УДК 519.5.510.22 (575.2) (04)

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВЗРЫВА НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

В.А. Коваленко – канд. техн. наук,
А.П. Демиденко – канд. техн. наук,
Д.Ш. Керимбаева – инженер

В статье рассматривается проблема оценки качества взрыва с использованием аппарата теории нечетких множеств. Для нахождения оценки качества взрыва авторы используют знания эксперта, формализованные с помощью продукционных правил, связывающих лингвистические переменные. Рассматриваются особенности программной реализации системы.

Введение. Для эффективного управления буровзрывными работами необходимо иметь информацию о качестве взрыва. Такая информация может использоваться как обратная связь в замкнутой системе управления. При достаточно высокой оценке качества взрыва параметры буровзрывных работ не изменяются, в противном случае необходимо их изменить. Кроме того, оценка качества взрыва может служить основой для оценки деятельности специалистов-взрывников. Связав экономическое стимулирование труда этих специалистов с оценкой деятельности, можно влиять на результаты труда. Отсюда следует вывод, что оценка качества взрыва, безусловно, актуальна.

Нечеткая модель оценки качества как задача классификации. Рассмотрим модель оценки качества, используя для этих целей задачу классификации в пространстве нечетких переменных. Пусть объект, качество которого оценивается, описывается иерархической структурой показателей. При этом q-ое свойство, характеризующее объект, описывается показателем q. Будем считать, что структура показателей состоит из H уровней. Тогда число показателей верхнего уровня $m(H)=1$, а число показателей первого уровня $m(1)=Q$. Подмножество показателей i-го уровня, от которых зависит j-ый показатель $i+1$ уровня, будем обозначать как $S^j(i)$. Задачу оценки качества сложного объекта сформулируем следующим образом. По известным значениям показателей 1-го уровня $\alpha^n_q(1), q=1,\dots,Q$ необходимо определить значение обобщенного показателя качества верхнего Н-го уровня $\alpha^l_1(H)$. Здесь верхние индексы n и l означают соответственно n-ю оценку из шкалы оценок q-го показателя 1-го уровня – $Đ_q(1)$ и l-ю оценку из дискретной шкалы оценок l-го показателя H-го уровня – $Đ_1(H)$. При этом предполагается, что значения показателей 1-го уровня могут быть получены либо с помощью инструментальных измерений, либо экспертно. Значения показателей качества, начиная со 2-го уровня и выше, должны быть получены с помощью формализованной процедуры, и при этом полученная оценка должна согласовываться с оценкой эксперта. Шкалы для измерения показателей 1-го уровня могут быть дискретными или непрерывными, а шкалы для измерения комплексных показателей, начиная со 2-го уровня, – дискретными, что вызвано ограниченными возможностями экспертов [1]. Тогда задачу оценки качества сложного объекта можно представить в виде последовательности задач нахождения комплексных оценок на каждом уровне, начиная со второго, по значениям нижележащих показателей: по значениям показателей $j(i)$, где $j(i)$ принадлежит множеству $S^q(i)$, найти оценку комплексного показателя $q(i+1)$.

Задача оценивания комплексного показателя формулируется следующим образом. Пусть задано множество градаций N проявления q-го свойства уровня $i+1$, определяемое шкалой $Đ_q(i+1) = \{\alpha^1_q(i+1),\dots, \alpha^N_q(i+1)\}$. Известно, что это свойство зависит от значений m показателей, принадлежащих $S^q(i)$. Для каждого k-го показателя i-го уровня $k(i)$ задано множество его возможных значений, определяемое шкалой $Đ_k(i)$. Множество $Y_q(i) = Đ_1(i) x\dots x\ Đ_k(i) x\dots x\ Đ_m(i)$ представляет все гипотетически возможные состояния показателей уровня *i,* от которых зависит показатель $q(i+1)$. Предполагается, что определенной интенсивности проявления q-го свойства $i+1$-го уровня соответствуют некоторые элементы из множества $Y_q(i)$. Требуется идентифицировать проявление соответствующей интенсивности свойства из $Ð_q(i+1)$ для любого состояния из $Y_q(i)$. Задача оценивания представляет собой задачу разбиения m – мерного пространства $Y_q(i)$ на N m-мерных упорядоченных областей (квантов), каждой из которых присваивают соответствующую оценку.

Разбиение пространства $Y_q(i)$ на N областей можно рассматривать как задачу классификации, при которой точки пространства $Y_q(i)$, интерпретируемые как объекты, разделяются на классы (наборы объектов) таким образом, что сходство объектов внутри класса больше, чем сходство объектов из разных классов. В рассматриваемой задаче под сходными объектами (объектами, входящими в один класс) надо понимать точки пространства $Y_q(i)$, в которых интенсивности проявления q-го свойства $i+1$-го уровня входят в одну категорию. Для разделения пространства $Y_q(i)$ на N областей будем использовать модель диагностики [2]. При этом предполагается, что для каждого диагноза (класса) существует идеальная точка, т.е. наиболее типичное состояние, которое представляют в виде центра класса. Рассматривая диагностируемое состояние как точку в пространстве показателей, вновь поступающий объект относят к тому классу, расстояние до центра которого минимально. Задачу классификации, используемую для получения комплексного показателя качества, будем решать с применением аппарата теории нечетких множеств. Это обстоятельство вызвано тем фактом, “что большинство реальных классов размыты по своей природе в том смысле, что переход от принадлежности к непринадлежности для этих классов скорее постепенен, чем скачкообразен. Так, для данного объекта x и класса F в большинстве случаев вопрос состоит не в том, принадлежит ли x к F, а в том, до какой степени x принадлежит к F” [3]. Степень выраженности (интенсивность проявления) q-го свойства $i+1$-го уровня будем измерять в шкале $Ð_q(i+1)$, множество значений которых конечно, а сами значения представляют качественные характеристики и описываются нечеткими множествами. Для описания n-ой оценки интенсивности проявления q-го свойства $i+1$-го уровня – $\alpha^n_q(i+1)$ в виде зависимости от $k(i)$ используем нечеткое множество, задав его функцию принадлежности на шкале $Ð_k(i)$. При этом значение функции принадлежности можно рассматривать в качестве характеристики степени соответствия $\alpha^l_k(i)$ оценке $\alpha^n_q(i+1)$. Количество нечетких множеств для всех показателей $k(i)$, входящих в подмножество $S^q(i)$, является одинаковым и равным числу градаций шкалы $Ð_q(i+1) = \{\alpha^1_q(i+1),\dots, \alpha^N_q(i+1)\}$. Данные нечеткие множества строятся экспертами. Для этой цели желательно использовать удобный графический интерфейс. Алгоритмы, используемые при оценке комплексного показателя $q(i+1)$, различаются в зависимости от применения.

1. Показатели i-го уровня заданы четкими значениями на своих шкалах.

2. Значения показателей i-го уровня заданы нечеткими множествами.

1. В этом случае оцениваемое состояние Ψ описывается вектором $\alpha^0(i)$, элементами которого являются четкие значения показателей i-го уровня.

$$\alpha^0(i) =(\alpha^0_1(i),\dots, \alpha^0_l(i),\dots, \alpha^0_k(i));\ \alpha^0_l(i)\in Ð_l(i);\ \{1(i)\}= S^q(i);\ l=1,2,\dots,k. \qquad (1)$$

В качестве центра класса n, соответствующего оценке $\alpha^n_q(i+1)$, примем вектор

$$\alpha^n(i) =(\alpha^n_1(i),\dots, \alpha^n_l(i),\dots, \alpha^n_k(i));\ \alpha^n_l(i)\in Ð_l(i); \qquad (2)$$

Здесь $\alpha^n_l(i)$ такое значение показателя $l(i)$, для которого функция принадлежности оценке $\alpha^n_q(i+1)$ равна единице. Значение функции принадлежности $\mu^n_q(l)$ можно рассматривать в качестве степени соответствия (близости) состояния Ψ оценке $\alpha^n_q(i+1)$ в смысле показателя $l(i)$. Интегрированную характеристику близости состояния Ψ, описываемого вектором $\alpha^0(i)$, оценке $\alpha^n_q(i+1)$ определим с помощью выражения

$$\rho^q_{\psi n}=\mu^n_q(1)*\dots*\mu^n_q(l)*\dots*\mu^n_q(k). \qquad (3)$$

Знак * может быть определен как операция нахождения минимума (в этом случае исходят из того, что степень соответствия комплексного показателя оценке $\alpha^n_q(i+1)$ не может превышать степени соответствия этой оценке каждого показателя $l(i) \in S^q(i)$); как алгебраическое произведение, являющееся более “мягкой“ интерпретацией союза “И“[4].

Проделав процедуру, описываемую выражением (3), для всех $l(i) \in S^q(i)$, в качестве искомой оценки выбираем такую, характеристика близости $\rho^q_{\psi n}$ для которой максимальна.

2. В случае, когда показатели $l(i)$ измеряются нечетко, в качестве центра класса n принима-

ется вектор, состоящий из нечетких множеств, описываемых функцией принадлежности

$$(\mu^{\alpha n}{}_{q}(1),\ldots,\mu^{\alpha n}{}_{q}(l),\ldots,\mu^{\alpha n}{}_{q}(k)). \qquad (4)$$

Здесь $\mu^{\alpha n}{}_{q}(l)$– функция принадлежности , ограничивающая нечеткое множество, соответствующее оценке $\alpha^{n}{}_{q}\ (i+1)$, на универсальном множестве $Đ_l(i)$.. Оцениваемое состояние Ψ описывается вектором $A^{\psi}(i)$, элементами которого являются нечеткие значения показателей i-го уровня.

$$A^{\psi}(i)=(\mu^{\psi}(1),\ldots,\mu^{\psi}(l),\ldots,\mu^{\psi}(k)). \qquad (5)$$

В выражении (5) $\mu^{\psi}(l)$ – функция принадлежности, описывающая нечеткое множество, соответствующее оцениваемому состоянию Ψ, на универсальном множестве $Đ_l(i)$.

В данном случае в качестве меры близости нечетких множеств можно использовать различные варианты, приведенные в литературе [3,5,6]. В работе предлагается использовать в качестве меры близости двух нечетких множеств $\mu^{\alpha n}{}_{q}(l)$ и $\mu^{\psi}(l)$ верхнюю грань пересечения функций принадлежности

$$Q(\mu^{\alpha n}{}_{q}(l), \mu^{\psi}(l)) = \sup \min [\mu^{\alpha n}{}_{q}(l); \mu^{\psi}(l)]. \qquad (6)$$

Такая процедура особенно удобна, когда функции принадлежности заданы аналитически.

При этом искомое значение определяется путем решения уравнения, полученного путем приравнивания функций $\mu^{\alpha n}{}_{q}(l)$ и $\mu^{\psi}(l)$.

С помощью выражения (6) находится степень близости каждой компоненты вектора состояния n-ой оценке. Интегрированную характеристику близости состояния Ψ оценке n можно получить, используя различные свертки [3,6]. Приоритеты критериев учитываются с помощью весовых коэффициентов. Проделав подобные вычисления для всех N оценок шкалы $Đ_q(i+1)$, как и в предыдущем случае в качестве искомой оценки выбираем ту, интегрированная характеристика близости для которой максимальна.

Использование нечеткого вывода в модели оценки качества. Задача оценки качества, использующая знания эксперта, может быть формализована использованием продукционных правил, связывающих лингвистические переменные. Большинство нечетких систем используют продукционные правила для описания зависимостей между лингвистическими переменными. Типичное продукционное правило состоит из условия (часть ЕСЛИ …) и вывода (часть ТО …). Условие может содержать более одной посылки. В этом случае они объединяются посредством логических связок И или ИЛИ. Процесс вычисления нечеткого правила называется нечетким логическим выводом и подразделяется на два этапа: обобщение и заключение. Пусть мы имеем следующее правило:

ЕСЛИ “Отклонение от оптимального среднего размера куска” = ”Очень сильно”,

И “Экологические последствия взрыва” = ”Очень сильные”,

И “Сейсмическое действие взрыва” = ”Очень сильное”,

ТО “Качество взрыва” = ”Плохое”.

На первом шаге логического вывода, который является обобщением знаний экспертов, необходимо определить функции принадлежности всего условия рассматриваемого правила. Для этого в нечеткой логике, как правило, используют два оператора: MIN(…) и MAX(…). Первый вычисляет минимальное значение функции принадлежности, а второй – максимальное значение. Когда применять тот или иной оператор, зависит от того, какой связкой соединены посылки в правиле. Если использована связка И, применяется оператор MIN(…). Если же посылки объединены связкой ИЛИ, необходимо применить оператор MAX(…). В литературе приведены и другие варианты формализации связок И и ИЛИ. Этот шаг, по сути дела, предназначен для построения модели объекта, которая в нечеткой логике представляется нечетким отношением. Пусть $X=\{x_{1,\ldots,}\ x_2\ ,\ldots,x_l\}$ и $Y=\{y_{1,\ldots,}\ y_2,\ldots,y_m\}$. *Нечетким отношением* R называется нечеткое множество, определенное на декартовом произведении X x Y, которому соответствует функция принадлежности $\mu^{R}: X \times Y \rightarrow [0, 1]$. $\mu^{R}(x, y)$ отражает соответствие $x \in X$ и $y \in Y$ нечеткому отношению

$$R = AxB = \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{m}\left(\mu^{A}(x_i)\wedge\mu^{B}(y_j)\right)/\left(x_i, y_j\right). \qquad (7)$$

Здесь $A \subseteq X, B \subseteq Y$ – нечеткие множества, заданные на универсальных множествах X и Y; ^ означает оператор MIN; ∑ – объединение элементов; $x_i \in X$; $y_j \in Y$ – дискретные значения на универсальных шкалах соответственно X и Y.

Нечеткое отношение R формируется на основе правил продукции. Для правила, приведенного выше, нечеткое отношение имеет вид

$$R = AxBxCxD = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{n=1}^{N}\left(\mu^{A}(x_i)\wedge\mu^{B}(y_j)\wedge\mu^{C}(w_k)\wedge\mu^{D}(q_n)\right)/\left(x_i, y_j, w_k, q_n\right). \qquad (8)$$

Здесь $A \subseteq X, B \subseteq Y, C \subseteq W$ – нечеткие множества, описывающие значения показателей в части ЕСЛИ (в нашем случае для всех трех показателей нечеткие множества описывают одно лингвистическое значение “Очень сильно“, но на разных универсальных множествах), $D \subseteq Q$ – нечеткое множество, описывающие значения показателей в части ТО (в нашем примере имеется одно нечеткое множество, соответствующее лингвистической оценке “Плохое“); x_i, y_j, w_k, q_n – дискретные значения на соответствующих шкалах. Полученное в результате выполнения (8) значение функции принадлежности соответствует степени совместимости условия и вывода для каждого набора (x_i, y_j, w_k, q_n) из декартового произведения XxYxWxQ. Правила, подобные вышеприведенным, формулирует специалист, хорошо знающий предметную область. Набор правил представляет собой ту информацию, на базе которой формализуется модель объекта. При этом набор правил должен удовлетворять условию полноты и непротиворечивости. Содержательно это означает, что для каждого текущего состояния (x_i, y_j, w_k, q_n) существует хотя бы одно управляющее правило, функция принадлежности которого отлична от нуля. Непротиворечивость системы правил трактуется как отсутствие правил, имеющих сходные посылки и различные или взаимоисключающие следствия. Для каждого правила из набора, сформулированного экспертом, получаем нечеткое отношение (8). Будем обозначать его индексом, соответствующим порядковому номеру правила: R_i *i=1,2,…,N,* где *N* – количество правил. Совокупность всех правил (модель оценки качества) представляется в виде обобщенного нечеткого отношения

$$R = \bigcup_{i=1}^{N} R_i \tag{9}$$

с функцией принадлежности для каждого набора $(x_i, y_j, w_k, q_n) \in X\text{x}Y\text{x}W\text{x}Q$, определяемой как

$$\mu^R(x_i, y_j, w_k, q_n) = \bigcup_{i=1}^{N} \mu^{R_i}(x_i, y_j, w_k, q_n). \tag{10}$$

Операция $\bigcup_{i=1}^{N}$ означает нахождение максимального элемента из *i=1,2,…,N.* Используя модель оценивания (9), для любого входного условия, даже не встречавшегося в правилах, сформулированных экспертом, на основе композиционного правила вывода

$$D' = (A'\text{x } B'\text{x } C') \circ R, \tag{11}$$

получим нечеткое множество D', соответствующее оценке качества. В выражении (11) знак $\circ$ означает MAX-MIN композицию, т.е. нахождения MIN по всем наборам (x_i , y_j, w_k) при определенной величине q_n. MAX в (11) берется по $q_n \in Q$. Значения A', B', C' соответствуют нечетким множествам, описывающим оцениваемую ситуацию. Полученный результат D' требует интерпретации. При этом полученный результат можно отнести к одной из оценок $D_i \subseteq Q, i = 1,2,...,L$, используя для этой цели, как и в предыдущем разделе, задачу классификации. Другой подход называется дефаззификацией и предназначен для избавления от нечеткости. Для этого существует несколько методов: метод центра максимума, метод наибольшего значения, метод центроида [3]. При использовании этого подхода на шкале оценок определяется четкое значение оценки. Как видно из (8), при нахождении нечеткого отношения используются дискретные значения на универсальных шкалах, хотя сами шкалы могут быть и непрерывными. Это вызвано особенностью алгоритма (8), который лишь в простейших случаях допускает аналитическую реализацию. Несмотря на кажущуюся простоту, построение нечеткого отношения сопряжено с вычислительными трудностями.

Пусть для описания объекта с помощью правил продукции используется 7 показателей (это совокупность входных-выходных показателей). На шкале изменения каждого показателя зададим 100 дискретных значения. Тогда, для сохранения модели объекта в виде нечеткого отношения, потребуется 100^7 байт памяти, или 10^5 Гбайт (в случае, если для функции принадлежности запоминать лишь два разряда после запятой, т.е. обходиться одним байтом). Понятно, что в настоящий момент это нереализуемо. Предлагается следующий вариант для реализации алгоритма. Пусть на шкале, разбитой на 100 дискрет, заданы пять нечетких множеств, характеризующих интенсивность проявления определенного свойства. В этом случае примерно для 20 дискрет функция принадлежности будет отлична от нуля. При выполнении первой части композиционного правила вывода (11) – реализации оператора MIN окажется, что те наборы дискретных значений декартового произведения, которые содержат дискреты, имеющие для входных данных нулевые значения функции принадлежности, также будут иметь функции принадлежности, равные нулю. Поэтому часть нечеткого отношения, содержащую дискреты, имеющие для входных данных нулевые значения функции принадлежности, можно не хранить в памяти. Таким образом, нечеткое отношение строится не на всем декартовом произведении шкал показателей, а на его подмножестве. В этом случае для рассмотренного примера, если считать, что лишь на пятой части шкалы значения функции

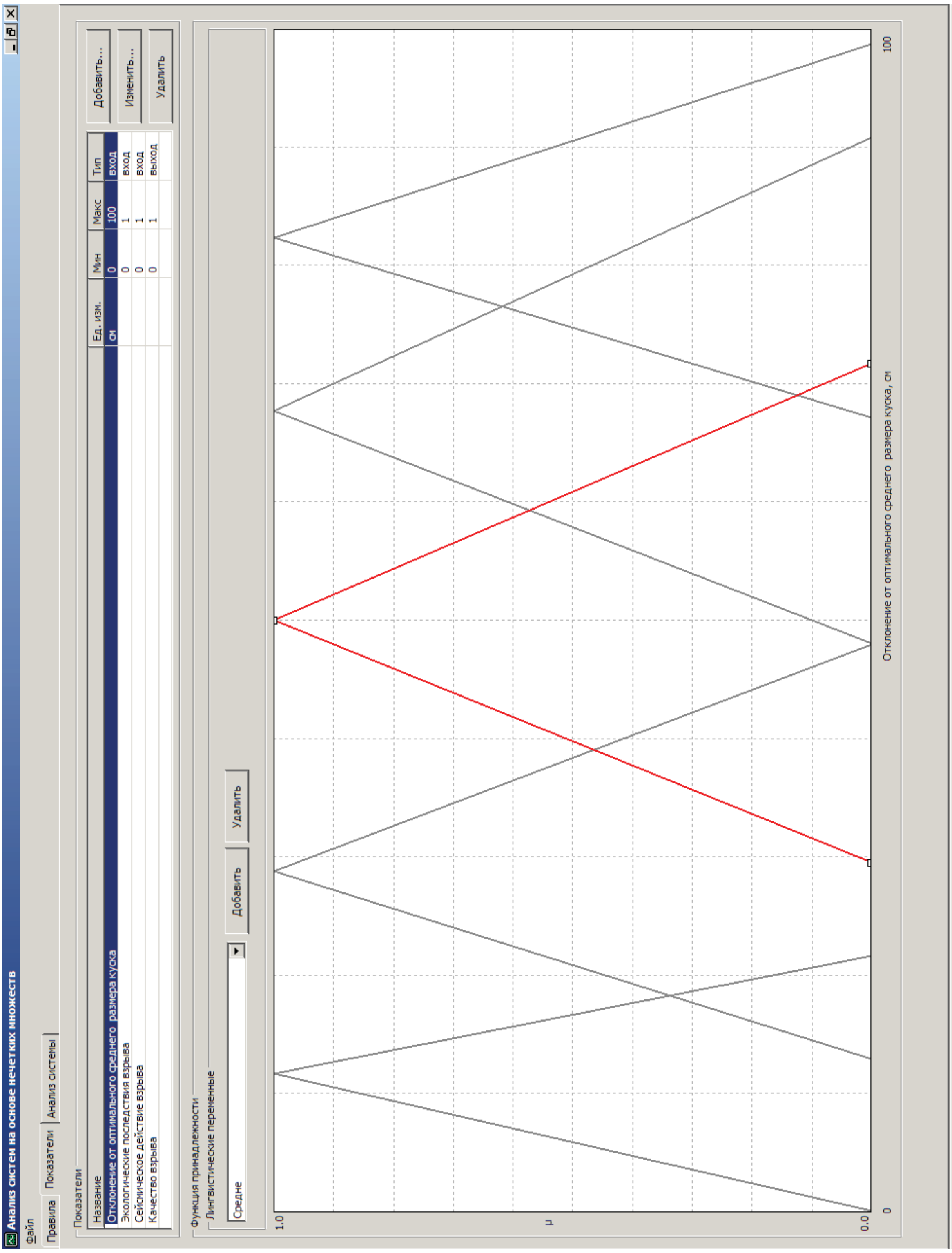

Рис.1. Выбор показателей и задание функции принадлежности.

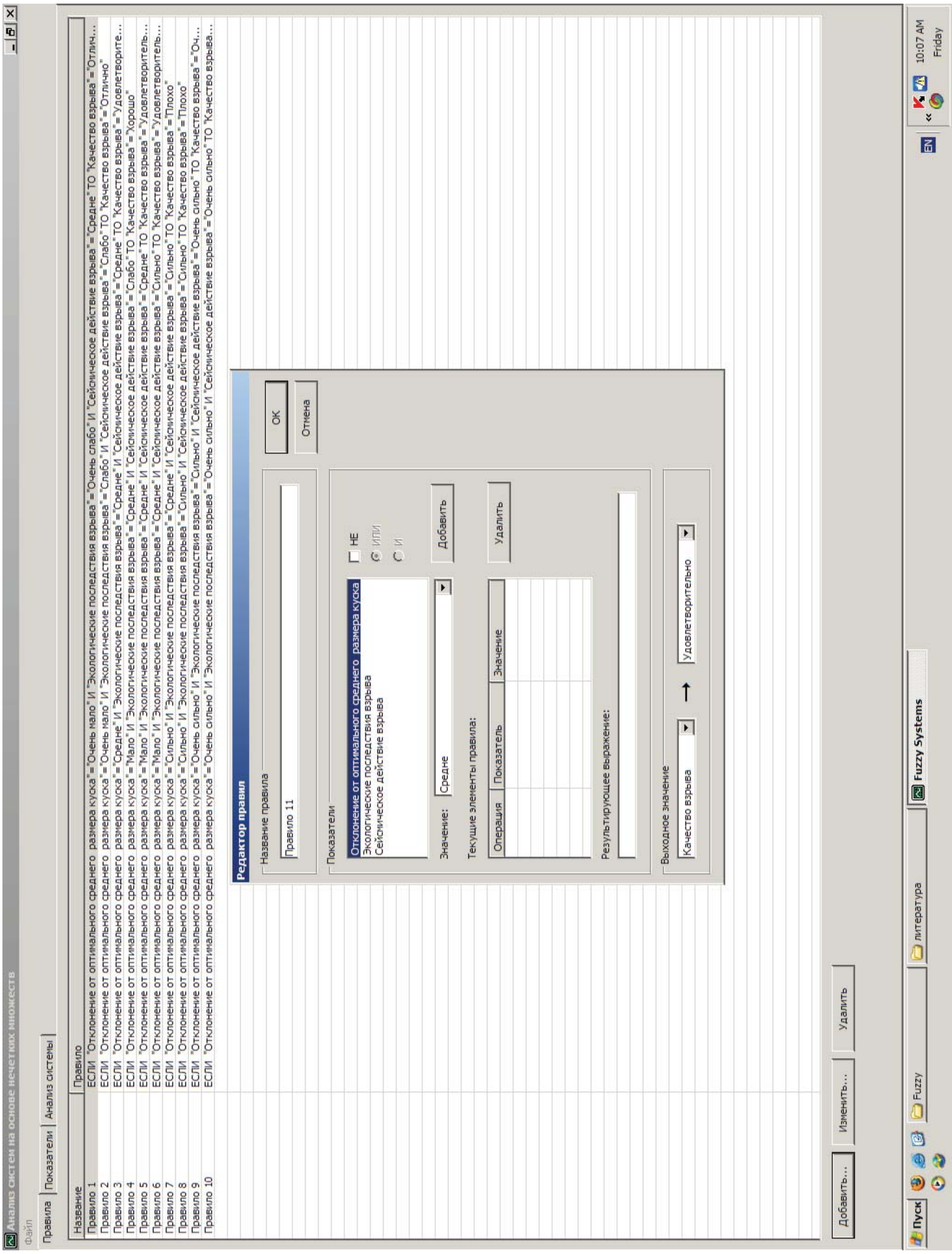

Рис. 2. Задание правил продукции.

принадлежности отличны от нуля, размер необходимой памяти будет равен 20^7, т.е. 1,3 Гбайта. Однако, выигрывая в памяти, мы проигрываем в скорости: теперь для нахождения оценки при других входных условиях, необходимо вновь находить нечеткое отношение.

Программная реализация модели. Рассмотренные идеи по оценке качества были реализованы программно. При этом использовался графический интерфейс, который в удобной форме позволяет задавать и редактировать функции принадлежности, задавать правила продукции, определять конечную оценку. Работа системы осуществляется следующим образом. При запуске системы активизируется меню, в котором выбирается раздел “ПОКАЗАТЕЛИ“. Здесь задаются и описываются показатели, которые можно добавлять, удалять, изменять. В качестве входных показателей для оценки качества взрыва выбраны следующие: “ОТКЛОНЕНИЕ СРЕДНЕГО РАЗМЕРА КУСКА ОТ ОПТИМАЛЬНОГО”, “ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВЗРЫВА”, “СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВА“. Выходной показатель – “КАЧЕСТВО ВЗРЫВА”. Здесь же для выбранного показателя задаются лингвистические значения и соответствующие им нечеткие множества (рис. 1). Количество лингвистических значений, задаваемых для каждого показателя, равно пяти. Раздел “ПРАВИЛА“ снабжен редактором правил, который позволяет добавлять, удалять и корректировать правила продукции. В нашем случае правил десять (рис. 2). Два первых этапа формируют модель системы. Раздел “АНАЛИЗ СИСТЕМЫ“ позволяет задавать входные значения в терминах лингвистических значений показателей и получать результат оценивания.

Заключение. В данной работе рассматриваются возможные подходы к задаче оценки качества взрыва. Для решения этой задачи используется аппарат теории нечетких множеств. Идеи, описанные в статье, доведены до программной реализации.

Литература

1. *Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г.* Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.
2. *Терехина А.Ю.* Анализ данных методами многомерного шкалирования. – М.: Наука, 1986. – 168 с.
3. *Заде Л.А.* Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе // Классификация и кластер. – М.: Мир, 1976. – С. 208–244.
4. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В.* Теория моделей в процессах управления. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
5. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.
6. *Заде Л.А.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 165 с.