© А.Б. Логов, А.Р. Крумгольц, 2006

УДК 622.014.2:658.513.011.56:681.3

А.Б. Логов, А.Р. Крумгольц

МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ «РИСКОВ» В УНИКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Семинар № 14

Развиваемая в ИУУ СО РАН концепция анализа состояния уникальных систем базируется на математических моделях, использующих аналогию с определением информационной энтропии [1, 2]. Можно выделить ряд присущих этому методу особенностей анализа:

- анализ и определение видов состояния систем и элементов возможно даже при отсутствии надежных эмпирических эталонов, т.е. для объектов, названных «уникальными»;
- анализ распространяется на неоднородные системы, ряд элементов которых отличается границами вплоть до фазовых переходов;
- функциональное состояние определяется по набору характеристик разной природы и размерности без привлечения априорных правил и эмпирических оценок «весов»;
- системы могут быть заданы списками (например, промышленных предприятий) без какого-либо упорядочивания и выделения аргументов.

Таким образом, метод вполне приспособлен к применению в возникающих на практике ситуациях, многие примеры можно найти в [1, 2]. Здесь отметим только апробацию тестовой задачи, для которой рассматривалась периодическая система химических элементов [4–6]. Полученные *тривиальные* заключения полностью подтвердили строгость и корректность метода, а ряд *нетривиальных* результатов позволяет оценить его возможности.

Разработка модели оценивания «рисков» ориентирована на те же особенности применения и основана на тех же постулатах, что энтропийный метод. На данном этапе модель рассматривается как приближение к практическим постановкам, но планируется ввести ее в основной аппарат анализа.

Исходная постановка задачи может проиллюстрирована схемой:

$$\begin{pmatrix} \text{модель} \\ \text{рисков} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{модель} \\ \text{удельных весов} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{модель} \\ \text{цен} \end{pmatrix}$$

В данной статье рассматривается случай, так называемого «взвешивания» относительных, неаддитивных показателей по валовым характеристикам, образующим модели «цен» элементов. Простейшим примером можно назвать сравнение угледобывающих предприятий по уровню производительности с поправкой на объем работ, при котором данные производительности были достигнуты.

Другой тип подобных задач возникает, например, при исследовании вредных примесей в воде затопленных шахт (удельные, неаддитивные показатели), если для принятия решения следует учесть количество жителей в опасной зоне.

В соответствии с правилами энтропийного метода модель «удельного веса» i – го элемента системы

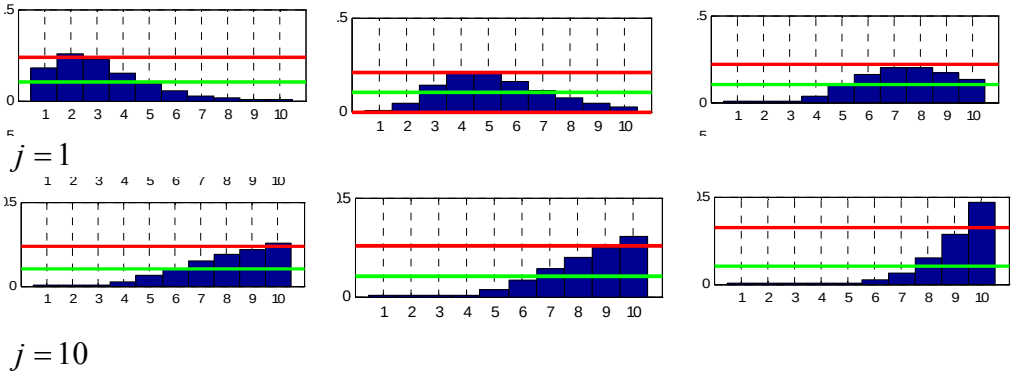


Рис. 1. Характерные примеры изменения «рисков» в тестовой задаче

$(i = 1, 2, \ldots, m)$ при использовании j – ого показателя $R(j)$ $(j = 1, 2, \ldots, B)$ может быть представлена в виде

$$\Omega(i / j) = \alpha(i) \log_2 R(i / j),$$

где $\alpha^{-1}(i) = \sum_{j=1}^{B} \log_2 R(i / j)$

Определение модели «цен» на основе валовой характеристики $Q(k)$ при $k = 1, 2, \ldots, C$, соответственно, можно представить в форме

$$\varphi(i / k) = \beta(j) \log_2 q(i / k)^{-q(i / k)},$$

где

$$q(i / k) = Q(i / k) \left[\sum_{i=1}^{A} Q(i / k) \right]^{-1};$$

$$\beta^{-1}(j) = \sum_{i=1}^{A} \log_2 q(i / k)^{-q(i / k)}$$

Вводится вспомогательная функция «рисков»

$$\Xi(i / j; k) = \Omega(i / j) \times \varphi(i / k) =$$
$$= \alpha(i) \beta(j) \log_2 R(i / j) \log_2 q(i / k)^{-q(i / k)},$$

которая в результате нормирования по характеристике системы

$\sum_{i=1}^{A} \Xi(i / j; k)$ дает определение видоизмененных «удельных весов»

$$\Omega(i / j; k) =$$
$$= \alpha(i) \gamma(j) \log_2 R(i / j) \log_2 q(i / k)^{-q(i / k)}$$

где

$$\gamma(j) = \left\{ \sum_{i=1}^{A} \left[\log_2 R(i / j)^{\alpha(i)} \log_2 q(i / k)^{-q(i / k)} \right] \right\}^{-1}$$

Для исследования свойств и возможностей предложенного алгоритма была сформулирован тест, в котором модели выборок показателей образованы дискретными наборами по элементам $i = 1, 2, \ldots, 10$. Методической основой наборов послужили монотонные и мономодальные огибающие, представленные функциями отклика динамических систем, которые были подробно исследованы в [3]. В результате тестирования удалось показать гибкость и адекватность моделей типа $\Omega(i / j; k)$.

Переход отдельных элементов в иной вид состояния, которому присущи аномально высокие «риски», диагностировался в соответствии с концепцией уникальных объектов [8] на основе определения границ, введенных в энтропийном методе на аналогах фазовых плоскостей (верхняя линия).

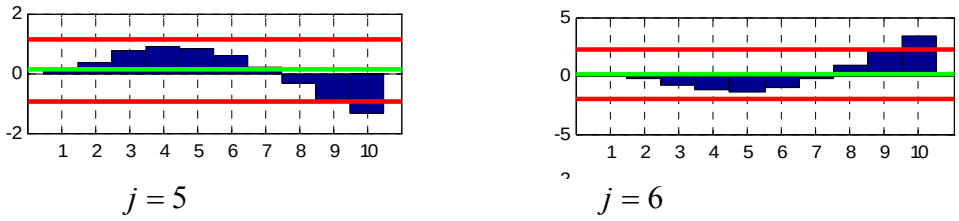


Рис. 2. Распределения «рисков» при бимодальной модели «цен»

Важнейшим для моделирования считаем случай, когда «цены» определяются набором характеристик.

Предложено называть обобщением

$$H(i/C_1;C_2) = \sum_{k=C_1}^{C_2} U(i/k) =$$

$$= \sum_{k=C_1}^{C_2} \log_2 \left[q(i/k)^{-q(i/k)} \prod_{i=1}^{A} q(i/k)^{q(i/k)/A} \right]^{1/\sigma[I;k]}$$

сумму центрированных и нормированных моделей

$$U(i/k) = \frac{\log_2 q(i/k)^{-q(i/k)} - \$M[I;k]}{\sigma[I;k]} /$$

На этой основе вводится специфическое определение «цен»

$$\varphi(i) = \frac{H(i/C_1;C_2)}{\sum_{i=1}^{A} H(i/C_1;C_2)} /$$

Здесь $C_1 \le k \le C_2$ - интервал определения частных характеристик.

Обобщение является приемом практического повышения достоверности, если не выявлена надежная валовая характеристика для ранжирования предприятий. На практике использовались: объем добычи, объем отгрузки, объем продаж (тыс. руб.), объем проходческих работ (различные варианты) и т.п. При тестировании проявились сглаживающие свойства

Если можно выделить набор условно негативных характеристик $C_3 \le k \le C_4$, то определяются комбинации моделей «цен»

$$H(i/C_1,C_2;C_3,C_4) =$$

$$= \sum_{k=C_1}^{C_2} U(i/k) - \sum_{k=C_3}^{C_4} U(i/k)'$$

взвешивание по которым приводит к выявлению специфических свойств элементов.

В условиях тестовой задачи отмечены примеры радикального измене-ния характера и степени «рисков» элементов при предельно близких моделях «удельных весов». На рис. 2 иллюстрируется аномальное поведение элемента $i = 10$, доказывающее внезапность наступления опасной ситуации с переходом от «весов» $j = 5$ к $j = 6$.

Заметим, что результат не трактуется как изменение знака показателя $\Omega(i/j;k)$, поскольку используются центрированные оценки. Тем не менее, столь сильный эффект рассматривается в качестве обоснования необходимости математического моделирования. Выявление изменения в тестовой задаче не снижает ценность определения опасной ситуации.

При некоторых унимодальных распределениях «цен» эффект радикального изменения «рисков» не только сохраняется, но даже локализуется и ярче проявляется (рис. 3).

Противоположная идея повышения достоверности или чувствительности лежит в обосновании алгоритмов обобщения и комбинирования моделей «удельных весов». Вводится вспомогательная функция

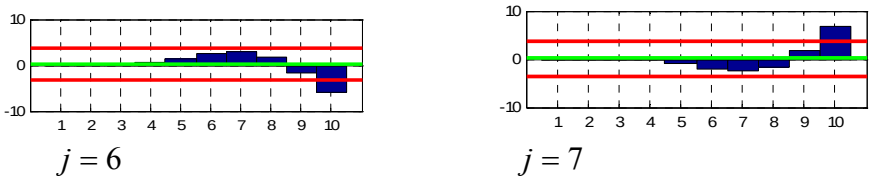


Рис. 3. Распределения «рисков» при модели «цен» с правой асимметрией

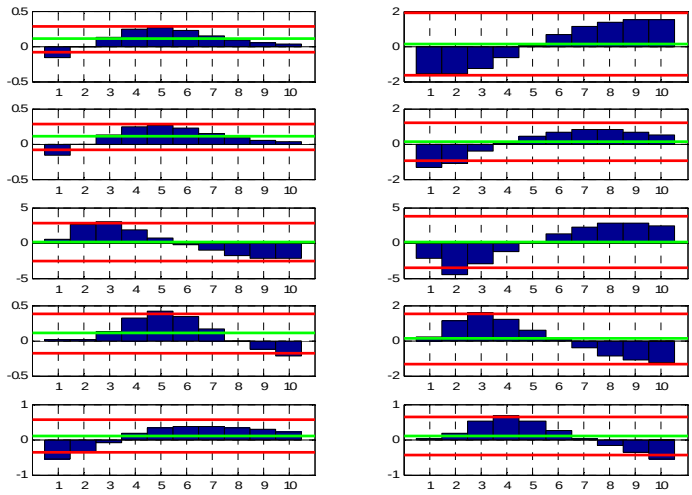


Рис. 4. Модели комбинаций «удельных весов»

$$H(i/\ B_1, B_2; B_3, B_4) = \sum_{j=B_1}^{B_2} \log_2 q(i/\ j)^{-q(i/\ j)} -$$

$$-\sum_{j=B_3}^{B_4} \log_2 q(i/\ j)^{-q(i/\ j)} =$$

$$= \log_2 \left[\prod_{j=B_1}^{B_2} q(i/\ j)^{-q(i/\ j)} \times \prod_{j=B_3}^{B_4} q(i/\ j)^{q(i/\ j)} \right],$$

в которой используются границы списка условно позитивных (B_1, B_2) и негативных (B_3, B_4) характеристик.

При моделировании приходится учитывать, что в результате образования комбинаций происходит подмена индекса показателей

$j: 1, 2, 3, \ldots, B_1, \ldots, B_2, B_3, \ldots, B_4, \ldots, B;$

$l:\ 1, 2, 3, \ldots, B_1^*, \ldots, B + 1 - (B_2 - B_1) - (B_4 - B_3);$

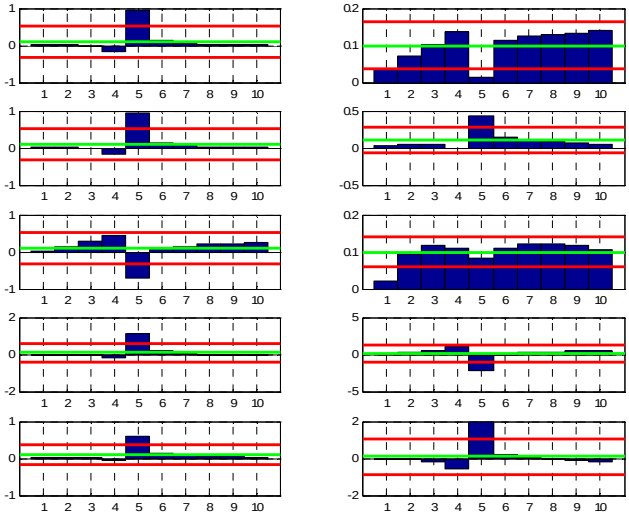
Соответственно нормировка производится по системе с индексом l, для которого верно условие

$$1 \le l \le B^* = B + 1 - (B_2 - B_1) - (B_4 - B_3)$$

$$\sum_{l=1}^{B^*} H(i/\ B_1, B_2; B_3, B_4) =$$

$$= \ln \frac{\prod_{j=B_1}^{B_2} \left[\prod_{l=1}^{B^*} q(i/\ j)^{-q(i/\ j)} \right]}{\prod_{j=B_3}^{B_4} \left[\prod_{l=1}^{B^*} q(i/\ j)^{-q(i/\ j)} \right]} = \sum_{l=1}^{B^*} H(i/\ l)$$

В результате взвешивания получаем определение измененных «удельных весов» элементов системы



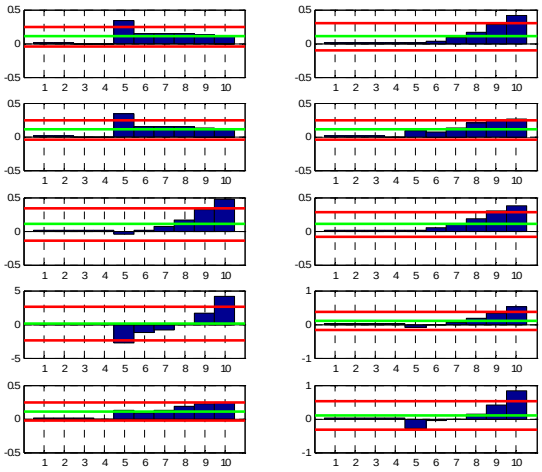


Рис. 5. Модели «рисков» при левой асимметрии распреде-ления «цен»

Рис. 6. Модели рисков при правой асимметрии распре-деления «цен»

Рис. 4 иллюстрирует разнообразие комбинаций, которые рассматривались в тестовой задаче.

Результаты моделирования при предельно различающихся моделях «цен» (рис. 5-6) позволяют отметить, что в формировании картины «рисков» проявляются особенности распределений «удельных весов».

Таким образом, по результатам детального тестирования проверена адекватность и продуктивность предложенных моделей определения «рисков» по неупорядоченному набору неоднородных выборочных данных. Проверенный подход в каждом конкретном случае позволяет оценить границы сохранения реализованной ситуации и прогнозировать последствия ее изменения. Возможность определения высокого и низкого уровня «риска» на основе критерия устойчивости [4] распространяет метод на уникальные системы и последствия структурных преобразований в действующих производственных и/или территориальных объединениях угольной отрасли.

$$\Omega(i/l;k)=\left\{\log_2\left[\frac{\prod_{j=B_1}^{B_2} q(i/j)^{-q(i/j)}}{\prod_{j=B_3}^{B_4} q(i/j)^{-q(i/j)}}\times\varphi(i/k)\right]\right\}\times$$

$$\times\left\{\log_2\prod_{i=1}^{A}\left[\frac{\prod_{j=B_1}^{B_2} q(i/j)^{-q(i/j)}}{\prod_{j=B_3}^{B_4} q(i/j)^{-q(i/j)}}\times\varphi(i/k)\right]\right\}^{-1}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А.* Анализ функционального состояния промышленных объектов в фазовом пространстве. Институт угля и углехимии СО РАН, Кемерово: 2004 – 168 с.

2. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А.* Анализ состояния уникальных объектов (развитие и тестирование). Институт угля и углехимии СО РАН, Кемерово: 2004 – 107 с.

3. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю.* Математические модели диагностики уникальных объектов – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999 – 228 с., ил.

4. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А.* Анализ состояния систем уникальных объектов. Вычислительные технологии. Том 10, №5, 2005 – с. 49-53.

5. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А.* Моделирование тенденций поведения элементов систем уникальных объектов. Вычислительные технологии. Том 10, №5, 2005 – с. 54-56.

6. *Логов А.Б., Замараев Р.Ю., Логов А.А.* Алгоритмы энтропийного метода анализа для отображения свойств объекта в фазовом пространстве. Вычислительные технологии. Том 10, №6, 2005 – с. 75-81.

Коротко об авторах

Логов А.Б. - профессор, доктор технических наук,
Крумгольц А.Р. – инженер,
Институт угля и углехимии СО РАН, Кемерово.

Д И С С Е Р Т А Ц И И

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
СТЕТЮХА Владимир Алексеевич	Прогнозирование и регулирование тепловых и геомеханических процессов на открытых горных работах на южных границах криолитозоны	25.00.20	д.т.н.
ШМИДТ Михаил Викторович	Снижение эмиссии парниковых газов при метанобезопасной разработке углегазовых месторождений с энергетическим использованием метана	25.00.36 05.26.03	д.т.н.
АХМЕДОВ Алимжан Мадиханович	Обоснование методов квалиметрической оценки полноты и качества извлечения запасов медно-молибденовых руд на основе геолого-технологического картирования	25.00.16	к.т.н.

© С.Т. Штилькинд, 2006

УДК 622.272

С.Т. Штилькинд

О КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В ОТЛОЖЕНИЯХ КАМЕННОЙ СОЛИ ПУТЕМ РАСТВОРЕНИЯ

Семинар № 14

Создание подземных выработок-емкостей в отложениях каменной соли осуществляется путем подземного растворения соляной залежи через буровую скважину. Для этого в определенную точку соляной залежи подается растворитель (вода), а образующийся хлоридонатриевый раствор (далее рассол) отбирается на поверхность земли. Точки ввода растворителя и отбора рассола разнесены по высоте на контролируемое расстояние.

Для управления процессом растворения в выработку-емкость вводится небольшое количество нерастворителя. Это вещество легче растворителя, не перемешивается с ним и, занимая верхнюю часть выработки-емкости, позволяет формировать ее потолочину.

Одной из основных целей строительства является получение выработки-емкости заданной формы и объема. Поэтому процесс ее развития требует контроля промежуточных результатов на каждой стадии размыва. Важнейшим инструментом управления процессом формирования развивающейся выработки является компьютерное моделирование. Задача такого моделирования состоит в определении в последовательные моменты времени формы выработки-емкости при условии, что известна ее начальная конфигурация и заданы условия проведения процесса размыва: скорость подачи растворителя, точки ввода растворителя и отбора рассола, уровень нерастворителя в зависимости от времени (сценарий).

Современное состояние вопроса

Для адекватного описания процесса формирования емкости в камен-ной соли нужны достаточно сложные математические модели, определяемые уравнениями, которые не могут быть решены в аналитической форме. Хотя современные компьютерные системы предоставляют широкие возможности для проведения высокоточных расчетов (прогнозов), для их использования необходима разработка соответствующих численных методов и программ.

В настоящее время проблема промышленного применения программ гидравлических расчетов весьма актуальна. Несмотря на значительное число разработок в этой области, обладающих достаточной предсказательной силой, существующее программное обеспечение не соответствует современным требованиям практики проектирования, строительства и эксплуатации подземных резервуаров в каменной соли [1].

Основными задачами в развитии такого рода компьютерных программ, требующими разработки в ближайшие годы, являются

- моделирование трехмерных течений;
- описание процесса растворения;

- численный расчет развития выработок;
- описание пространственной неоднородности свойств каменной соли;
- связь с реальным процессом растворения, включая локационные измерения.

Разработке эффективной компьютерной программы предшествуют такие стадии, как физическое и математическое моделирование процесса, создание соответствующих численных методов и даже методологии моделирования.

Физическое моделирование

Одной из наиболее сложных задач моделирования вынужденных и естественно-конвективных течений, сопровождающих процесс выщелачивания подземных каверн, является описание турбулентности. Эту задачу можно отнести к неразрешенным проблемам гидродинамики [1].

Вторая проблема связана с описанием процессов вблизи растворяющейся поверхности каменной соли. Существующий ряд моделей, используемых различными авторами [3, 4, 5], требует дополнительных экспериментальных подтверждений.

Решение третьей проблемы состоит во внедрении и использовании двух- или трехмерного моделирования, качество которого для существующих кодов пока нельзя признать удовлетворительным. В этой области предстоит определить реалистические режимы пространственного течения и разработать модели турбулентной диффузии. Многими специалистами также признано, что наиболее перс-пективные подходы, такие как моделирование больших вихрей, требуют для своего развития достаточно длительного периода времени и в обозримые сроки не будут завершены [1, 2].

Математическое моделирова-ние

Основной задачей моделирования процесса выщелачивания является расчет изменяющейся со временем формы поверхности раздела фаз каменная соль-рассол. В этой связи необходима разработка математического аппарата для расчета движения межфазных поверхностей. Такие задачи являются предметом исследований в механике сплошной среды. По мнению специалистов, в последние годы в этом направлении достигнут определенный прогресс [1].

При разработке математической модели процесса выщелачивания основные трудности связаны с описанием различных течений в условиях сложной геометрии. Кроме того, результаты расчетов должны соответствовать измеряемым параметрам с заданной точностью.

Численные методы

Большинство расчетных алгоритмов в вычислительной гидродинамике основано на использовании конечно-разностных, конечно-объемных и конечно-элементных методов (в зависимости от способа разбиения расчетной области). Эти методы получили широкое распространение благодаря свойству устойчивости. Используемые численные методы в основном различаются степенью неявности при интегрировании. Простейшие методы обеспечивают устойчивые результаты для временных шагов ниже конвективного критерия Куранта. Однако проблемы ограничения временного шага и численной устойчивости можно в значительной степени избежать, если использовать полностью неявные по времени методы интегрирования. С другой стороны, принципиальные преимущества полностью неявных методов могут быть скомпрометированы большими вычислительными усилиями, необходимыми для

обращения матриц больших трехмерных систем [1].

В силу специфики моделирования процессов выщелачивания при создании численных алгоритмов необходимо учитывать следующие рекомендации [1]:

- в связи со значительной длительностью физического процесса размыва целесообразно использовать различные численные схемы для различных этапов рассматриваемого нестационарного процесса;
- существенные усилия должны быть направлены на разработку численных методов для многомерных течений;
- необходимо разрабатывать численные методы с высоким порядком аппроксимации.

Методология моделирования

Практика создания рассматриваемых компьютерных комплексов приводит к следующим методологическим положениям:

- модель движения межфазной поверхности легче внедрить в гидродинамическую модель при использовании явной или полунеявной численной схемы, чем полностью неявной;
- критерий для определения временного шага должен основываться на ясных физических принципах;
- при конструировании алгоритма необходимо предусматривать распараллеливание;
- для повышения устойчивости следует использовать неявные методы аппроксимации замыкающих соотношений;
- целесообразно применять объектно-ориентированное программирование для получения модульной структуры кода.

Заключение

Разработка трехмерного гидродинамического кода нового поколения, предназначенного для описания процесса создания подземного резервуара в отложениях каменной соли, является актуальной задачей. Современные практические потребности требуют новых решений в области моделирования трехмерных конвективных течений, обуславливающих процесс развития подземной выработки.

Новые подходы, математические модели, численные методы, необходимые для перехода на следующий качественный уровень описания процесса создания подземных резервуаров, интенсивно разрабатываются на Западе. В результате этих исследований к настоящему времени сформировался следующий набор требований к гидродинамическому коду нового поколения:

- наличие уравнения для описания движения поверхности растворения;
- моделирование процессов турбулентного переноса;
- использование высокоточных численных методов;
- применение неструктурированных расчетных сеток.

Основным и наиболее трудоемким элементом кода является решатель (solver), который осуществляет численное интегрирование системы уравнений в соответствии с используемым численным методом. Разработка решателя с «нуля» может по-требовать значительных временных затрат, поэтому целесообразно воспользоваться каким-либо уже существующим программным продуктом, предназначенным для интегрирования гиперболической системы уравнений. Основными требованиями к решателю должны быть:

- использование неструктурированных сеток;
- возможность сращивания 1D и 2D или 3D модулей;

- достаточно гибкая модульная структура, позволяющая добавлять те или иные уравнения;
- возможность распараллеливания;
- наличие графического интерфейса.

Рассматривая нынешнее состояние гидравлических программных продуктов, можно ожидать, что возрастающая эффективность компьютеров будет использоваться для улучшения пространственного и временного разрешения 3D расчетов. Другими словами, развитие компьютеров даст возможность уменьшить объем расчетной ячейки и повысить точность физического описания вследствие уменьшения пространственных и временных масштабов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Turbulence,* heat and mass transfer 4. Proceedings of the forth international symposium on turbulence, heat and mass transfer. Antalya, Turkey, 12-17 October 2003. Edited by K. Hanjalic, Y. Nagano, M.J. Tummers. Begell House Inc. New York, Wallingford (UK).
2. *Kunstman A.S., Urbanczyk K.M.* Computer models of the salt cavern leaching process – evolution over the last 35 years. Salt 2000. 8-th World Salt Symposium, vol. 1, 2000, Hague, Netherlands, Elsevier.
3. *Мазуров В.А.* Подземные газонефтехранилища в отложениях каменной соли. М. Недра, 1982.
4. *Saberian A.* Numerical simulation of development of solution-mined storage cavities. Ph.D. dissertation, University of Texas, August 1974, 219 p.
5. *Kunstman A., Poborska-Mlynarska K., Urbanczyk K.* Zarys otworowego lugownictwa solnego. Wydawnictwa AGH, Krakow, 2002, 145 p.

Коротко об авторах

Штилькинд С.Т. – аспирант, кафедра «Строительство подземных сооружений и шахт», Московский государственный горный университет.

© Л.Ю. Шевчук, 2006

УДК 65

Л.Ю. Шевчук

ПРИНЯТИЕ ГРУППОВЫХ ЭКСПЕРТНЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Семинар № 14

В настоящее время исследования в области управления человеческими ресурсами, а именно в области планирования деловой карьеры сотрудников предприятия, на основании оценки профессиональных и личностных качеств являются одним из наиболее быстро развивающихся направлений. Это обусловлено в первую очередь осознанием того, что сложившаяся система управления карьерой персонала на предприятиях морально устарела и представляет скорее систему простого перемещения сотрудников на новые должности без учета их профессиональных и личных качеств, чем действительно систему планирования карьеры с учетом индивидуальных особенностей сотрудников.

Планирование карьеры сотрудников предприятия должно основываться на систематической оценке личностных и деловых качеств претендентов на карьерный рост. Одним из основных способов оценки является проведения экспертного исследования, который основывается на принятие группового решения.

Экспертная оценка представляет собой мощное средство переработки слабо формализованных данных, которое позволяет выделить наиболее обоснованные утверждения специалистов-экспертов и использовать их, для подготовки различных решений.

Экспертная деятельность в области управления персоналом – система действий, выполняемых с привлечением экспертов, для анализа и оценки качества деятельности сотрудников организации, с целью повышения обоснованности принимаемых решений в условиях неопределенности, противоречий или конфликтов.

Понятия, которыми оперируют специалисты при оценки персонала, являются по своей природе слишком сложными и многоплановыми для того, чтобы использовать для их представления только традиционные, точные, хорошо определенные модели и алгоритмы. Многие понятия вследствие субъективности человеческого мышления, приблизительного характера умозаключений и лингвистического их описания оказываются нечеткими по своей природе и требуют для своего представления соответствующего аппарата.

Особенностью процессов принятия решений является учет наличия лица принимающего решения (ЛПР): индивидуального или коллективного, который стремится к достижению некоторых целей на основе своих предпочтений.

Качество процесса принятия решений находится в зависимости от полноты учета всех факторов, существенных для последствий, возникающих в результате принятия решений. Часто эти факторы носят чисто субъективный характер, присущий как ЛПР, так и любому процессу принятия решений.

Неопределенность в принятии решений обусловлена недостаточной надежностью и количеством информации, на основе которой ЛПР осуществляет выбор решения. Поэтому для принятия групповых экспертных решений в условиях неопределенности целесообразно

использовать методы теории нечетких множеств.

Способности, навыки и умения сотрудников можно представить в виде лингвистической переменной Заде.

Лингвистической [3] называется переменная, значениями которой являются слова или предложения естественного языка. С помощью лингвистических переменных можно приближенно описывать явления, которые настолько сложны или плохо определены, что не поддаются описанию в общепринятых количественных терминах. Например, выражение «умение быть лидером» отражает целый комплекс характеристик умений человека. Это выражение можно рассматривать как название нечеткого множества, представляющего собой ограничение, обусловленное нечеткой переменной «умение быть лидером». С этой точки зрения термины «совсем не умеет быть лидером», «вполне умеет быть лидером», и т.д. – названия нечетких множеств, образованных путем действия модификаторов «совсем», «вполне», «очень» и т.п. не нечеткое множество «уметь быть лидером». В сущности, эти нечеткие множества вместе с нечетким множеством «уметь быть лидером» играют роль значения лингвистической переменной «Умения».

Важным аспектом понятия лингвистической переменной является то, что эта переменная более высоко порядка, чем нечеткая переменная, в том смысле, что значениями лингвистической переменной являются нечеткие переменные.

Более точно лингвистическая переменная описывается набором *(X, T(X), U, G, M)*, в котором *X* - название этой переменной; *T(X)* - терм-множество *X*, т.е. совокупность ее лингвистических значений; *U* - универсальное множество; *G* - синтаксическое правило, порождающее термы множества *T(X)*; *M* - семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению *X* ставит в соответствие его смысл *M(X)*, причем *M(X)* обозначает нечеткое подмножество множества *U*.

Смысл лингвистического значения *X* характеризуется функцией совместимости: $U \rightarrow [0,1]$, которая каждому элементу $u \in U$ ставит в соответствие значение совместимости этого элемента с *X*. На рис. 1. представлено образование лингвистической переменной «умение быть лидером».

С помощью лингвистических переменных можно приближенно описывать явления, которые настолько сложны или плохо определены, что не поддаются описанию в общепринятых количественных терминах.

Для того чтобы процедура согласования оценок реализовывалась эффективно, необходимо разработать процедуры построения функции принадлежности, процедуры определения показателя согласованности и процедуры, по которым осуществлялось бы согласование экспертных оценок.

Построение функции принадлежности

Существует ряд методов построения по экспертным оценкам функции принадлежности нечеткого множества. В выделяют две группы методов: прямые и косвенные. Прямые методы определяются тем, что эксперт непосредственно задает правила определения значений функции принадлежности μ_A, характеризующей понятие *A*. Эти значения согласуются с его предпочтениями на множестве объектов *U* следующим образом [4]:

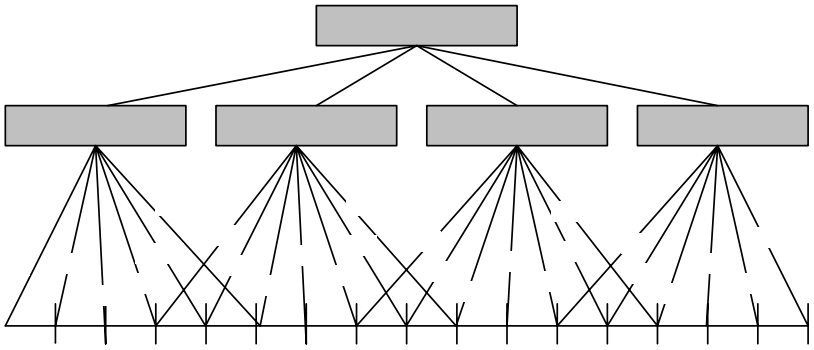


Рис. 1. Образование лингвистической переменной

1. для любых u_1, $u_2 \in U$ $\mu_A(u_1)<\mu_A(u_2)$ тогда и только тогда, когда u_2 предпочтительнее u_1, т.е. в большей степени характеризуется понятием А;
2. для любых u_1, $u_2 \in U$ $\mu_A(u_1)=\mu_A(u_2)$ тогда и только тогда, когда u_1 и u_2 безразличны относительно свойства А.

Примерами прямых методов являются непосредственное задание функции принадлежности таблицей, графиком или формулой. Недостатком этой группы методов является большая доля субъективизма.

В косвенных методах значения функции принадлежности выбираются таким образом, чтобы удовлетворить заранее сформулированным условиям. Экспертная информация является только исходной информацией для дальнейшей обработки (например, с помощью матриц парных сравнений).

Как правило, прямые методы используются для описания понятий, которые характеризуются измеримыми (метрическими свойствами), такими как высота, рост, вес, объем. В этом случае удобно непосредственное задание степени принадлежности.

Косвенные методы более трудоемкие, чем прямые, но их преимущество – в устойчивости по отношению к искажениям в ответе.

Определение показателя согласованности экспертов

При проведении группового экспертного опроса важной задачей становится задача согласования суждений различных экспертов, особенно когда значения признаков представляются в виде лингвистических переменных. Это прежде всего обусловлено тем, что если использование лингвистических переменных при оценке характеристик задачи одним ЛПР может существенно облегчить оценку этих характеристик, то при согласовании оценок группы экспертов использование лингвистических переменных может создать существенные трудности, т.к. одна и та же вербальная оценка значения признака, например «выражено сильно», для различных людей может иметь совершенно различные значения. Поэтому при согласовании оценок очень важно уточнять, что же значит «выражено сильно».

Функций принадлежности, построенные по экспертным оценкам различных специалистов, как правило не совпадают. Для этого предлагается методика определения степени согласованности экспертных оценок по функциям принадлежности нечеткого множества,

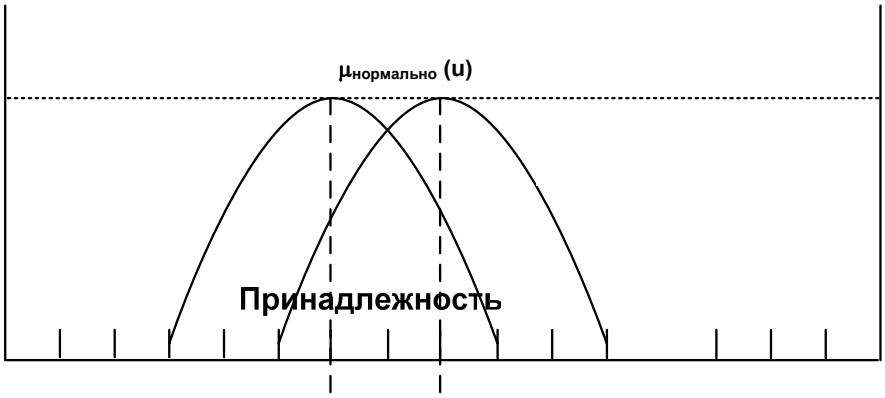


Рис. 2. Неграничный лингвистический терм «Лидерство»

построенных на основе индивидуальных суждений.

Рассмотрим простейший случай определения согласованности для двух экспертов. Также сделаем предположение, что построенная для лингвистического терма функция принадлежности имеет единственный экстремум (наиболее распространенный случай). В этом случае возникает две принципиально разных формы функции принадлежности – для значений граничных и неграничных лингвистических термов.

Граничным [1, 2] называется лингвистический терм (лингвистическое значение). Для которого описывающего его функция принадлежности достигает своего экстремума *(μ(u)=1)*. На одной из границ диапазона изменения базовой переменной. Например, лингвистический терм «выражено сильно» лингвистической переменной «лидерство» достигает экстремума на правой границе изменения базовой переменной. Если экстремум функции принадлежности достигается на границе диапазона изменения базовой переменной, то в этом случае читается описываемый лингвистический терм *неграничным*.

Неграничный лингвистический терм

Предположим, что требуется оценить значение признака, описываемого лингвистический термом «выражено сильно» и функции принадлежности, построенные по оценкам двух экспертов E_1 и E_2, имеют вид представленный на рис. 2.

Будем считать, что функции принадлежности имеют нормальную форму (максимальное значение функция принадлежности принимает значение *(μ(u) = 1)*, в противном случае их можно нормализовать.)

Значение парной согласованности *(PS)* определяется следующим образом:

$$PS = 1 - \frac{|u_1 - u_2|}{range(u)}, \quad (1)$$

где *PS* – значение парной согласованности, принимающее значение из интервала [0;1]; u_1, u_2 - значения базовой переменной, при которой $\mu_A(u)=1$, соответственно для первого и второго эксперта; $range(u)$ - «размах» значений базовой переменной *u*, описывающий данный лингвистический терм при $\mu_A(u)$ =

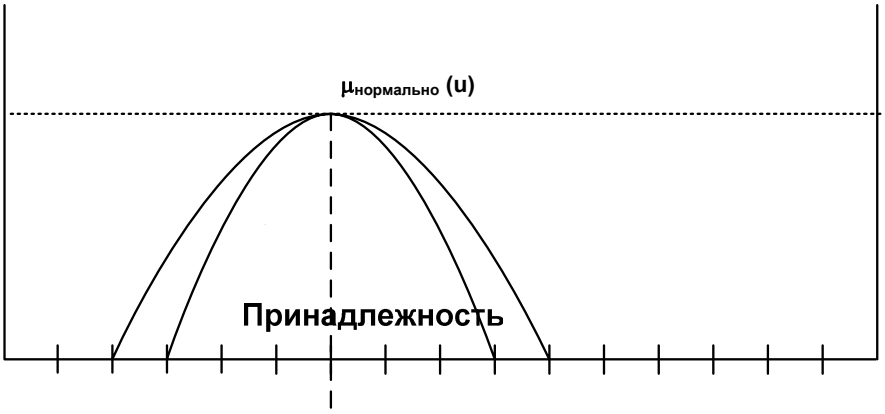


Рис. 3. Неграничный лингвистический терм «Лидерство»

0. Значение этого показателя определяется как

$range(u) = b - a$, где

$a = \min\left\{u^1_{\min}, u^2_{\min} \mid \mu(u^1_{\min}) = 0, \mu(u^2_{\min}) = 0\right\}$,

$b = \max\left\{u^1_{\max}, u^2_{\max} \mid \mu(u^1_{\max}) = 0, \mu(u^2_{\max}) = 0\right\}$

Таким образом, выражение примет вид:

$$PS = \frac{|u_1 - u_2|}{b - a} \qquad (2)$$

Также необходимо рассмотреть случай, когда функции принадлежности согласно оценкам экспертов принимают максимальное значение при одинаковых значениях базовой переменной *u*, но имеют различный «размах» значений базовой переменной, описываемой данным лингвистическим термом (рис. 3).

В этом случае значение парной согласованности определяется как:

$$PS = \frac{\min\left\{range(u_1); range(u_2)\right\}}{\max\left\{range(u_1); range(u_2)\right\}}, \qquad (3)$$

где $range(u_1)$ и $range(u_2)$ - размах значений базового признака соответственно для оценок первого и второго эксперта.

Граничный лингвистический терм

«Левосторонний» лингвистический терм [1, 2] – это значение лингвистической переменной, функция принадлежности которой достигает своего экстремума *(μ(u) = 1)* на левой границе интервала изменения базовой переменной (рис. 4.);

«Правосторонний» лингвистический терм – это значение лингвистической переменной, функция принадлежности которой достигает своего экстремума *(μ(u) = 1)* на правой границе интервала изменения базовой переменной (рис. 5).

Предположим, что имеется две функции принадлежности, построенные для оценки признака, описываемого «левосторонним» лингвистическим термом «выражено слабо».

Первый способ вычисления *PS* предлагается проводит аналогично рассмотренному выше выражению. В случае, если функции принадлежности не имеют точек пересечения кроме крайних, определение *PS* можно осуществлять как:

$$PS = \frac{\left|u^1_{\mu 0.5} - u^2_{\mu 0.5}\right|}{range(u)}, \qquad (4)$$

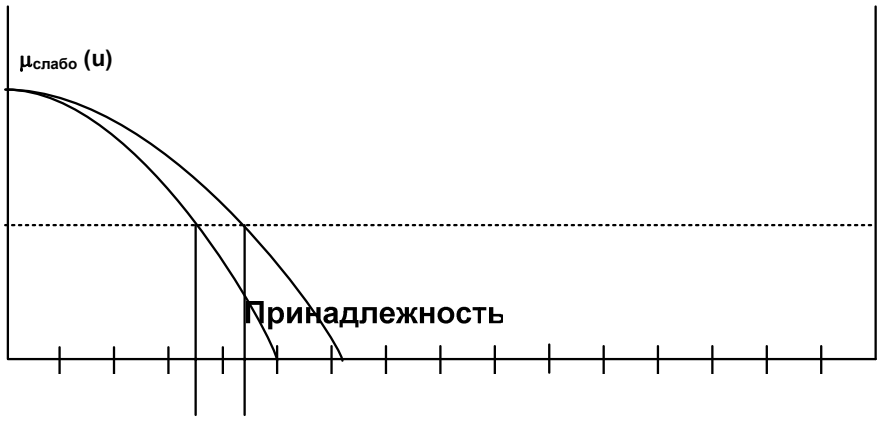


Рис. 4. «Левосторонний» лингвистический терм «Лидерство»

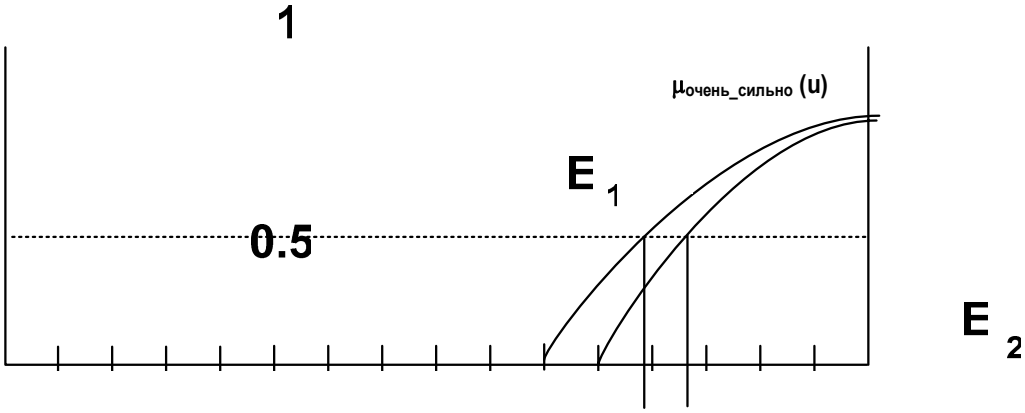


Рис. 5. «Правосторонний» лингвистический терм «Лидерство»

где $u^1_{\mu 0.5}, u^2_{\mu 0.5}$ - значения базовых переменных для первого и второго эксперта, при которых функции принадлежности принимают значение 0.5.

Для функции принадлежности граничных «правосторонних» лингвистических термов PS рассчитывается аналогичным образом.

Вычисленная оценка согласованности сравнивается с экспертно определенным для рассматриваемой задачи порогом согласованности. В случае превышения этого порога целесообразно предложить группе экспертов пересмотреть свои оценки (с предоставлением каждому функций принадлежности других экспертов) до тех пор, пока оценка согласованности не будет превышать заданный порог.

Согласование мнений экспертов

Следующим этапом является согласование мнений экспертов и построение результирующей функции принадлежности. Наиболее простым и адекватным способом является алгебраическое ус-

реднение функций принадлежности экспертов. В этом случае результирующая функция принадлежности для значения u_i на базовой шкале примет вид:

$$\mu^{рез}(u_i) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mu(u_i) \qquad (5)$$

где $\mu^{рез}(u_i)$ - результирующая функция принадлежности базовой переменной для всех точек диапазона изменения данного лингвистического терма; n – число экспертов, участвующих в процедуре.

В случае, когда экспертам приписаны различные весовые коэффициенты (предположим, что эти коэффициенты пронормированы, т.е. $\sum_{i=1}^{n} q_i = 1, q_i > 0$), значение результирующей функции принадлежности для значения u_i на базовой шкале примет вид:

$$\mu^{рез}(u_i) = \sum_{i=1}^{n}\mu\ (u_i)q_i \qquad (6)$$

где q_i - весовой коэффициент *i-го* эксперта.

Следует заметить, что при построении результирующей функции принадлежности указанными способами, она, как правило, теряет свойства «нормальности». В этом случае после построения результирующей функции принадлежности ее нужно нормализовать.

Таким образом, согласование субъективных измерений группы экспертов позволяет преодолеть неточность измерений экспертов, а механизмы для работы с лингвистическими переменными позволяют преодолеть нечеткость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляцкий Н.П.* Интеллектуальная техника менеджмента. – Минск: ООО «Новое знание», 2001.
2. *Борисов А.Н.* Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования. – Рига: Зинатне, 1990.
3. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и ее применение к понятию приближенного решения. – М.: Мир, 1976.
4. *Нечеткие* множества в моделях управления и искусственного интеллекта. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б., Под ред. Поспелова Д.А. – М.: Наука, 1986.

Коротко об авторах

Шевчук Любовь Юрьевна – аспирантка, кафедра «Автоматизированные системы управления» (АСУ) Московский государственный горный университет.

© М.Ю. Соболева, 2006

УДК 622.272

М.Ю. Соболева

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Зная важность угольной промышленности для экономики нашей страны на современном уровне ее развития, нельзя не принимать во внимание состояние угледобывающих предприятий, организацию производственного процесса на шахтах. Добыча угля подземным способ представляет собой комплекс работ по подготовке, креплению, поддержанию выработок, очистной выемке угля, его транспортировке до места назначения.

Казалось бы, что при современном развитии научно-технического прогресс-са, когда вычислительная техника может выполнить расчеты любой сложности, таким образом позволяя реализовать практически любую модель любого технологического процесса, угледобывающая промышленность должна выйти на практически безотходное и довольно дешевое производство сырья хотя бы за счет повышения эффективности процессов. К сожалению, это совсем не так. До сих пор велик процент простоя оборудования из-за аварий (отсутствие своевременно проведенных профилактических работ), из-за отсутствия фронта работ (не рационально спланировано время подготовки выработок и т.п.) и др. При этом следует учитывать, что данные временные потери являются практически следствием только неправильного планирования проведения добычных работ.

Данная работа посвящена задаче оптимального распределения оборудования в очистных забоях с тем, чтобы наиболее рационально использовать машинный парк горного предприятия с учетом того, что шахта является динамически развивающейся в пространстве и времени структурой. Рассматриваемая задача не является новой, но будет сделана попытка освятить ее с новой стороны.

Рассмотрим существующие методы оптимизации проведения очистных работ. Для проведения очистных работ используется оборудование разного вида: механизированные крепи, комбайны, механизированные комплексы. При распределении оборудования по забоям принято составлять различные варианты распределения, а затем сравнивать их по критериям, в основе которых лежит следующий перечень показателей: минимальная себестоимость, максимальная производительность, минимальные приведенные затраты, минимальный срок подготовки. Поэтому выбор метода оптимизации зачастую является лишь выбором того или иного **критерия оптимальности**. Недостаток этого метода заключается в одностороннем подходе при решении задач, при этом есть возможность не учесть другие важные критерии. При многокритериальном подходе задача может свестись во-первых к учету множества разнонаправленных критериев, и во-вторых в их многочисленности и равноценности.

Методы математической логики. Для решения задачи данными методами понадобится построить модель для конкретной ситуации, что не целесообразно

при планировании очистных работ, так как количество различных ситуаций, которые могут возникнуть во время работ, нельзя заранее оценить даже приблизительно.

Все вышеперечисленные методы выбора оптимальной схемы проведения очистных работ не учитывают временной фактор, к тому же производится расчет показателей эффективности не для всего комплекса, а для конкретного очистного забоя. Но вариантный подход к выбору наилучшего комплекса оборудования для конкретной лавы может быть неприменим в реальных условиях вследствие несовпадения сроков демонтажа, моментов поступления «лучшего» оборудования и необходимой даты пуска в работу новой лавы. Таким образом, эффективность использования имеющегося оборудования должна оцениваться не с позиции наилучшего оборудования для одного забоя, а с позиции наиболее эффективного распределения всего имеющегося оборудования между всеми забоями.

Сетевое моделирование. Задача распределения оборудования между забоями может быть решена методами сетевого моделирования. Сетевые модели обладают многими преимуществами, но особенно эффективно решают поставленную задачу, если заранее точно известна последовательность протекающих процессов. При попытке же описания всех процессов проведения очистных работ, потребуется построить огромное количество частично упорядоченных графов, соответствующих отдельным вариантам и вариациям некоторых параметров. Без предварительного упорядочивания значительной части работ построение и реализация множества сетевых моделей практически невозможны, а выбор упорядоченных работ в свою очередь зависит от квалификации и опыта исполнителя [1].

Задача о назначениях. При распределении оборудования между забоями также используются методы, применяемые в задачах о назначении, в которых общая постановка задачи звучит так: имеется m взаимозаменяемых типов оборудования (механизированные комплексы) и n объектов работ (очистные забои), известны эффективности использования комплексов в каждом забое (затраты или среднесуточная добыча угля). Необходимо выбрать такой план назначения каждого комплекса только в одну лаву, чтобы заданная функция эффективности была оптимальной [1]. При этом, принимая во внимание, что очистные работы – это постоянно меняющиеся во времени процессы, задача о назначениях решается с заданной периодичностью, учитывая текущее состояние всех производственных процессов.

Но повторное применение задачи о назначениях только в определенно заданные промежутки времени не приведет к достоверным результатам, так как при данном подходе невозможно учесть такие моменты, как простои оборудования, время, затраченное на монтаж и демонтаж, проведение профилактических работ. Кроме того, каждый забой отрабатывается не зависимо от других, что обеспечивает его временную независимость от работ, проводимых в других забоях. В связи с этим применение задач о назначениях при выборе оптимального распределения оборудования также может не привести к получению наиболее эффективного плана распределения.

Имитационное моделирование. В настоящее время суточная производительность длинных очистных забоев рассчитывается преимущественно по методикам ИГД им. А.А. Скочинского, в которых либо используются нормативы

нагрузки [2], либо расчёт ведётся по эксплуатационной производительности отдельных элементов механизированного комплекса: ком-байна, забойной крепи и конвейера [3].

Производительность «скомпонованных» комплексов позволяет определять методика [3]. Однако при определении производительности комбайна необходимо знать коэффициент машинного времени, который, в свою очередь, невозможно рассчитать из-за отсутствия нормативов для современного оборудования. В связи с этим сейчас поступают следующим образом: либо приближённо задаются среднеотраслевым значением, либо принимают его равным отношению скорости подачи комбайна при отбойке угля к скорости при зачистке лавы. При этом получается, что производительность не зависит от длины лавы.

Ни в одной из существующих методик при расчёте производительности реально не учитываются технологические простои, определяемые взаимосвязью и последовательностью процессов выемки, передвижки конвейера, крепления лавы и сопряжений. Чтобы оценить влияние простоев на производительность при различных вариантах технологической схемы, необходимо исследовать поведение оборудования очистного комплекса в динамике. В подобных случаях эффективно применяется имитационное моделирование с использованием проблемно-ориентирован-ных имитаторов.

Из-за неучёта взаимосвязи технологических процессов при определении производительности длинного очистного механизированного забоя ошибка колеблется в пределах от 17 до 39 %. С одной стороны очевидна эффективность применения имитационного моделирования при планировании проведения очистных работ. Но с другой стороны мы видим, что имитационное моделирование также не дает нам оптимального распределения оборудования с высокой точностью, а лишь дает представление о поведении объекта в системе.

Изучение существующих методов планирования проведения очистных работ показало, что на данный момент не разработано такого метода, который бы рассчитывал оптимальные показатели проведения очистных работ с учетом особенностей характера их проведения. Как следствие необходимо разработать новые методы или же употребить совокупность уже имеющихся, с тем, чтобы максимально использовать накопленные знания и сведения для создания средств принятия максимально эффективных решений.

Итак, рассмотрим задачу, постановка которой звучит следующим образом: требуется с учетом дат поступления оборудования и сроков пуска в работу новых лав выбрать такой план распределения механизированных комплексов между забоями при одновременном выборе наилучших вариантов технологии выполнения работ, чтобы минимизировать суммарные затраты на добычу угля, при выполнении следующих условий:

$$C = \frac{\sum_j c_j d_j}{D} \to \min \qquad (1)$$

$$
\begin{cases}
c_t = \sum_i \sum_j \sum_r c_{tijr} x_{ij} y_{jr} \to \min , & (2) \\
x_{ij} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \sum_i x_{ij} = 1, \ \sum_j x_{ij} = 1, \\
i, j = 1, 2, \ldots, m, & (3) \\
y_{jr} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \sum_r y_{jr} = 1, \ j = 1, 2, \ldots, m, & (4) \\
q'_{ij} \le q_{ij} \le q''_{ij}, & (5) \\
t_{ij}^{П} \le t_j, \ i, j = 1, 2, \ldots, m, & (6) \\
\sum_i \sum_j \sum_r k_{ijr} x_{ij} y_{jr} \le K_z, & (7) \\
\sum_i \sum_j \sum_r d_{ijr} x_{ij} y_{jr} \ge D_z, & (8) \\
\sum_i \sum_j \sum_r d_{ijr} s_{ij} x_{ij} y_{jr} \le D_z S_z, \\
i, j = 1, 2, \ldots, m, \ r = 1, 2, \ldots, R_{i,j,} & (9)
\end{cases}
$$

где c_{tij} – затраты на добычу угля в забое j, оборудованном комплексом i, при выполнении варианта технологии r в момент времени t; x_{ij} =1 если комплекс i назначен в забой j, в противном случае x_{ij} =0; y_{ir} – символ включения (y_{ir}=1) варианта технологии r для забоя j или его отрицание (y_{ir}= 0); q'_{ij} – максимально допустимое количество воздуха, которое должно проходить по выработке; q''_{ij} - максимальное количество воздуха, которое можно подать на объект или пропустить по выработке; q_{ij} – количество воздуха, которое необходимо пропустить на объекте проветривания; $t_{ij}^{П}$ – момент времени, к которому необходимо обеспечить забой необходимым оборудованием; d_{ijr}, s_{ijr} – добыча и зольность угля из забоя j, оборудованного комплексом i при выполнении варианта технологии r; S_z, D_z, K_z – заданные величины зольности и добычи угля и ограничения на ресурсы.

В данной математической модели функционал (1) обеспечивает нахождение такого плана распределения оборудования при оптимальном варианте технологии выполнения работ, при котором суммарные затраты на добычу угля за весь планируемый период проведения работ были бы минимальны. Функционал (2) обеспечивает нахождение оптимального плана распределения оборудования при минимальных затратах на каждый период проведения работ.

Ограничения (3) требуют, чтобы каждый комплекс применялся только в одном забое, условия (4) определяют применение только одного варианта технологии в каждом забое, условие (5) показывает, что каждая выработка должна проветриваться, требования (6) устанавливают ограничения по времени, т.к. комплексы не могут монтироваться в лавы раньше, чем они поступят на шахту. Условия (7) - (9) ограничивают суммарное количество используемых ресурсов, устанавливают минимальный объем добычи угля во всех очистных забоях, а также ограничивают процентное содержание золы в добываемом угле.

Для решения задачи выбора наилучшего плана распределения оборудования и вариантов технологии для очистных забоев используется метод Паретто. Как известно, данный метод не всегда обеспечивает нахождение единственного оптимально решения, при этом ответственность за выбор необходимого решения велика, и ошибка может привести к неоправданным дополнительным затратам. Использование имитационного моделирования позволяет прогнозировать ход работ при различных вариантах распределения оборудования, что позволит с большей точностью выбрать оптимальное решение без дополнительных затрат. Кроме того, возникает необходимость повторного применения метода поиска наилучших вариантов по мере подготовки новых забоев и поступления оборудования. Ключевым моментом в этом процессе

является определение состояния парка технологического оборудования в момент времени подготовки нового забоя. Применение имитационного моделирования также позволяет получить требуемые временные характеристики. Моделирование процесса проведения очистных работ основывается на нижеприведенных методах.

Момент времени отработки запасов лавы j относительно начала отсчета T_0 определяется по формулам:

при оборудовании новым комплексом

$$t_i^j = t_j^{'} + t_{ij}, \qquad (10)$$

при перемонтаже комплекса i в лаву j

$$t_i^j = t_i^{'} + \tau_i^d + \tau_{ij}^m + t_{ij}, \quad i = 1, 2, \ldots, m, \quad j = 1, 2, \ldots, n, \qquad (11)$$

где τ_i^d – продолжительность монтажа оборудования; τ_{ij}^m – продолжительность монтажа оборудования i в лаву j; t_{ij} – период времени отработки запасов угля лавы j комплексом i, вычисляемый по формуле:

$$t_{ij} = \frac{L_j}{v_{ij}}, \quad i = 1, 2, \ldots, m, \quad j = 1, 2, \ldots, n, \qquad (12)$$

где v_{ij} – средняя величина скорости подвигания лавы j при ее оборудовании комплексом i; L_j – длина подготовленного столба.

$$t_{ij}^k = \frac{L_j - (T_k - T_{ij}^H) v_{ij}}{v_{ij}}, \qquad (13)$$

где $(T_k - T_{ij}^H) v_{ij}$ – участок подготовленного столба, который будет отработан за время $(T_k - T_{ij}^H)$.

С помощью формул (8)-(11) описывается исходное, заданное и произвольное состояние подсистем очистных работ на всех этапах планирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оптимальное* планирование развития горных работ на шахтах. В.В.Георгиевский. М.: Недра, 1979.
2. *Нагрузки* на очистные забои действующих угольных шахт при различных горно-геологических условиях и средствах механизации выемки. Люберцы: ИГД им. А.А. Скочинского. 1996.
3. *Прогрессивные* технологические схемы разработки пластов на угольных шахтах. ИГД СО АН, М., 1979, ч. 2.

Коротко об авторах

Соболева Марина Юрьевна – магистр, кафедра «Автоматизированные системы управления» (АСУ) Московский государственный горный университет.