УДК 550.8.05:510.644

СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НЕЧЕТКИХ ВЕЛИЧИН И НЕЧЕТКИХ ОТНОШЕНИЙ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ, ПРОМЫСЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Кобрунов А.И., Мотрюк Е.Н.*ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», Ухта,
e-mail: kmotryuk@yandex.ru*

В статье рассматривается применение методов нечеткого моделирования для оценки неопределенности геолого-геофизических, промысловых параметров. Необходимость применения данного аппарата связана с тем, что различные фрагменты прогнозируемой модели месторождения определяются с различной степенью надежности. Неучет этих обстоятельств повышает технико-экономические риски принятия решений о проекте разработки залежей и требует объективной оценки меры информационной обеспеченности выполненных построений. В связи с этим предлагается строить нечеткие петрофизические модели с оценкой достоверности компонент прогнозируемой модели. Построение модели включает несколько этапов, один из которых – дефазификация данных и отношений, заключающаяся в том, что с имеющимися данными сопоставляется численное значение меры доверия, выраженное в функции принадлежности. Разработаны способы построения функций принадлежности нечетких величин и нечетких отношений изучаемых параметров. Построение функции принадлежности происходит на основе карт плотностей, в которых учитывается неоднородность имеющейся информации. На основе теоретических и практических исследований наилучшим образом определяющей меру доверия является экспоненциальная функция принадлежности, выведенная из уравнения диффузии в однородной бесконечной среде с заданными начальными условиями с использованием метода Грина. В статье описан также способ выбора эффективного параметра для этих функций. При его выборе следует ориентироваться на то, чтобы поле рассеяния для моделируемой функции принадлежности покрывало исходный полигон данных на 90%. Приведен пример построения функции принадлежности для зависимости пористости по ГИС – пористости по керну и данных пористости по ГИС.

Ключевые слова: нечеткие модели, моделирование, функция принадлежности, фазификация, прогноз неопределенности, геолого-геофизические параметры, нечеткие величины, нечеткие отношения

WAYS OF CONSTRUCTING MEMBERSHIP FUNCTIONS OF FUZZY VALUES AND FUZZY RELATIONS OF GEOLOGICAL, GEOPHYSICAL, FIELD PARAMETERS

Kobrunov A.I., Motryuk E.N.*Ukhta State Technical University, Ukhta, e-mail: kmotryuk@yandex.ru*

The article discusses the use of fuzzy modeling methods for estimating the uncertainty of geological, geophysical, field parameters. The necessity of using this device is due to the fact that different fragments of the predicted model of the field are determined with varying degrees of reliability. Not taking into account these circumstances increases the technical and economic risks of making decisions about the project to develop deposits and requires an objective assessment of the information security measure of the performed constructions. In this regard, it is proposed to build fuzzy petrophysical models with an assessment of the reliability of the components of the predicted model. The construction of the model involves several stages, one of which is the de-phasing of data and relationships, which consists in matching the numerical value of the confidence measure expressed in the membership function to the available data. Methods for constructing membership functions of fuzzy variables and fuzzy relations of the parameters under study have been developed. The construction of the membership function occurs on the basis of density maps, which take into account the heterogeneity of the available information. Based on theoretical and practical research, the best determining confidence measure is the exponential membership function derived from the diffusion equation in a homogeneous infinite medium with given initial conditions using the Green method. The article also describes a method for choosing an effective parameter for these functions. When choosing it, one should be guided by the fact that the stray field for the modeled membership function covers the initial data polygon by 90%. An example is given of constructing the membership function for the dependence of GIS porosity – porosity on core and GIS porosity data.

Keywords: fuzzy models, modeling, membership function, phasing, uncertainty forecast, geological and geophysical parameters, fuzzy values, fuzzy relations

При проектировании схемы разработки месторождения используется построенная геолого-промысловая модель месторождения, основанная на структурно-фациальной и тектонической компонентах модели месторождения. Различная степень обеспеченности реальными данными, неполнота для отдельных измеренных и используемых при

прогнозировании значений параметров геофизических исследований скважин (ГИС) приводит к тому, что различные фрагменты прогнозируемой модели определяются с различной степенью надежности. Неучет этих обстоятельств повышает технико-экономические риски принятия решений о проекте разработки залежей и требует объективной

оценки меры информационной обеспеченности выполненных построений. Петрофизические модели обычно описываются регрессионными уравнениями, в которых сложно учесть неоднородность, нечеткость данных, присущих геолого-геофизическим параметрам. Решение этой задачи требует другого подхода и нового аппарата анализа данных.

Цель исследования: разработка способов построения функций принадлежности нечетких величин и нечетких отношений геолого-геофизических, промысловых параметров с использованием методов нечеткого моделирования, основы которых изложены в [1–3]. Это позволит оценивать меру неопределенности параметров при проведении прогноза и учитывать полученные результаты при разработке схем проектирования месторождений.

Материалы и методы исследования

Материалом для исследования являются геолого-геофизические, промысловые параметры, а методами исследования – аппарат теории нечетких множеств [4, 5].

Результаты исследования и их обсуждение

Первый этап прогнозирования параметров геологической модели – фазификация данных – на основе нечетких данных и нечетких отношений между переменными состоит в том, что экспериментальные данные о параметрах среды и петрофизические модели представляются в форме нечетких величин и нечетких отношений.

Фазификация отношений состоит в выражении зависимостей между нечеткими параметрами – переменными, в форме нечетких отношений. Исходными данными формирования функции принадлежности $\mu(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \mu(\mathbf{y}, \mathbf{h}), \dots, \mu(\xi, \mathbf{z})$ для отношения между нечеткими величинами $(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \dots$ служат результаты измеренных пар значений $\mathbf{s}_i = (\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i); \mathbf{g}_j = (\mathbf{y}_j, \mathbf{h}_j)$ для всех из рассма-

триваемых отношений. Для определенности выберем задачу установления отношения между нечеткими величинами $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$ на основе эксперимента $\mathfrak{A}$ приведшего к результатам $\mathbf{s}_i = (\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$, где число измерений равно n . Рассмотрения автоматически переносятся на любые другие пары. Пусть, например, $\mathbf{x}$ – экспериментально измеренная пористость по данным ГИС, $\mathbf{y}$ – пористость того же образца по керну. Полигон данных $\mathfrak{A}$, полученных в результате измерений $\mathbf{s}_i = (\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$, приведен на рис. 1, а. Картой плотности данных, или полем рассеяния для связи между параметрами называется сетка, значений плотности данных в каждой ячейке вычисляемых по правилу

$$P_{ij} = M_{ij} / n, \quad (1)$$

где M_{ij} – количество значений, попавших в ячейку, а n – количество всех измеренных значений (рис. 1, б).

Выбор аналитического вида функции принадлежности одновременно означает формирование гипотезы о причинах рассеяния экспериментальных данных в облако, для которого, конечно, можно вычислить и центр, и разброс, но оно само по себе несет еще скрытую информацию о характере неоднородности среды, приведшей к рассеянию экспериментальных данных [6, 7]. Экспоненциальная модель для нахождения аналитического вида функции принадлежности определяется из уравнения диффузии в однородной бесконечной среде с заданными начальными условиями с использованием метода Грина. Среда состоит из совокупности частей, различающихся между собой одновременными наборами параметров $\mathbf{s} \in \mathbf{S}$. Плотность концентрации элементов в этой смеси характеризуется функцией концентрации $\mu(\mathbf{s})$. Искомая функция принадлежности $\mu_{\mathfrak{A}}(\mathbf{s})$ – это итог диффузии $\mu(\mathbf{s})$, происходящей с некоторым коэффициентом a , и длящейся некоторое время τ $\mu_{\mathfrak{A}}(\mathbf{s}) = \mu(\mathbf{s}, \tau)$. Решение принимает вид

$$A[\mu(\mathbf{s}), \tau] = \frac{1}{(\sqrt{\pi}\zeta)} \int_{\mathbf{s}} \mu(\xi, \zeta_0) \cdot \exp\left(-\frac{|\mathbf{s} - \xi|^2}{\zeta^2}\right) d\xi = \mu(\mathbf{s}, \tau) = \mu_{\mathfrak{A}}(\mathbf{s}), \quad (2)$$

$$\zeta = 2a\sqrt{\tau},$$

ζ – эффективный параметр рассеяния для моделируемой функции принадлежности $\mu_{\mathfrak{A}}(\mathbf{s})$; $\mu(\xi, \zeta_0)$ – стартовое распределение источников информации, которому приписывается стартовый параметр рассеяния ζ_0 , относительно которого далее происходит выбор эффективного параметра рассеяния. Практический выбор $\mu(\xi, \zeta_0)$, определен плотностью источников поля рассеяния.

Рис. 1. Полигон данных $\mathfrak{A}$: а) зависимость «пористость по ГИС – пористость по керну» и соответствующая ей карта плотности; б) поле рассеяния для связи между параметрами; в) легенда по параметру количества данных, попавших в ячейку, г) легенда по максимальным значениям по оси Y на выбранном интервале по оси X

Определим значения $\mu_{\mathfrak{A}}^{\varepsilon}(\mathbf{s}) = \frac{\mathfrak{A}^{\varepsilon}(\mathbf{s})}{\max_{\mathbf{s}} [\mathfrak{A}^{\varepsilon}(\mathbf{s})]}$ по введенной сетке $\bigcup_i \Delta S_i = S; \bigcap_{i \neq j} \Delta S_i = \emptyset$.

Функция $\mu_{\mathfrak{A}}^{\varepsilon}(\mathbf{s})$ суть значения в ячейках ΔS_i нормированной функции рассеяния $\mathfrak{A}^{\varepsilon}(\mathbf{s})$. Таким образом, правая часть в (2) – это набор дискретных значений по ячейкам ΔS_i , так же как и искомая $\mu_{\mathfrak{A}}^{\varepsilon}(\xi, \xi_{ext})$. Принцип компактификации источников формулируется как выбор такого распределения источников $\mathfrak{A}^{\min}(\mathbf{s}^k), \mathbf{s}^k \subset \Delta S_k$ и ей соответствующей функции принадлежности с $\mu_{\mathfrak{A}}^{\min}(\mathbf{s})$, которые характеризуются минимальным числом K носителей (ненулевых значений $\mathfrak{A}^{\min}(\mathbf{s}^k)$ в покрытии ΔS_k), выбранной сеткой фазового пространства S , при условии приближенного выполнения соотношения (2). Это соответствует задаче целочисленного программирования:

$$\left\| \frac{1}{(\sqrt{\pi}\zeta)} \max_{k=1 \div K} \left[\mu_{\mathfrak{A}}^{\min}(\mathbf{s}_i) \cdot \exp \left(-\frac{|\mathbf{s} - \mathbf{s}_i|^2}{\zeta^2} \right) \right] - \mu_{\mathfrak{A}}^{\varepsilon}(\mathbf{s}) \right\|^2 \leq \varepsilon, \quad (3)$$

$K \rightarrow \min.$

Ее решение выполняется численно, перебором значений K от максимального, определенного построенными значениями $\mathfrak{A}^e(\mathbf{s})$, в ячейках сетки $\bigcup_i \Delta S_i = S; \bigcap_{i \neq j} \Delta S_i = \emptyset$, до минимального, при котором условие неравенства еще выполняется. Результат решения $\mu_{\mathfrak{A}}^{\min}(\mathbf{s}_k), k = 1 \div K$ называется картой плотности источников данных или полем источников данных. Алгоритм построения карты источников, плотности данных называется алгоритмом сжатия информации

на основе уравнения (2). Исходя из карты плотности, источников поля рассеяния, могут быть получены параметризованные эффективным параметром рассеяния ζ модели функции принадлежности для характеристики нечеткого отношения.

Для приведенного на рис. 1, а, примера полигона данных и ему соответствующей карты плотности данных (поля рассеяния), его сопоставление с соответствующей картой плотности источников поля рассеяния приведено на рис. 2.

а)

б)

Рис. 2. Сопоставление карты плотности (а) и карты источников плотности для поля рассеяния данных (б)

Рис. 3. Преобразование прогнозных данных по ГИС в функции принадлежности

Переход к плотности источников поля рассеяния позволяет существенно снизить размерность величин.

Основываясь на полученной карте плотности источников $\mu_{\alpha}^{\min}(\mathbf{s})$, по формуле

$$\max_{k=1 \div K} \frac{1}{(\sqrt{\pi}\zeta)} \mu_{\alpha}^{\min}(\mathbf{s}_k) \cdot \exp\left(-\frac{|\mathbf{s}-\mathbf{s}_k|^2}{\zeta^2}\right) = \mu_{\alpha}^{\varepsilon}(\mathbf{s}, \zeta) \quad (4)$$

рассчитываются параметризованные эффективным параметром поглощения ζ функции принадлежности $\mu_{\alpha}^{\varepsilon}(\mathbf{s}, \zeta)$ для исходных данных $\mathcal{A}$, соответствующие разной степени рассеянности, контролируемой значением коэффициента (параметра) эффективного рассеяния ζ . Выполняя моделирование функции принадлежности на фазовом пространстве S , по параметру эффективного рассеяния ζ , на основе суперпозиции функций принадлежности, построенных по полю рассеяния с минимальным числом носителей, следует учитывать изменчивость параметра ζ , в зависимости от относительной плотности источника в ячейках для поля рассеяния $\mathcal{A}^{\varepsilon}(\mathbf{s})$. В этом случае соотношение (4) должно быть обобщено:

$$\max_{k=1 \div K} \frac{1}{(\sqrt{\pi}\zeta_k)} \mu_{\alpha}^{\min}(\mathbf{s}_k) \cdot \exp\left(-\frac{|\mathbf{s}-\mathbf{s}_k|^2}{\zeta_k^2}\right) = \mu_{\alpha}^{\varepsilon}(\mathbf{s}, \zeta). \quad (5)$$

При выборе ζ следует ориентироваться на то, чтобы поле рассеяния для моделируемой функции принадлежности покрывает исходный полигон данных на 90%. Мера покрытия полем рассеяния исходного полигона служит критерием для подбора эффективного параметра рассеяния. Многочисленные эксперименты показали, что оптимально в качестве функции принадлежности брать именно экспоненциальный вид [6, 7].

Фашификация входных данных состоит в построении функций принадлежности $\mu(\mathbf{x}, \mathbf{R}_i)$ для исходного параметра – аргумента $\mathbf{x}$ в локальных интервалах $\mathbf{R}_i$, в которых будет выполняться прогнозирование на основе нечеткой петрофизической модели. Если измерена серия значений $\mathbf{x}_j, j = 1 \div N$ параметров, в одной и той же пространственной точке, то функция принадлежности $\mu(\mathbf{x}, \mathbf{R}_i)$ для $\mathbf{x}$ в точке $\mathbf{R}_i$ примет вид

$$\mu(\mathbf{x}, \mathbf{R}_i) = \max_j \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_j|^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (6)$$

где σ_i – оцененная погрешность измерений параметра $\mathbf{x}$ в точках пространства $\mathbf{R}_i$. Схема фашификации соответствует объективному

представлению данных ГИС в форме функций принадлежности, отражающих структуру и достоверность информации (рис. 3).

Пространственное положение единицы прогноза – пропластка, либо залежи, для которой приняты построенные функции принадлежности отношений и функции принадлежности параметра x , служащего основанием для прогноза, контролируется пространственной переменной R . Она не участвует в вычислительных формулах, проявляясь лишь в оценке погрешности измеренных параметров, отнесённых именно к этой точке. Пространственное положение прогнозных параметров далее используется при интерполяции моделей.

Прогнозный параметр – это параметр физико-геологической модели, который прогнозируется на основании входных данных и имеющихся связей. Это может быть пористость, проницаемость, нефтегазонасыщенность или что-либо иное. Построение графа прогноза начальных – промежуточных – прогнозных параметров является предметом отдельной статьи.

Заключение

Таким образом, результатом исследований является разработанный теоретический аппарат для построения функций принадлежности геолого-геофизических, промысловых параметров для учета неопределенности при проведении дальнейшего прогноза. Это позволит снизить технико-экономические риски принятия решений

при проектировании схемы разработки месторождений.

Список литературы / References

1. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Electrical Engineers, Proceedings of the IEE*. 1974. 121(12). P. 1585–1588.
2. Заде Л.А. Нечеткие множества // *Нечеткие системы и мягкие вычисления*. 2015. Т. 10. Вып. 1. С. 7–22.
3. Zade L.A. Fuzzy Sets // *Fuzzy Systems and Soft Computing*. 2015. V. 10. Is. 1. P. 7–22 (in Russian).
3. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. [Электронный ресурс]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (дата обращения: 28.02.2019).
4. Shtovba S.D. Introduction to the theory of fuzzy sets and fuzzy logic. [Electronic resource]. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (date of access: 28.02.2019) (in Russian).
4. Алтунин А.Е., Семухин М.В., Ядрышникова О.А. Вероятностные и нечеткие оценки запасов нефти // *Нефтепромысловое дело*. 2003. № 10. С. 54–58.
4. Altunin A.E., Semukhin M.V., Yadryshnikova O.A. Probabilistic and fuzzy estimates of oil reserves // *Oilfield business*. 2003. № 10. P. 54–58 (in Russian).
5. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств: учеб. пособие. Владимир: ВГУ, 2010. 96 с.
5. Chernov V.G. Fundamentals of the theory of fuzzy sets: studies. manual. Vladimir: VGU, 2010. 96 p. (in Russian).
6. Кобрунов А.И., Дорогобед А.Н., Кожевникова П.В. Элементы информационной экспертизы результатов геологического моделирования в нефтегазовой геологии // *Геофизика*. 2017. № 1. С. 16–21.
6. Kobrunov A.I., Dorogobed A.N., Kozhevnikova P.V. Elements of information expertise of geological modeling results in oil and gas geology // *Geofizika*. 2017. № 1. P. 16–21 (in Russian).
7. Кожевникова П.В. Моделирование связей между физико-геологическими параметрами // *Успехи современной науки*. 2017. № 8–2. С. 83–87.
7. Kozhevnikova P.V. Modeling the links between physical and geological parameters // *Advances in modern science*. 2017. № 8–2. P. 83–87 (in Russian).