УДК 622.261

к.т.н., д.э.н. Бизянов Е. Е.,
к.т.н. Смекалин Е. С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОБЗОР И ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЁТКИХ МНОЖЕСТВ В ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЁТАХ

Предложен подход для определения геотехнологических параметров в горнодобывающем производстве, который позволяет на основании использования теории и методологии нечётких множеств обосновать выбор решений в условиях неопределённости исходных данных и изменчивости организационно-технологической структуры реализуемых работ. Приведены примеры использования прямых вычислений с использованием нечётких интервалов и продукционных моделей с лингвистическими переменными для определения надёжности горнопроходческой техники и стоимости сооружения горных выработок с учётом влияния изменения скорости проходки и трудоёмкости работ.

Ключевые слова: *теория нечётких множеств, нечёткое число, нечёткий интервал, лингвистическая переменная, продукционная модель, когнитивная карта, нечёткая искусственная нейронная сеть, геотехнологические расчёты, надёжность, стоимость выработки.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Особенностями горнодобывающего производства являются динамическое изменение технологического пространства, сложная взаимосвязь подготовительных, очистных, вспомогательных работ и процессов, происходящих в массиве горных пород, случайные опасные события, такие как внезапные выбросы, горные удары, обрушение выработок и т. п. [1], что весьма затрудняет корректное аналитическое описание данной системы.

Сложность выполнения расчётов обусловлена случайным характером исходных данных (параметров месторождений, горного давления, газодинамических процессов в массиве и т. д.) [2], отсутствием возможности на этапе проектирования детально изучить весь массив пород, в котором будут сооружаться горные выработки, точно предсказать его поведение в процессе реализации проекта [3]. При этом часто в практической работе специалисты полагаются в первую очередь на опыт и интуицию, что приводит к субъективным результатам, далёким от оптимальных [3].

Джеф Кайерс выделяет следующие источники неопределённости в науках о Земле [4]:

– ошибки измерений;

– связанные с тем, что уже обработанные данные могут быть интерпретированы многими способами, причём для интерпретации нужно создавать отдельные модели;

– вызванные различными физическими явлениями, которые сами по себе являются неопределенными и оцениваются с помощью моделей;

– косвенность информации, полученной в результате геофизических или дистанционных измерений.

Модели, которые используются в настоящее время для описания различных технических объектов и процессов, в основном базируются на использовании количественной информации. При построении таких моделей требуется детализированное описание причинно-следственных связей и процессов (детерминированные модели) либо наличие значительного массива статистических данных о результатах функционирования исследуемого объекта.

При решении геотехнологических задач часть исходных данных может быть представлена в точной числовой форме: «длина горной выработки составляет 1000 метров»; часть — в виде интервала: «прочность алевролита на одноосное сжатие *в пределах* от 33 МПа до 39 МПа» [6]; или в лингвистической форме: «Среди выработок часто встречаются камеры, которые, в отличие от *протяжённых* выработок (длина *значительно* превышает поперечные размеры), имеют при *сравнительно больших* поперечных размерах *небольшую* длину» [2]. Выделенные курсивом слова характеризуют имеющуюся неопределённость.

Существующие на данный момент методики расчёта геотехнологических параметров оперируют преимущественно с точно заданными исходными данными. Для использования данных, представленных в виде интервала, а также в лингвистической форме, удобно использовать математический аппарат нечётких множеств, а также нечёткую математику, которые на сегодняшний день широко используются в технике, экономике, биологии и других областях науки [5, 7]. Особенностью нечётких моделей является возможность моделирования сложных объектов, для которых не существует детализированного описания, отсутствуют достоверные статистические данные либо их недостаточно.

Постановка задачи. Задачей данной работы является рассмотрение возможностей использования теории нечётких множеств и нечёткой математики в приложении к геотехнологическим расчётам.

Изложение материала и его результаты. Сначала рассмотрим отличия теории вероятности и математической статистики, широко использующихся в современной науке о Земле, от теории нечётких множеств, которую ещё называют теорией возможности.

С помощью понятия «вероятность» обычно описывают события, которые могут произойти в будущем, а могут и не произойти. Возможность же оценивает событие, которое обязательно произойдёт, но с определённым уровнем «успеха».

Далее рассмотрим минимально необходимые теоретические сведения из теории нечётких множеств (НМ) и нечёткой математики.

Нечётким множеством (НМ) A в некотором (непустом) пространстве $X, A \subseteq X$ называется множество пар (кортежей) вида [5]

$$A = \left\{ \left(x, \mu_A(x); \forall x \in X \right) \right\}, \qquad (1)$$

где x — элементы множества X, которое также называют универсумом; $\mu_A(x)$ — функция принадлежности нечеткого множества A.

Функция принадлежности (ФП) нечёткого множества ставит в соответствие каждому значению x число — *степень принадлежности* из интервала [0;1], то есть представляет собой отображение вида [5]

$$\mu_A(x) : X \to [0;1], \forall x \in X . \qquad (2)$$

Если степень принадлежности $\mu_A(x)=1$, говорят о полной принадлежности x к НМ A, т. е. $x \in A$. Значение $\mu_A(x)=0$ означает отсутствие принадлежности x к НМ A, т. е. $x \notin A$ [5].

Конечные НМ часто представляют в виде [5, 7]

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \ldots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}, \qquad (3)$$

где n — количество элементов нечёткого множества A.

Знак «+» в (3) не означает сумму в математическом смысле, его следует понимать как множественное суммирование элементов. Знак «——» также не означает деления, он отражает присваивание конкретным элементам $x_1, x_2, \ldots, x_n$ степеней принадлежности $\mu_A(x_1), \mu_A(x_2), \ldots, \mu_A(x_n)$.

Интерпретации функции принадлежности могут быть различными в зависимости от конкретной задачи. Можно выделить три характерных случая использования нечётких величин для представления[7]:

– исходных данных, значения которых неточно известны из-за воздействия частично неуправляемых факторов;

– данных, значения которых управляемы и зависят от предпочтений, но на момент моделирования не определены;

– лингвистических оценок.

В первом случае говорят об интерпретации функции принадлежности в терминах возможности, во втором и третьем — в терминах предпочтений.

На рисунках 1–3 приведены примеры типовых ФП. Их можно трактовать следующим образом:

– рисунок 1: а — «более чем V_1», б — «приблизительно равно V_4», в — «не более чем V_7»;

– рисунок 2: а — «от V_1 до приблизительно V_2», б — «между V_5 и V_6», в — «от приблизительно V_9 до V_{10}»;

– рисунок 3 — «приблизительно равно V_1».

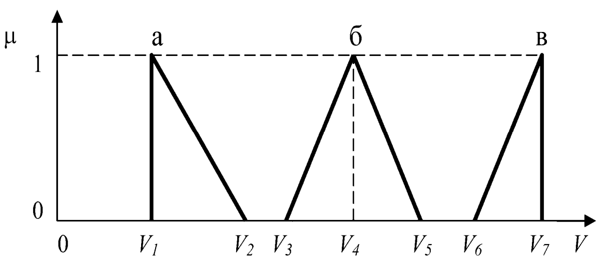


Рисунок 1 Треугольные функции принадлежности

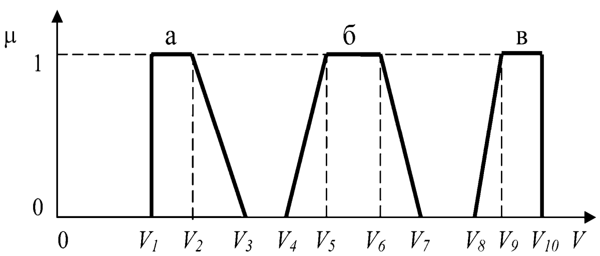


Рисунок 2 Трапецеидальные функции принадлежности

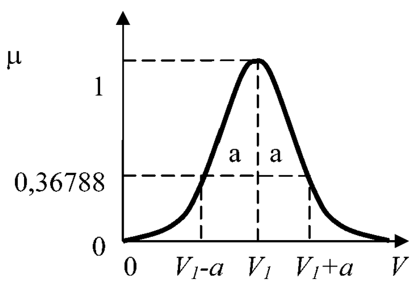


Рисунок 3 Функция принадлежности гауссовского типа

В нечётких моделях входные и выходные переменные представляют в виде нечётких множеств, которые могут быть выражены нечёткими числами и нечёткими интервалами.

Нечёткое число — это нечёткая величина, ФП которой является выпуклой и унимодальной. В качестве функции принадлежности нечёткого числа могут выступать функции, приведённые на рисунках 1 и 3. *Нечёткий интервал* — нечёткая величина с выпуклой ФП, например, одной из приведённых на рисунке 2. Для упрощения работы с нечёткими числами и нечёткими интервалами их функции принадлежности принимают нормальными (μ_{max}=1).

Использование L-R-представления (Left-Right — левая и правая часть нечёткого числа) [5] позволяет упростить базовые операции для нечётких чисел и нечётких интервалов. Так, если функции принадлежности двух нечётких чисел *A* и *B* имеют вид, показанный на рисунке 1,б, то параметры функции принадлежности их суммы следующие [5]:

$$\begin{aligned} &m_{A+B} = m_A + m_B, \\ &m_{A+B} - \alpha_{A+B} = (m_A - \alpha_A) + (m_B - \alpha_B), \quad (4) \\ &m_{A+B} + \beta_{A+B} = (m_A + \beta_A) + (m_B + \beta_B), \end{aligned}$$

где m_A, m_B — моды нечётких чисел *A* и *B* (V_4 на рис. 1,б) соответственно;

α_A, α_B — левая часть нечётких чисел *A* и *B* (V_4–V_3 на рис. 1,б) соответственно;

β_A, β_B — правая часть нечётких чисел *A* и *B* (V_5–V_4 на рис. 1,б) соответственно.

Разность *A* и *B* с использованием L-R-представления [5]:

$$\begin{aligned} &m_{A-B} = m_A - m_B, \\ &m_{A-B} - \alpha_{A-B} = (m_A - \alpha_A) - (m_B - \alpha_B), \quad (5) \\ &m_{A-B} + \beta_{A-B} = (m_A + \beta_A) - (m_B + \beta_B). \end{aligned}$$

Произведение *A* и *B* с использованием L-R-представления [5]:

$$\begin{aligned} &m_{A\times B} = m_A \times m_B, \\ &m_{A\times B} - \alpha_{A\times B} = (m_A - \alpha_A) \times (m_B - \alpha_B), \quad (6) \\ &m_{A\times B} + \beta_{A\times B} = (m_A + \beta_A) \times (m_B + \beta_B). \end{aligned}$$

Частное A и B с использованием L-R-представления [5]:

$$\begin{aligned} & m_{A\div B} = m_A \div m_B, \\ & m_{A\div B} - \alpha_{A\div B} = (m_A - \alpha_A) \div (m_B - \alpha_B), \\ & m_{A\div B} + \beta_{A\div B} = (m_A + \beta_A) \div (m_B + \beta_B). \end{aligned} \quad (7)$$

Важной особенностью теории нечётких множеств является возможность моделирования лингвистических переменных, что часто необходимо при интерпретации экспертных оценок. Лингвистическая переменная отличается от числовой переменной тем, что в качестве её значений используются слова, выражения или предложения, что позволяет приближённо описать явления, которые или сложны, или не могут быть выражены в точной количественной форме, или их значение неизвестно [7].

Лингвистическая переменная является переменной более высокого порядка, чем нечёткая переменная, так как её значения интерпретируются нечёткими множествами. Её формально определяют как кортеж вида [5, 7]: $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, где β — имя лингвистической переменной; T — базовое терм-множество (множество её значений — термов, каждый из которых является нечёткой переменной α); X — область определения нечётких переменных, определяющих термы; G — синтаксическая процедура, определяющая механизм образования новых значений из множества T; M — семантическая процедура, позволяющая получить для каждого нового значения, полученного с помощью процедуры G, новое нечёткое множество, имеющее осмысленное содержание.

Содержимое терм-множества обычно ограничено несколькими значениями, определяющими приблизительное описание исследуемого параметра в определённой предметной области.

Рассмотрим лингвистическую переменную, определяющую запас полезного ископаемого в месторождении ($З_{ПИ}$), целесообразный для начала его промышленной разработки. Для данной переменной:

β = «Запас полезного ископаемого»;

T = {низкий, достаточный, высокий};

X = [0,100] — обеспеченность в %;

G содержит связки «И», «ИЛИ» и модификаторы типа «очень», «НЕ», «слегка» и т. п., позволяющие получать новые термы;

M — процедура задания на области определения X нечётких переменных α_1 = «низкий», α_2 = «достаточный» и α_3 = «высокий», а также нечётких множеств для термов *G(T)* с использованием модификаторов и связок.

На рисунке 4 показан пример функций принадлежности для лингвистической переменной, состоящей из нечётких переменных α_1, α_2, α_3.

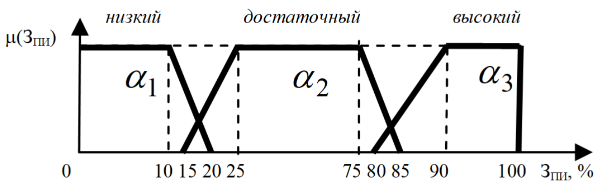


Рисунок 4 Лингвистическая переменная β

Рассмотрим методы и модели, использующие нечёткую математику и нечёткую логику, которые целесообразно использовать для решения задач.

Прямые вычисления. Использование прямых вычислений предполагает наличие расчётных формул для исследуемых показателей. Исходные данные обычно представляют в виде треугольных нечётких чисел или нечётких интервалов [7].

Рассмотрим, как реализуется данный подход на примере расчёта коэффициента готовности проходческого комбайна [6]:

$$K_Г = \frac{\textit{Наработка на отказ}}{\textit{Наработка на отказ} + \textit{Восстановление}}. \quad (8)$$

Пусть *Наработка на отказ* (НО) и *Наработка на отказ* + *Восстановление* (ОВ) — нечёткие интервалы (рис. 5).

Параметры функций принадлежности примем следующие (в минутах): a=580, b=620, c=850, d=950, e=500, f=530, g=650, h=700. Результат вычисления коэффициента готовности проходческого комбайна с использованием формулы (8) показан на рисунке 6.

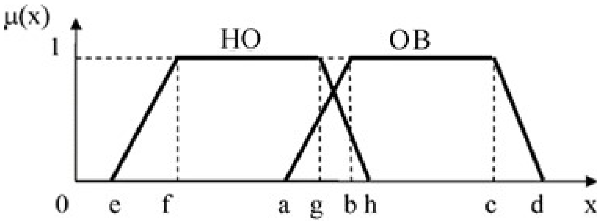


Рисунок 5 Функции принадлежности исходных показателей

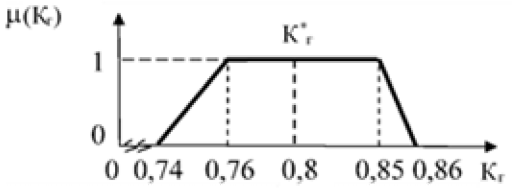


Рисунок 6 Результат расчёта коэффициента готовности

Полученный нечёткий интервал уже даёт представление о возможном диапазоне значений коэффициента готовности. Дефаззификация (приведение нечёткого значения к чёткому) с использованием метода центра тяжести [5] даёт числовое значение $К_Г$:

$$K_Г^* = \frac{\sum_i K_{Гi} \cdot \mu(K_{Гi})}{\sum_i \mu(K_{Гi})} = 0{,}80. \qquad (9)$$

Достоинство метода прямых вычислений состоит в его простоте и наглядности. Недостатком является необходимость наличия расчётной формулы, т. е. явной связи между показателями, входящими в формулу.

Нечёткие продукционные модели основаны на нечётких правилах вида «ЕСЛИ *А*, ТО *В*», где *А* — предпосылка, *В* — заключение. Исходные данные сначала подвергаются фаззификации (приведению к нечёткости), затем преобразуются с использованием продукционных правил, а результат [5, 7].

Пример. Пусть имеется три лингвистических переменных, определяющих следующие показатели: *X1* — скорость проходки горной выработки, м/мес. (СП), *X2* — производительность труда проходчиков (ПТ) и *Y* — сметная стоимость готовой выработки (ССВ). Сметная стоимость выработки, в свою очередь, состоит из оплаты труда, которая зависит от его производительности, затрат на материалы и обслуживание забойных машин в сумме с накладными и общешахтными расходами. Прямой связи между показателями *X1*, *X2* и *Y* нет. Логическая связь следующая: изменение скорости проходки СП приводит к изменению производительности труда ПТ, что вызывает изменение оплаты труда и, в конце концов, изменение сметной стоимости ССВ. Необходимо оценить ССВ как функцию от ПТ и СП:

$$Y = f(X1, X2). \qquad (10)$$

Пусть все переменные определены на терм-множестве

$$T(X) = T(X1) = T(X2) = T(Y) = \{низкий\ (Н);\ средний\ (С);\ высокий\ (В)\},$$

функции принадлежности термов которого приведены на рисунке 7.

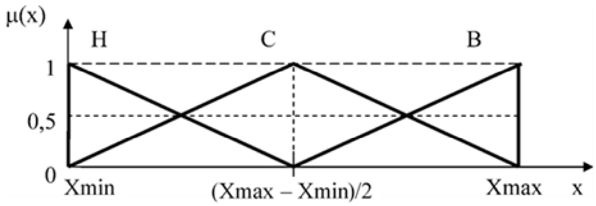


Рисунок 7 Функции принадлежности терм-множества *Т (Х)*

Возьмем для примера два произвольных значения переменных x_1 и x_2, одно из которых находится между минимальным и средним значением, а второе — между средним и максимально возможным значением:

$$x_1 = 0{,}3X_{max-min} \text{ и } x_2 = 0{,}8X_{max}, \qquad (11)$$

где x — это x_1 или x_2, X_{max}, X_{max} — их максимальные и минимальные значения.

Определим, в каком случае сметная стоимость выработки будет минимальна. Для продуцирования значения *Y*(*ССВ*) используем правило вывода Мадмани [5], которое для рассматриваемого случая запишем в виде:

$$
\begin{aligned}
&П1: Если\ СП = Н\ и\ ПТ = Н,\ То\ ССВ = Н;\\
&П2: Если\ СП = Н\ и\ ПТ = С,\ То\ ССВ = Н;\\
&П3: Если\ СП = Н\ и\ ПТ = В,\ То\ ССВ = С;\\
&П4: Если\ СП = С\ и\ ПТ = Н,\ То\ ССВ = Н;\\
&П5: Если\ СП = С\ и\ ПТ = С,\ То\ ССВ = С;\\
&П6: Если\ СП = С\ и\ ПТ = В,\ То\ ССВ = В;\\
&П7: Если\ СП = В\ и\ ПТ = Н,\ То\ ССВ = С;\\
&П8: Если\ СП = В\ и\ ПТ = С,\ То\ ССВ = В;\\
&П9: Если\ СП = В\ и\ ПТ = В,\ То\ ССВ = В.
\end{aligned} \tag{12}
$$

Соответствующие x_1, x_2 степени принадлежности следующие (см. рис. 7):

$$\mu_Н(x_1) = 0{,}4; \quad \mu_С(x_1) = 0{,}6;$$
$$\mu_В(x_1) = 0; \quad \mu_Н(x_2) = 0;$$
$$\mu_С(x_2) = 0{,}45; \quad \mu_В(x_2) = 0{,}55.$$

После выполнения операции произведения получаем:

$$\mu_Н(x_1)\cdot\mu_С(x_2) = 0{,}4\cdot 0{,}45 = 0{,}18;$$
$$\mu_Н(x_1)\cdot\mu_Н(x_2) = 0{,}4\cdot 0{,}0 = 0;$$
$$\mu_Н(x_1)\cdot\mu_В(x_2) = 0{,}4\cdot 0{,}55 = 0{,}22;$$
$$\mu_С(x_1)\cdot\mu_Н(x_2) = 0{,}6\cdot 0 = 0;$$
$$\mu_С(x_1)\cdot\mu_С(x_2) = 0{,}6\cdot 0{,}45 = 0{,}27;$$
$$\mu_С(x_1)\cdot\mu_В(x_2) = 0{,}6\cdot 0{,}55 = 0{,}33;$$
$$\mu_В(x_1)\cdot\mu_Н(x_2) = 0\cdot 0 = 0;$$
$$\mu_В(x_1)\cdot\mu_С(x_2) = 0\cdot 0{,}45 = 0;$$
$$\mu_В(x_1)\cdot\mu_В(x_2) = 0\cdot 0{,}55 = 0.$$

Использование наиболее распространённого в нечёткой логике оператора объединения, который учитывает степень оптимизма в оценке результата — непараметризованной s-нормы максимума [5], даёт

$$MAX(\mu(x_1)\cdot\mu(x_2)) = \mu_С(x_1)\cdot\mu_В(x_2) = 0{,}33.$$

Этому результату соответствует правило П6 (12) — т. е. эффективное значение ССВ можно получить при среднем значении СП и высоком значении ПТ. Для оценки величины ССВ применим оператор импликации Мадмани и получим нечёткое число, показанное на рисунке 8.

Дефаззификация с использованием центра тяжести даёт

$$Y = f(X1, X2) = 0{,}83\cdot Y_{\max}, \tag{13}$$

где $Y_{\max}$ — расчётная максимальная сметная стоимость строительства выработки.

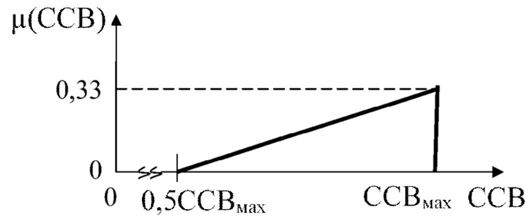


Рисунок 8 Результат нечёткого вывода

К достоинствам продукционных моделей относятся совместное использование числовых и лингвистических данных, а также возможность получения оценки в случае математически несвязанных исходных данных. Недостатком можно считать многообразие способов нечёткого вывода и дефаззификации, что требует наличия определённого опыта и специальных знаний у разработчика моделей.

Нечёткие регрессионные модели базируются на линейных либо нелинейных уравнениях [7] и используются для получения прогнозных значений показателей в диапазоне возможных значений факторов. Уравнение линейной множественной регрессии в матричной форме:

$$\vec{Y} = \mathbf{A}\cdot\vec{X} + \vec{L}, \tag{14}$$

где $\vec{Y}$ — вектор зависимых переменных; $\vec{X}$ — вектор независимых переменных модели; $\mathbf{A}$ — матрица коэффициентов уравнений; $\vec{L}$ — вектор ошибок.

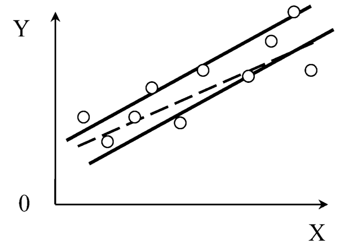
Представление коэффициентов a_{ij} матрицы $\mathbf{A}$ треугольными симметричными нечёткими числами вида

$$a_{ij} = \left(a_{ij}^C - b_{ij}, a_{ij}^C, a_{ij}^C + b_{ij}\right), \tag{15}$$

где a_{ij}^C — центр (мода) нечёткого числа; b_{ij} — половина носителя нечёткого числа, позволяет представить зависимость $Y(X)$ в виде «коридора» возможных значений, как показано на рисунке 9.

Для получения оценок модели используют метод наименьших квадратов, интервальную оценку, нечёткую кластеризацию [7].

В отличие от регрессии с чёткими коэффициентами нечёткая регрессия позволяет получить диапазон возможных значений, обеспечивая охват области исходных данных, что является достоинством метода.



– – – четкие коэффициенты
—— нечеткие коэффициенты
○ точки данных

Рисунок 9 Гипотетические регрессионные фунции при чётких и нёчетких коэффициентах регрессии

Нечёткие когнитивные карты (модели) отражают представление специалистов, работающих с определённой проблемой, в виде схемы взаимодействия объектов предметной области и позволяют смоделировать предметную область в виде пространственной схемы. На настоящий момент выделяют такие разновидности когнитивных карт: однослойные и многослойные, детерминированные и стохастические, нечёткие, динамические и статические, управляемые и неуправляемые. Это далеко не полный перечень разновидностей когнитивных карт, и он постоянно пополняется [7].

Различают нечёткие когнитивные карты Коско и Силова, отличающиеся правилами формирования выходного результата. Карты Коско основаны на введении нечёткости связей между концептами, в картах Силова нечёткими являются как связи, так и концепты.

При создании когнитивных моделей используются как научные знания, так и личное представление (опыт) разработчиков. Когнитивную модель изображают в виде знакового ориентированного графа (см. рис. 10) или представляют матрицей, в ячейки которой заносят знаки или коэффициенты, отображающие отношения между объектами модели (концептами).

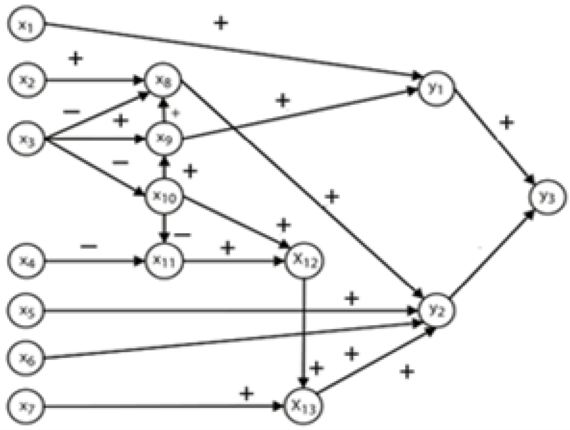


Рисунок 10 Пример когнитивной модели

Узлы графа (концепты) — это нечёткие переменные, ФП которых могут быть треугольными или трапецеидальными. Знаки «+» и «–» показывают влияние концептов друг на друга: например, при увеличении x_1 увеличивается y_1. Оценка значений концептов производится или путём расчёта, или с использованием продукционных правил.

Достоинствами нечётких когнитивных карт являются простота их разработки и применения, возможность одновременного использования количественных и качественных данных. Основной недостаток — низкая точность получаемых с их помощью результатов.

Нечёткие искусственные нейронные сети (НИНС) позволяют объединить возможности нечётких моделей и искусственных нейронных сетей. Известны следующие структуры НИНС: продукционные, с нечёткой структурой и сети на базе нечётких нейронов [7].

Нечёткие искусственные нейронные сети позволяют получить средневзвешенное значение выходной переменной, при этом обеспечивая дополнительные нелинейные возможности в виде данных для регрессионного анализа.

К достоинствам нечётких нейронных сетей следует отнести: прозрачность структуры, однозначную зависимость выхода от входа, простоту алгоритма обучения. Недостатком можно считать меньшую гибкость по сравнению со стандартными структурами искусственных нейронных сетей.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Ценность рассмотренных методов описания геотехнологических процессов состоит в том, что в условиях неопределённой ситуации производства горных работ можно дать адекватную количественную и качественную оценку изменчивых параметров, существенно сократив затраты труда и времени на определение вероятностных показателей методами математической статистики, а также упростив композиционирование полученных законов распределения для получения значений целевых функций.

На основании проведённого обзора моделей, полученных на основании теории нечётких множеств, можно рекомендовать использовать расчётные, продукционные модели и нечёткие искусственные нейронные сети на этапе анализа исходной геотехнической информации; нечёткие регрессионные модели, нечёткие временные ряды и нечёткие когнитивные карты — как при анализе, так и при разработке проектов и прогнозировании деятельности горнодобывающих предприятий.

Использование данных методов позволит обосновать реальную структуру горных работ и рассчитать значения геотехнологических параметров, которые будут соответствовать фактическим условиям. Разработанные на основе методов нечётких множеств программные продукты позволят оперативно реагировать на происходящие изменения организации и технологии работ, либо предвидеть возможные возмущения в пространстве и во времени за весь период реализации проекта в заданных пределах возможностей.

Библиографический список

1. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли [Текст] / Под ред. К. Н. Трубецкого. — М. : Изд-во Академии горных наук, 1997. — 478 с.

2. Литвинский, Г. Г. Расчёт крепи горных выработок на ЭВМ [Текст] : учеб. пособ. / Г. Г. Литвинский, Э. В. Фесенко, Е. В. Емец. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — 174 с.

3. Быков, А. В. Использование нечётких множеств в геологии [Текст] / А. В. Быков, В. Э. Борзых // Вестник Тюменского государственного университета. — Тюмень, 2009. — № 6. — С. 185–191.

4. Caers, Jef. Modeling Uncertainty in the Earth Sciences [Text] / J. Caers. — Oxford : John Wiley & Sons Ltd.,2011. — 229 p.

5. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление [Текст] : пер. с англ. / А. Пегат. — М. : БИНОМ ; Лаборатория знаний, 2011. — 798 с. : ил.

6. Торбин, В. У. Надёжность и эффективность в технике [Текст] : справочник. В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / В. У. Торбин и др.; под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. — М. : Машиностроение, 1988. — 328 с.

7. Бизянов, Е. Е. Нечёткие модели и нейронные сети в анализе и управлении экономическими объектами [Текст] : монография / [Е. Е. Бизянов, Ю. Г. Лысенко, А. Г. Хмелев и др.] ; под. ред. чл.-корр. НАН Украины, д.э.н., проф. Ю. Г. Лысенко. — Донецк : Юго-Восток, 2012. — 388 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г., д.т.н., проф. каф. РМПИ ДонНТУ Новиковым А. О.

Статья поступила в редакцию 30.05.18.

к.т.н., д.е.н. Бізянов Є. Є., к.т.н. Смекалін Є. С. *(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)*

ОГЛЯД І МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН В ГЕОТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗРАХУНКАХ

Запропоновано підхід для визначення геотехнологічних параметрів в гірничо-видобувному виробництві, який дозволяє на підставі використання теорії та методології нечітких множин обґрунтувати вибір рішень в умовах невизначеності вхідних даних і мінливості організаційно-технологічної структури гірничих робіт. Наведено приклади використання прямих обчислень з використанням нечітких інтервалів і продукційних моделей з лінгвістичними змінними для визначення надійності гірничопрохідницької техніки і вартості спорудження гірничих виробок з урахуванням впливу зміни швидкості проходки і трудомісткості робіт.

Ключові слова: *теорія нечітких множин, нечітке число, нечіткий інтервал, лінгвістична змінна, продукційна модель, когнітивна карта, нечітка штучна нейронна мережа, геотехнологічні розрахунки, надійність, вартість виробки.*

Ph.D., Doctor of Economics Bizianov E. E., Ph.D. Smekalin E.S. *(DonSTU, Alchevsk, LPR)*

REVIEW AND POSSIBILITY OF USING THE THEORY OF FUZZY SETS IN GEOTECHNOLOGICAL CALCULATIONS

An approach is proposed for determining geotechnological parameters in mining production, which based on the theory and methodology of fuzzy sets enables justifying the choice of solutions under conditions of uncertainty in the initial data and the variability of the organizational and technological structure of the works implemented. Examples are given of using direct calculations with fuzzy intervals and production models with linguistic variables for determining the reliability of mining equipment and the cost of mine workings constructing, considering the effect of changes in the heading rate and labor input.

Key words: *fuzzy sets theory, fuzzy number, fuzzy interval, linguistic variable, product model, cognitive map, fuzzy artificial neural network, geotechnological calculations, reliability, production cost.*