюдений (записей в диспетчерском журнале) составило 335 записей.

Исходные данные сформированы в виде таблицы, где в строках представлены суточные результаты наблюдений, а в столбцах – затраты времени на выполнение штатных и нештатных процессов и операций очистного цикла, а также фактическая суточная добыча угля (табл. 3).

Таблица 3

Структура исходных данных

№	Время работоспособного состояния, мин.	Выемка угля комбайном, мин.	Передвижка скребкового конвейера, мин.	Передвижка секций механизированной крепи, мин.	Горно-геологические причины, мин.	Прочие внутрилавные простои, мин.	Общешахтный и участковый транспорт	Энергоснабжение, мин.	Прочие внелавные причины, мин.	Объем суточной добычи угля, т
№	$t_1+t_2+t_3$	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	Q

1	960	120	0	0	30	0	90	0	0	3300
2	990	0	30	150	0	0	0	0	30	3400
3	1050	30	0	60	0	30	0	30	0	3500
...
333	930	60	0	210	0	0	0	0	0	3200
334	960	0	60	0	60	0	120	0	0	3300
335	900	60	0	240	0	0	0	0	0	3100

Суть задачи формализации производственных процессов и операций состоит в восстановлении зависимости производительности очистного забоя от затрат времени на выполнение нештатных операций очистного цикла, т.е. в установлении зависимости вида:

$$Q = f(t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}, t_{11}).$$

Традиционные методы множественной регрессии не позволяют получить зависимость с максимальной ошибкой в поле исходных данных до 5%, что обусловлено высокой зашумленностью шахтных исходных данных. Наилучшие результаты при решении подобных задач достигаются с применением индуктивного моделирования.

В 1968 году была опубликована статья Ивахненко А.Г. [6], которая положила начало новому научному направлению – индуктивная самоорганизация моделей по экспериментальным данным, или индуктивное моделирование.

Разработанный академиком НАН Украины Алексеем Григорьевичем Ивахненко (1913–2007 гг) метод группового учета аргументов (МГУА) является одним из наиболее эффективных методов структурно-параметрической идентификации сложных объектов, процессов и систем по данным наблюдений в условиях неполноты информации и зашумленности исходных данных [6–11].

МГУА основан на создании и выборе регрессионных моделей оптимальной сложности и максимальной точности. Под сложностью модели в МГУА понимается количество факторов, входящих в результирующую модель. Точность модели обуславливается соответствием вычисленных по ней параметров их значениям в поле исходных данных. Для создания модели используется опорная функция, подмножество элементов которой входит в результирующую модель. Для выбора моделей используются внутренние и внешние критерии селекции, специальные функционалы точности моделей, вычисленные на проверочной выборке (последовательности).

МГУА используется в том случае, когда выборка содержит несколько факторов и при построении регрессионных моделей невозможно использовать статистические гипотезы о плотности распределения, например, гипотезу о Гауссовском распределении [12]. Поэтому в МГУА используется индуктивный подход, согласно которому последовательно синтезируются модели возрастающей сложности до тех пор, пока не будет найден минимум критерия точности модели. Такой критерий точности в МГУА называется внешним критерием селекции, так как при селекции моделей и при оценке их точности используются разные данные на обучающей и проверочной последовательностях (выборках). Достижение глобального минимума внешнего критерия при селекции означает, что модель, достигающая такого минимума, является искомой. Эта модель характеризуется максимальной точностью и оптимальной сложностью. Т.е. осуществляется целенаправленный перебор многих моделей-претендентов различной сложности по ряду критериев. В результате находится модель оптимальной структуры и максимальной сложности в виде одного уравнения или системы уравнений.

МГУА обладает разнообразными возможностями на всех этапах процесса моделирования по сравнению с другими методами построения моделей. Это касается,

прежде всего, генераторов моделей и применяемых критериев точности структур, а также классов моделей. Метод отличается применением принципов автоматической генерации вариантов, последовательной селекции моделей и внешних критериев для построения моделей оптимальной сложности и максимальной точности. Он реализует уникальную многорядную процедуру автоматической генерации структур моделей, имитирующую процесс биологической селекции с попарным учетом последовательных признаков [14]. Такая процедура в современной терминологии называется полиномиальной нейронной сетью, причем ее структура является явной и строится автоматически, в режиме самоорганизации.

Для сравнения и выбора лучших моделей применяются критерии, основанные на разделении выборки на две и более частей, причем оценивание параметров и проверка точности моделей выполняется на разных подвыборках – обучающей и проверочной последовательностях. Это позволяет обойтись без априорных предположений о структуре результирующей модели, поскольку разделение выборки позволяет неявно, т.е. автоматически учесть различные виды априорной неопределенности при построении модели. МГУА обладает преимуществом при малых выборках данных за счет выбора сложности модели, оптимально учитывающей недостаточную информативность и зашумленность исходных данных.

Эффективность МГУА многократно подтверждалась решением конкретных практических задач в разных областях экономики [15-18], сельского хозяйства [19, 20], проектирования водных объектов [21], прогноза солнечной активности [22], метеорологии [23], для предсказания активности химических соединений в нейросетях [24], моделирования экологических систем [25-27], в медицине [28] и др. Особое место занимают задачи идентификации и формализации технологических процессов [29], в том числе в ткацком производстве [30], трубопрокатке [31], нефтехимии и нефтепереработке [32], строительно-монтажных работах [33] и др.

С середины 80-х годов прошлого века МГУА применяется для решения проблем горного производства: планирования горнопроходческих работ [34], моделирования и формализации производственных процессов [35], в том числе в очистных забоях [36, 36], оценки надежности технологических процессов и горнодобывающих технологий [37, 38], определения параметров системы разработки, в частности длины лавы [39], физико-технического обоснования параметров высокопроизводительных угледобывающих комплексов нового поколения [40], формализации процессов конвергенции вмещающих пород в очистных забоях [41, 42] и др.

В 1999 г. с помощью МГУА были установлены новые закономерности поведения боковых пород в лавах, которые позволили впервые в мировой практике описать процессы ускорения конвергенции вмещающих пород [43] и разработать новые технические и технологические решения для повышения эффективности ведения очистных работ.

Таким образом, МГУА как основной инструмент теории индуктивного моделирования является современным вычислительным методом. Этот метод является уникальным и эффективным средством решения широкого спектра задач, в том числе идентификации и прогнозирования, распознавания образов и кластеризации, интеллектуального анализа данных и поиска закономерностей.

Подход индуктивного моделирования академика Ивахненко А.Г., построенный на принципах самоорганизации, развивается более 40 лет и применяется во многих областях науки. В новых разработках для построения моделей на основе данных используются также

эволюционные и генетические алгоритмы, идея активных нейронов, многоуровневая самоорганизация и другие идеи.

Алгоритм формирования модели оптимальной сложности с отсеком малоинформативных факторов на каждом пороге селекции заключается в следующем (рис. 3).

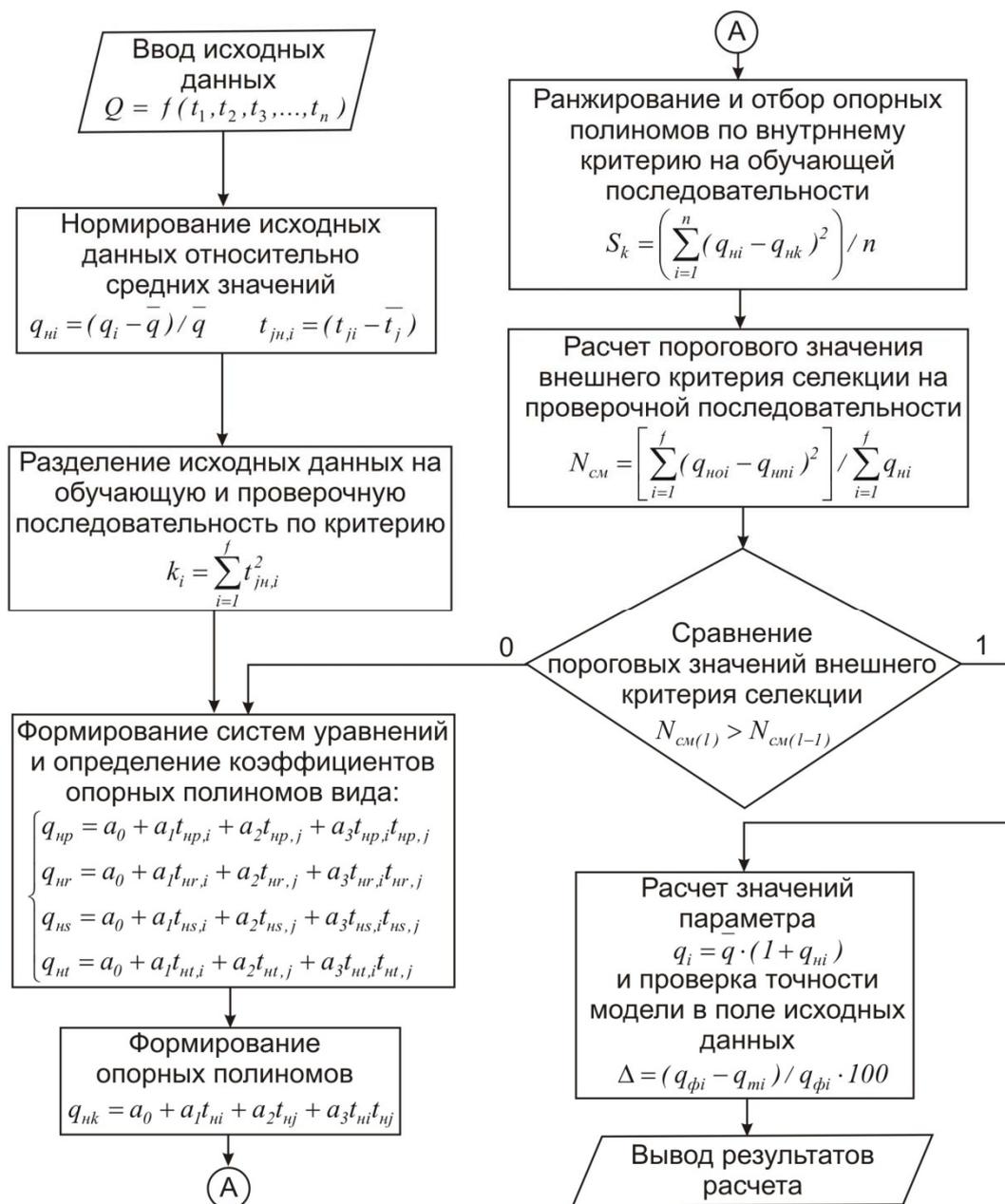


Рис. 3. Алгоритм расчета производительности очистного забоя

Исходные данные представляют собой массив аргументов Q и факторов t (табл. 3):

$$Q = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_n).$$

Исходные данные, находящиеся в массиве аргументов $T(n, f)$ и массиве откликов $Q(n)$, нормируются относительно средних значений:

$$q_{ni} = (q_i - \bar{q}) / \bar{q}; \quad t_{jn,i} = (t_{ji} - \bar{t}_j),$$

где n – количество наблюдений (отчетов); f – количество факторов (аргументов); q_{ni} – нормированные значения функции, т/сут.; $t_{jn,i}$ – нормированные значения аргументов, ч; \bar{q} – среднее значение функции, $\bar{q} = \left(\sum_{i=1}^n q_i \right) / n$, ч; \bar{T}_j – среднее значение j -го фактора,

$$\bar{t}_j = \left(\sum_{i=1}^n t_{ij} \right) / n, \text{ ч.}$$

Затем весь массив исходных данных разделяется на обучающую и проверочную последовательности [44, 45]. При этом длина проверочной последовательности составляет около 38% от общего объема наблюдений, что соответствует правилу "золотого деления" [46].

Данные в проверочную последовательность отбираются по величине критерия

$$k_i = \sum_{i=1}^f t_{jn,i}^2.$$

Проверочная последовательность формируется из отчетов, для которых k_i имеет наименьшее значение. Остальные наблюдения составляют обучающую последовательность.

По данным обучающей последовательности формируются $2n \cdot (n-1)$ систем уравнений вида:

$$\begin{cases} q_{np} = a_0 + a_1 t_{np,i} + a_2 t_{np,j} + a_3 t_{np,i} t_{np,j} \\ q_{nr} = a_0 + a_1 t_{nr,i} + a_2 t_{nr,j} + a_3 t_{nr,i} t_{nr,j} \\ q_{ns} = a_0 + a_1 t_{ns,i} + a_2 t_{ns,j} + a_3 t_{ns,i} t_{ns,j} \\ q_{nt} = a_0 + a_1 t_{nt,i} + a_2 t_{nt,j} + a_3 t_{nt,i} t_{nt,j} \end{cases}, \quad (1)$$

где p, r, s, t – номера отчетов обучающей последовательности.

После решения систем уравнений одним из известных методов (Крамера, Гауса, Зейделя или др.) и определения неизвестных a_0, a_1, a_2 и a_3 формируются $2n \cdot (n-1)$ полиномов вида:

$$q_{nk} = a_0 + a_1 t_{ni} + a_2 t_{nj} + a_3 t_{ni} t_{nj}. \quad (2)$$

Для каждого полинома вычисляются значения критерия S_k [47]:

$$S_k = \left(\sum_{i=1}^n (q_{ni} - q_{nk})^2 \right) / n. \quad (3)$$

Полиномы (2) ранжируются по величине критерия регулярности (3) и из них выбираются первые f полиномов, которые имеют меньшее значение S_k . Критерий регулярности (3) в этом случае является внутренним критерием селекции.

Критерий несмещенности (коэффициент смещения) используется в качестве внешнего критерия [48]:

$$N_{cm} = \left[\sum_{i=1}^f (q_{noi} - q_{nii})^2 \right] / \sum_{i=1}^f q_{nii}, \quad (4)$$

где q_{noi}, q_{nii} – значения функции, вычисленные на обучающей и проверочной последовательностях.

Значение критерия селекции (4), вычисленное на l -том пороге селекции, сравнивается с аналогичным значением предыдущего порога. Если $N_{cm(l)} < N_{cm(l-1)}$, то массив исходных данных $t(n, f)$ заменяется новым массивом, элементами которого становятся коэффициенты лучших полиномов. Далее формируются системы уравнений (1) и расчеты продолжаются на следующем пороге селекции.

Если $N_{cm(l)} > N_{cm(l-1)}$, значит критерий селекции прошел минимальное значение и дальнейшее усложнение структуры модели будет снижать ее точность. В этом случае модель, полученная на $l-1$ пороге, имеет оптимальную сложность и максимальную точность.

Описанный алгоритм реализуется пакетом прикладных программ GAAM. Результаты вычислений сохраняются в текстовом файле и выдаются на экран дисплея.

Для выполнения расчетов по сгенерированной модели, а также для выдачи на печать самой модели в компактном виде разработан программный модуль COUNT. С помощью этой программы осуществляется восстановление полного описания модели (начиная с $l-1$ порога селекции), переход от нормированных значений функции к истинным по формуле $q_i = \bar{q} \cdot (1 + q_{ni})$ и проверяется ее точность в поле исходных данных по величине относительной ошибки $\Delta_i = (q_{\phi i} - q_{mi}) / q_{\phi i} \cdot 100$, %, где $q_{\phi i}$, q_{mi} – фактические и теоретические (вычисленные на модели) значения функции.

С помощью этого алгоритма (рис.3) впервые получена эмпирическая зависимость производительности лавы от затрат времени на выполнение нештатных операций очистного цикла:

$$Q = \frac{1,023 \cdot 10^{-19}}{t_8 \cdot t_9 \cdot t_{10}} + \frac{4,432 \cdot 10^{-12}}{t_6 \cdot t_7} + \frac{6,541 \cdot 10^{-40}}{t_4^3 \cdot t_5 \cdot t_9 \cdot t_{10}} - \frac{1,248 \cdot 10^{-26}}{t_4 \cdot t_8 \cdot t_{10} \cdot t_{11}} - \frac{2,413 \cdot 10^{-31}}{t_4 \cdot t_5 \cdot t_6^2 \cdot t_7 \cdot t_8} - \frac{2,666 \cdot 10^{-26}}{t_5 \cdot t_7 \cdot t_9 \cdot t_{10}} - \frac{7,124 \cdot 10^{-20}}{t_4 \cdot t_9 \cdot t_{10}} - \frac{8,71 \cdot 10^{-26}}{t_6 \cdot t_7 \cdot t_8 \cdot t_9} - \frac{9,692 \cdot 10^{-20}}{t_5 \cdot t_9 \cdot t_{10}} + 3297,1, \quad (5)$$

где Q – производительность очистного забоя, т; $t_4...t_8$ – затраты времени на выполнение нештатных (непроизводительных) процессов и операций в очистном забое, мин.; $t_9...t_{11}$ – простои по внелавным причинам, мин. (табл. 1), $t_i > 0$.

Проверочный расчет показал, что максимальная ошибка в поле исходных данных менее 5% (табл. 4). В этом можно убедиться, подставив в формулу (5) значения факторов из табл. 3.

Таблица 4

Результаты сравнительных расчетов производительности лавы

№	Q, т (фактическое)	Q _p , т (расчетное)	Ошибка	
			Δ=Q-Q _p , т	Δ=[(Q-Q _p)/Q]·100, %
1	3300	3297	3	0,09
2	3400	3328	72	2,11
3	3500	3397	103	2,95
...
333	3200	3096	104	3,25
334	3300	3172	128	3,87
335	3100	3036	64	2,07

Представленный алгоритм математического моделирования производственных процессов с помощью МГУА позволяет на основе хронометражных наблюдений с высокой степенью достоверности определять и прогнозировать значения показателей производительности комплексно-механизированных технологий ведения очистных работ.

Анализ зависимости (5) показал, что по степени влияния на параметр Q факторы можно разделить на четыре группы. В первую группу входят t_6 (непроизводительные затраты времени в процессе крепления и управления кровлей) и t_7 (простои по горно-геологическим причинам), которые оказывают наибольшее воздействие на параметр Q . Во второй группе факторы, которые менее влияют на параметр: t_4 (непроизводительные затраты времени в процессе выемки угля) и t_5 (непроизводительные затраты времени в процессе транспортирования угля в лаве). В третьей группе факторы, влияние которых на параметр Q весьма незначительное: t_8 (прочие внутрилавные простои), t_9 (простои, обусловленные неполадками на участковом и общешахтном транспорте) и t_{10} (простои из-за перебоев энергоснабжения). Фактор t_{11} (прочие внелавные причины простоев), входящий в четвертую группу, практически не оказывает влияния на параметр Q .

Управление параметром Q наиболее эффективно путем изменения факторов t_6 и t_7 . То есть, снижение непроизводительных затрат времени в процессе крепления и управления кровлей, а также сокращение простоев по горно-геологическим причинам обеспечивает наибольший рост производительности очистного забоя. Моделирование производительности лавы по формуле (5) показывает, что сокращение продолжительности простоев по горно-геологическим причинам на 50% обеспечивает увеличение добычи угля на 20%, а при сокращении простоев в процессе крепления и управления кровлей на 50% обеспечивает рост нагрузки на 40%. Технические и технологические решения, направленные на снижение непроизводительных затрат времени в этих процессах, будут более эффективны, чем сокращение времени простоев в других производственных процессах.

Таким образом, формализация с помощью МГУА затрат времени на выполнение производственных процессов и операций позволяет выбрать наиболее рациональные технические и технологические решения для повышения нагрузки на лаву. Кроме того, впервые дается количественная оценка эффективности путей повышения производительности очистного забоя.

1. Антипов И.В. Системный подход и его применение в горном деле [Текст] / И.В. Антипов // Методологические проблемы науки и техники в условиях ускорения экономического развития. – Донецк, 1988. – С. 113–114.
2. Антипов И.В. Структурный анализ затрат времени выполнения процессов очистного цикла [Текст] / И.В. Антипов // Системный подход в горном деле. Проблемы, теория, методы. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1991. – С. 28–31.
3. Антипов И.В. Новая классификация отказов горно-шахтного оборудования [Текст] / И.В. Антипов, Э.Ю. Сухаревский // Физико-технические проблемы горного производства. – Вып. 8. – Донецк: ИФГП НАН Украины, 2005. – С. 207–213.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
5. Тимошенко Г.М. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – Донецк: ДПИ, 1984. – 60 с.
6. Ивахненко О.Г. Метод группового учета аргументов – конкурент метода стохастической аппроксимации [Текст] / О.Г. Ивахненко // Автоматика. – 1968. – № 3. – С. 58–72.

7. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами [Текст] / А.Г. Ивахненко. – К.: Техника, 1975. – 312 с.
8. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации сложных систем [Текст] / А.Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1981. – 296 с.
9. Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей [Текст] / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер. – К.: Техника; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник, 1984. – 223 с.
10. Ивахненко А.Г. Помехоустойчивость моделирования [Текст] / А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко. – К.: Наукова думка, 1984. – 295 с.
11. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным [Текст] / А.Г. Ивахненко, Ю.П. Юрачковский. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
12. Степашко В.С. Алгоритмы МГУА как основа автоматизации процесса моделирования по экспериментальным данным [Текст] / В.С. Степашко // Автоматика. – 1988. – № 4. – С. 44–55.
13. Юрачковский Ю.П. Восстановление полиномиальных зависимостей на основе самоорганизации [Текст] / Ю.П. Юрачковский // Автоматика. – 1981. – № 4. – С. 15–20.
14. Клейн Л.Р. Моделирование экономики США при помощи самоорганизации уравнений управления [Текст] / Л.Р. Клейн, И.А. Мюллер, А.Г. Ивахненко // Автоматика. – 1980. – № 1. – С. 3–19.
15. Брусиловский Б.Я. Прогнозирование тенденций изменений экономических показателей [Текст] / Б.Я. Брусиловский, Н.А. Ивахненко, И.В. Шабалина, Ю.П. Юрачковский // Автоматика. – 1985. – № 4. – С. 44–47.
16. Голуусов И.В. Моделирование взаимозависимости показателей развития народного хозяйства [Текст] / И.В. Голуусов, С.А. Кондрашова // Автоматика. – 1985. – № 1. – С. 11–16.
17. Ивахненко А.Г. Индуктивні методи прогнозування та аналізу складних економічних систем [Текст] / А.Г. Ивахненко, Г.А. Ивахненко // Економіст. – 1998. – № 5. – С. 88–96.
18. Меахненко А. Г. Самоорганизация моделей динамики роста сельскохозяйственных культур для управления орошаемым севооборотом [Текст] / А.Г. Меахненко, В.С. Степашко, М.Г. Хомовненко, Е.П. Галямин // Автоматика. – 1977. – № 5. – С. 44–49.
19. Хомовненко М.Г. Самоорганизация системы простых частных моделей, прогнозирующих урожай пшеницы [Текст] / М.Г. Хомовненко, Я.Г. Коломиец // Автоматика. – 1980. – № 1. – С. 28–37.
20. Ивахненко А.Г. Самоорганизация моделей с переменными коэффициентами для оптимизации проектирования водных объектов [Текст] / А.Г. Ивахненко, Г.И. Кротов // Автоматика. – 1980. – № 6. – С. 11–30.
21. Ивахненко А.Г. Опыт решения задачи прогноза солнечной активности при точностном и робастном подходах [Текст] / А.Г. Ивахненко, А.П. Сарычев, П.И. Залевский, Н.А. Ивахненко // Автоматика. – 1988. – № 3. – С. 31–43.
22. Ивахненко А.Г. Прогнозирование и экстраполяция метеорологических полей методами самоорганизации моделей [Текст] / А.Г. Ивахненко, Мадала Рао // Автоматика. – 1979. – № 6. – С. 18–35.
23. Ивахненко А.Г. Самоорганизация нейросетей с активными нейронами для предсказания активности химических соединений на основе алгоритма поиска аналогов [Текст] / А.Г. Ивахненко, В.В. Ковалишин, И.В. Тетко, А.И. Луйк, Г.А. Ивахненко // Проблемы управления и информатики. – 1999. – № 1. – С. 69–77.
24. Ивахненко А.Г. Метод математического моделирования сложных экологических систем [Текст] / А.Г. Ивахненко, Ю.В. Коппа, Н.Н. Тодуа // Автоматика. – 1971. – № 4. – С. 34–41.
25. Ивахненко А. Г. Синтез комбинированной модели поля загрязнения атмосферы города по экспериментальным данным [Текст] / А.Г. Ивахненко, Ю.В. Коппа, А.Н. Грошков // Автоматика. – 1981. – № 1. – С. 21–28.
26. Ивахненко А.Г. Многорядный алгоритм самоорганизации долгосрочных прогнозов (на примере экологической системы оз. Байкал) [Текст] / А.Г. Ивахненко, Г.И. Кротов, В.И. Чеберкус // Автоматика. – 1980. – № 4. – С. 28–47.

27. Ивахненко А.Г. Применение алгоритмов метода группового учета аргументов для восстановления пропущенных данных и прогноза уровня глюкозы в крови при надомном мониторинге диабета [Текст] / А.Г. Ивахненко, Г.А. Ивахненко, Е.А. Савченко, Т. Гергей // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 3. – С. 123–133.
28. Крыжановская Т.Г. Идентификация технологического процесса методом многорядной теории статистических решений [Текст] / Т.Г. Крыжановская, В.Я. Синяков, Л.А. Симонов // Автоматика. – 1984. – № 4. – С. 87–97.
29. Кадыров Ш.М. Применение методов самоорганизации моделей и методов линейного программирования для оптимизации ткацкого производства [Текст] / Ш.М. Кадыров, Р.Х. Марасулов, Н. Уразов // Автоматика. – 1992. – № 4. – С. 91–94.
30. Коппа Ю. В. Математическое моделирование технологического процесса прокатки труб на основе принципа самоорганизации [Текст] / Ю. В. Коппа, В.И. Эзакели, Д. Н. Лантаева // Автоматика. – 1984. – № 3. – С. 61–66.
31. Копысицкий Т.И. К применению МГУА для идентификации объектов нефтехимии и нефтепереработки [Текст] / Т.И. Копысицкий, Р.Ю. Юсифов // Автоматика. – 1978. – № 6. – С. 3–8.
32. Ивахненко Н.А. Самоорганизация математической модели для перспективного планирования строительно-монтажных работ [Текст] / Н.А. Ивахненко, А.А. Марчев // Автоматика. – 1978. – № 3. – С. 12–18.
33. Антипов И.В. Применение метода группового учета аргументов при оптимизации планирования горнопроходческих работ [Текст] / И.В. Антипов, М.В. Корнеев, А.Г. Махмудов // Реф. на картах ЦНИЭИуголь. – Вып. 11. – 1986.
34. Антипов И.В. Моделирование производственных процессов методом группового учета аргументов [Текст] / И.В. Антипов, А.Н. Шкуматов // Проблемы экологии: Общегосударственный научно-технический журнал. – 2000. – № 1. – С. 5–9.
35. Антипов И.В. Математическое моделирование процессов очистных работ [Текст] / И.В. Антипов, В.Б. Грядущий // Физико-технические проблемы горного производства. – Вып. 7. – Донецк: ИФГП НАН Украины. – 2004. – С. 147–157.
36. Антипов И.В. Моделирование процессов очистных работ в проектах угледобычи [Текст] / И.В. Антипов, А.Є. Шуст // Проектно-орієнтована діяльність соціально-економічних систем: сучасний погляд: зб. наук. праць / ДонДУУ. – Донецьк, 2010. – Т. XI. – С. 5–17. (Технічні науки; вип. 144).
37. Антипов И.В. Моделирование надежности технологических процессов методом группового учета аргументов [Текст] / И.В. Антипов, М.В. Корнеев // Теория и практика проектирования, строительства и эксплуатации высокопроизводительных подземных рудников. – М., 1990. – С. 202–203.
38. Антипов И.В. Оценка надежности горнодобывающих технологий вероятностно-физическими методами [Текст] / И.В. Антипов, И.А. Турбор // Физико-технические проблемы горного производства. – Вып. 14. Физико-технические основы оценки состояния углепородного массива. – Донецк: Институт физики горных процессов НАН Украины. – 2011. – С. 106–114.
39. Антипов И.В. Выбор метода математического моделирования и установление рациональной длины лавы [Текст] / И.В. Антипов, Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко // Физико-технические проблемы горного производства. – Вып. 14. Физико-технические основы оценки состояния углепородного массива. – Донецк: Институт физики горных процессов НАН Украины. – 2011. – С. 68–75.
40. Антипов И.В. Физико-техническое обоснование параметров высокопроизводительных угледобывающих комплексов нового поколения [Текст] / И.В. Антипов // Физико-технические проблемы горного производства. – Вып. 11. Физика и механика горных процессов на больших глубинах. – Донецк: Институт физики горных процессов НАН Украины. – 2008. – С. 69–80.
41. Филимонов П.Е. Формализация процесса конвергенции вмещающих пород в высокопроизводительном очистном забое [Текст] / П.Е. Филимонов // Геотехническая механика: Сб. научн. тр. – ИГТМ НАН Украины. – № 48. – 2004. – С. 153–163.

42. Антипов И.В. Исследования ускорения конвергенции вмещающих пород в очистном забое шахты им. Челюскинцев [Текст] / И.В. Антипов, А.В. Савенко, Е.Д. Нагорная, В.А. Данча, С.С. Пугач, И.В. Жуковцов, И.А. Бараненко // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – Вип. 10. – Донецьк: УкрНДМІ НАН України. – 2012. – С. 35–45.
43. Антипов И.В. Ускорение конвергенции вмещающих пород в очистных забоях [Текст] / И.В. Антипов, В.Г. Ильюшенко, В.Е. Кравченко // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: Китис. – 1999. – С. 56–63.
44. Высоцкий В.Н. О наилучшем делении исходных данных в алгоритмах МГУА [Текст] / В.Н. Высоцкий // Автоматика. – 1976. – № 3. – С. 71–74.
45. Юрачковский Ю.П. Оптимальное разбиение исходных данных на обучающую и проверочную последовательности на основе анализа функции распределения критерия [Текст] / Ю.П. Юрачковский, А.Я. Грошков // Автоматика. – 1980. – № 2. – С. 5–12.
46. Васютинский Н.А. Золотая пропорция [Текст] / Н.А. Васютинский. – М.: Молодая гвардия, 1990. – 238 с.
47. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование случайных процессов по алгоритмам МГУА с использованием критериев несмещенности и баланса переменных [Текст] / А.Г. Ивахненко, Н.А. Ивахненко // Автоматика. – 1974. – № 4. – С. 52–59.
48. Ивахненко А.Г. Основные разновидности критерия минимума смещения модели и исследование их помехоустойчивости [Текст] / А.Г. Ивахненко, В.Н. Высоцкий, Н.А. Ивахненко // Автоматика. – 1978. – № 1. – С. 32–33.