

© М.М. ГАЛИУЛЛИН, А.Б. ШАБАРОВ

MMGaliullin@hotmail.ru

УДК 53.06

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ
ДЛЯ ПОДБОРА СКВАЖИН С ЦЕЛЮ
ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ
НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ**

АННОТАЦИЯ. В статье описано практическое применение теории нечетких множеств с целью поиска скважин для проведения геолого-технических мероприятий.

SUMMARY. Methodology of wells selection for production stimulation was described.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Анализ данных, теория нечетких множеств, функция принадлежности, сигмоид.

KEY WORDS. Data analysis, fuzzy set theory, membership function, sigmoid function.

За время эксплуатации нефтяных месторождений в результате выполнения ряда исследований и промышленных разработок в мире накоплен огромный опыт увеличения нефтеотдачи пластов. Современные методы воздействия на пласт условно разделяют на пять групп [1]: тепловые, газовые, химические гидродинамические и физические, каждая из которых подразделяется на 3-7 современных опробованных методов, дающих положительный эффект в определенных геолого-технологических условиях. Например, к тепловым методам относят паротепловое воздействие, внутрискважинное горение, вытеснение нефти горячей водой и другие. Исходя из принципа оптимального управления фондом скважин, для принятия решения, позволяющего достичь наилучшего экономического результата, с учетом имеющихся ограничений и фактора времени, необходимо прогнозировать последствия применения каждого метода на каждой скважине, что практически нереализуемо на крупных месторождениях. Поэтому авторами данной работы развивается подход, сводящий рассматриваемую проблему к решению двух основных задач. Первая — автоматизированный выбор скважин-кандидатов для проведения геолого-технических мероприятий (ГТМ) и вторая — выбор наилучшего по технико-технологическим и экономическим показателям метода воздействия из числа известных. Настоящая работа посвящена решению первой из этих задач.

В статье описано практическое применение одного из методов интеллектуального анализа данных (ИАД), основанного на современном математическом аппарате — теории нечетких множеств (ТНМ). В отличие от классической теории множеств, в которой используется бинарная система оценки (элемент либо принадлежит, либо не принадлежит множеству), в теории нечетких множеств используется непрерывная оценка степени принадлежности, которая изменяется постепенно и описы-

вается функцией принадлежности (ФП) [2]. Этот аппарат является наиболее удобным при обработке реальных геологических и эксплуатационно-технологических данных, которые могут иметь значительные погрешности и неточности.

Методика. В основу методики положено эмпирическое правило «20 и 80». Практически на каждом «зрелом» месторождении можно найти 20% фонда скважин, которые обеспечивают 80% годовой добычи нефти. На рассмотренном нами примере 15% самых высокодебитных скважин обеспечивают 50% годовой добычи. Примем следующую гипотезу: для высокодебитных скважин характерны определенные геолого-технологические условия. Вероятно, существуют скважины, находящиеся в схожих (аналогичных) геолого-технологических условиях с высокодебитными, но не работающие так же эффективно. Эти скважины считаем перспективными с точки зрения проведения ГТМ.

Поиск скважин, находящихся в сходных геолого-технологических условиях с высокодебитными скважинами, согласно предлагаемой методике осуществляется на трех основных этапах. На первом этапе отбираются скважины, которые по своим геологическим условиям по аналогии с высокодебитными могут иметь высокую продуктивность. На втором этапе выбираются скважины, которые имеют сочетание эксплуатационно-технологических факторов на текущую дату, аналогично высокодебитным скважинам на момент времени, предшествующий эффективному ГТМ. На третьем этапе составляется рейтинговый список скважин-кандидатов, отобранных как перспективные, одновременно как на первом, так и на втором этапе.

Практическое применение теории нечетких множеств. При обработке реальных данных, получаемых при разработке месторождений, сложно провести классификационную процедуру типа (1) и четко отнести каждый объект к определенному классу

$$I_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in A; \\ 0, & \text{если } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Поэтому для определения аналогичности условия работы скважин использована ТНМ, в которой для нечеткого подмножества, на пространстве объектов $X = \{x\}$ вводится уже не функционал вида (1), а характеристическая функция, задающая для всех элементов степень наличия некоторого свойства, по которому они относятся к множеству A . Эта характеристическая функция для нечеткого подмножества, описывающая степень принадлежности в каждой точке рассуждений называется функцией принадлежности (ФП).

С целью комплексного учета всей имеющейся геологической и эксплуатационно-технологической информации сформулированы комплексные критерии (КК), которые формируются на основе лингвистических переменных (высказываний) относительно каждого из факторов, и оценки степени принадлежности в отношении конкретного фактора. Например, если оценивать значение нефтенасыщенной толщины пласта в скважине как пример одного из факторов, влияющих на работу нефтяной скважины, можно сформулировать высказывание или утверждение «большая нефтенасыщенная толщина», и оценивать степень принадлежности к высказыванию параметра данного объекта. Численные значения этих оценок изменяются от 0 до 1, где 0 — отсутствие принадлежности, 1 — полная принадлежность, промежуточные значения — степень принадлежности. Промежуточные значения оценивались согласно ФП $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$, кото-

рая ставит в соответствие каждому элементу $x \in X$ число $\mu_A(x)$ из интервала $[0,1]$. Если же строить поиск и отбор скважин в рамках классической (булевой) логики, где выражение может принимать значение либо «истина» либо «ложь» (1), то возникает структурная проблема — определение границ, до и после которых скважина имеет подходящие значение.

В предлагаемой методике комплексировуются не сами значения факторов, а степень принадлежности (истинности) к сформулированным нечетким лингвистическим переменным (высказываниям). Такой подход позволяет, во-первых, получить единый комплексный критерий, который содержит в себе необходимые измеримые факторы, во-вторых, является достаточно гибким для принятия решения о скважинах-кандидатах для проведения ГТМ.

Полученный результат зависит от вида принимаемой функции принадлежности для каждого фактора. Поэтому важной задачей является выбор и настройка функции принадлежности.

Удобными кривыми для описания функции принадлежности являются монотонно возрастающие (2) или убывающие сигмоиды (3) (рис. 1), удобные для задания лингвистических терминов естественного языка. Уравнения сигмоид имеют вид:

$$\mu_1(x) = (1 + \exp[-a(x - b)])^{-1} \quad (2)$$

$$\mu_2(x) = 1 - (1 + \exp[-a(x - b)])^{-1} \quad (3)$$

где a и b — параметры сигмоиды, x — величина, относительно которой формулируется ФП μ . Параметр a — крутизна сигмоиды, при $a = 0$ сигмоида вырождается в прямую линию, при увеличении параметра a стремится к функции типа ступенька. Параметр b позволяет сдвигать точку центра сигмоиды по оси X . Для прохождения функции $\mu_1(x)$ через точки $[0;0]$ и $[1;1]$ сигмоиду можно модифицировать с помощью линейной функции

$$\mu_0(x) = -\mu_1(0) + [1 + \mu_1(0) - \mu_1(1)]x \quad (4)$$

то есть

$$\mu_1(x) = - (1 + \exp[-a(x - b)]) + \mu_0(x) \quad (5)$$

При этом

$$\mu_2(x) = 1 - \mu_1(x) \quad (6)$$

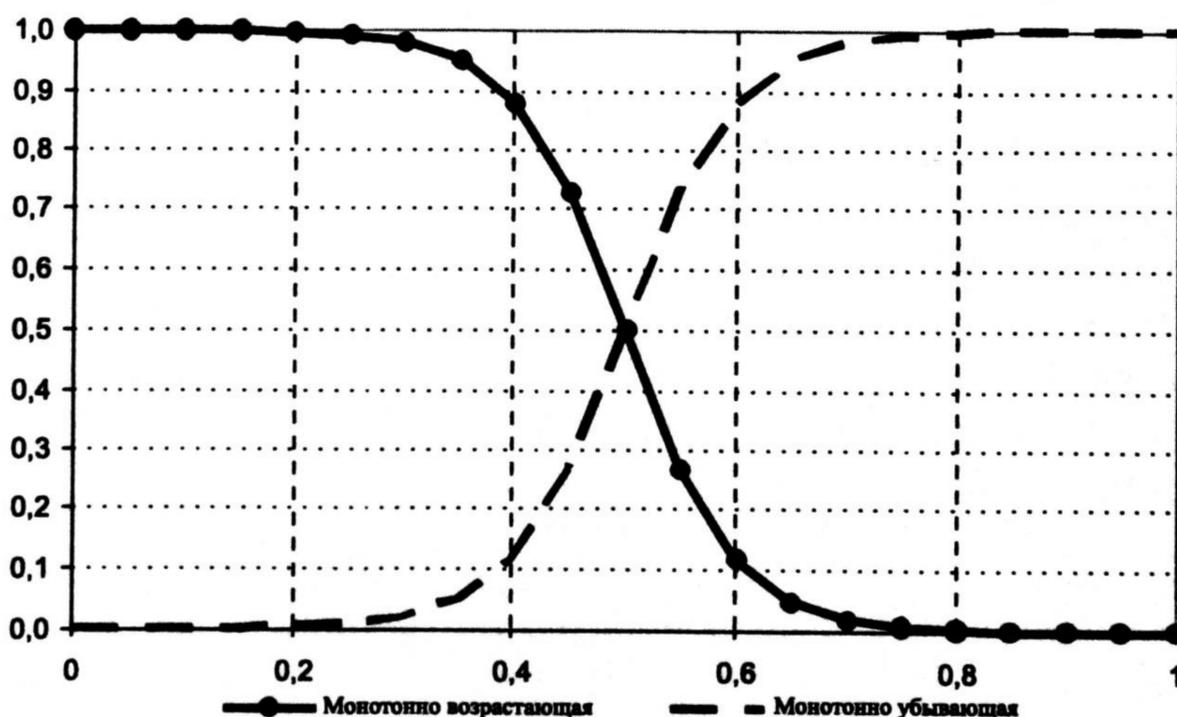


Рис. 1. Кривые класса «сигмоид»

Известны несколько способов построения ФП [4]: метод экспертных оценок, детерминистический, вероятностный, оптимизационный и другие. В настоящей работе использован метод экспертных оценок для формирования множества высказываний, выбора вида функций принадлежности, и определения весомости фактора в комплексном критерии.

Набор геологических факторов комплексируем в единый критерий, так как перспективность скважин-кандидатов для ГТМ обеспечивает не отдельный параметр, а их сочетание. Для комплексного учета частных факторов используется операция:

$$Kz = \left(\prod_{i=1}^n \mu_{i_i}(x)^{Wi} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n Wi}}, \quad (7)$$

где Kz — комплексный критерий, μ_{i_i} — значение функции принадлежности по i -му критерию, Wi — весовой коэффициент i -го критерия, n — количество критериев.

В приведенной формуле комплексирование производится с учетом весовых коэффициентов Wi , который изменяется от W_{\min} до 1, что позволяет учитывать значимость параметров или нивелировать вклад в общий комплексный критерий малозначимых параметров.

Комплексный Критерий Kz по геологическим параметрам рассчитывался по формуле:

$$Kz = \left(\mu_h^{Wh} \cdot \mu_{Kn}^{W_{Kn}} \cdot \mu_{Knn}^{W_{Knn}} \cdot \mu_{Knp}^{W_{Knp}} \cdot \mu_{Kppa}^{W_{Kppa}} \cdot \mu_{ntg}^{W_{ntg}} \cdot \mu_{Kнеод}^{W_{Kнеод}} \right)^{\frac{1}{W_h + W_{Kn} + W_{Knn} + W_{Knp} + W_{Kppa} + W_{ntg} + W_{Kнеод}}} \quad (8)$$

где W — весовой параметр, характеризующий степень влияния величины на КК, индексы $h, Kn, Knn, Knp, Kppa, ntg, Kнеод, НИЗ$, соответствуют следующим факторам: нефтенасыщенная толщина, пористость, начальная нефтенасыщенность, проницаемость, расчлененность, песчанистость, неоднородность по проницаемости, начальные извлекаемые запасы. Отметим, что список учитываемых факторов может изменяться и (или) дополняться методом экспертных оценок с привлечением геологов и разработчиков. Текущий список геологических параметров получен методом исключения маловлияющих параметров из исходного списка. Отобранные параметры проверены на наличие корреляционной связи с максимальными дебитами скважин с использованием непараметрической ранговой корреляции Спирмена [5].

Следует отметить, что скважины, которые имели за всю историю работы наилучшие показатели продуктивности, находятся в лучших геологических условиях. Нечеткие лингвистические переменные (НЛП) формулируются таким образом, чтобы степени принадлежности факторов к ним стремились к 1 (полной принадлежности) высокодебитных скважин, например «большая нефтенасыщенная толщина», «большая проницаемость», «низкий коэффициент расчлененности» и другие.

Второй комплексный критерий $Kэт$ сформулирован по эксплуатационно-технологическим параметрам. Далее приведем некоторые высказывания, участвующие в формировании комплексного критерия:

Возможность увеличения депрессии сформулирована в виде параметра:

$$\mu_{21}(x) = \frac{P_{пл} - P_{заб}}{P_{пл} - 0.75P_{нас}}, \quad (9)$$

где $P_{пл}$ — текущее пластовое давление, $P_{заб}$ — текущее забойное давление, $P_{нас}$ — давление насыщения для пласта. Данный фактор отображает возможность снизить забойное давление, увеличив тем самым депрессию для повышения дебита.

Следующая нечеткая лингвистическая переменная сформулирована как высокая обводненность и рассчитывается по формуле:

$$\mu_{22}(x) = \frac{Q_v}{Q_{ж}}, \quad (10)$$

где Q_v и $Q_{ж}$ — добыча воды и жидкости соответственно. При низкой обводненности возможно увеличение объемов отбираемой жидкости.

Возможность увлечения продуктивности рассчитывается как отношение фактической продуктивности к максимально возможной:

$$\mu_{23}(x) = \frac{\chi_{факт}}{\chi_{макс}}, \quad (11)$$

где $\chi_{факт}$ — фактическая продуктивность, $\chi_{макс}$ — максимальная продуктивность скважины за всю историю разработки.

Параметр «обеспеченность запасами» — наиболее важный, который определяет возможность проведения успешного ГТМ — рассчитывается по формуле:

$$\mu_{24}(x) = 1 - \frac{(Q_{низ} - Q_{накопл})}{50000}, \quad (12)$$

где $Q_{низ}$ — начальные извлекаемые запасы в районе скважины, тыс. т, $Q_{накопл}$ — накопленная добыча нефти скважины тыс. т. Данное высказывание определяет достаточное наличие запасов в районе скважины.

Из приведенных формул следует, что оптимальными условиями для проведения ГТМ будут те, когда есть запас для увеличения депрессии, низкая обводненность, возможность увеличения продуктивности и высокая обеспеченность запасами, т.е. кривая, описывающая ФП, имеет вид убывающей сигмоиды (4).

Перспективность скважин на проведение ГТМ на основе эксплуатационно-технологических факторов формируется на основе комплексного критерия:

$$K_{эт} = \left(\prod_{i=1}^n \mu_{2j}(x)^{w_j} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}}, \quad (13)$$

Алгоритм, реализующий разработанный метод подбора скважин кандидатов для ГТМ, включает следующие этапы:

1. Сбор и систематизация информации о скважинах ($k = 1, 2, \dots, n$) полученной при разведке, разработке и эксплуатации месторождений.

2. Экспертная оценка и уточнение перечня НЛП и функций принадлежности, учитывающих геологические факторы $\mu_{1i}(i=1, 2, \dots, n)$.

3. Настройка функций принадлежности путем экспертной оценки параметров a и b сигмоиды (5) для каждого геологического фактора

Для повышения качества оценок экспертам может быть предоставлена процедура, реализующая алгоритм автоматического определения оптимальных значений управляющих параметров сигмоиды a и b для сформулированной задачи.

4. Оценка коэффициентов весомости W_i ($1, 2, \dots, n$) для каждого геологического фактора.

5. Выбор способа комплексирования степеней принадлежности

$$K_2 = \left(\prod_{i=1}^n \mu_{1i}(x)^{W_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i}}$$

6. Расчет комплексного критерия по геологическим факторам для каждой скважины ($k=1, 2, \dots, n$) месторождения.

7. Формирование рейтингового списка скважин в порядке убывания численных значений $\{K_2\}$.

8. Экспертная оценка и уточнение перечня функций принадлежности, учитывающих эксплуатационно-технологические факторы $\mu_{2i}(i=1, 2, \dots, m)$.

9. Настройка функций принадлежности посредством экспертной оценки параметров a и b сигмоиды (2) для каждого эксплуатационно-технологического фактора.

10. Оценка коэффициентов весомости W_j ($1, 2, \dots, m$) для каждого эксплуатационно-технологического фактора.

11. Формирование вида комплексного критерия по эксплуатационно-технологическим факторам

$$K_{2m} = \left(\prod_{j=1}^m \mu_{2j}(x)^{W_j} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^m W_j}}$$

12. Расчет комплексного критерия по эксплуатационно-технологическим факторам для каждой скважины ($k=1, 2, \dots, n$) месторождения.

13. Формирование второго рейтингового списка скважин в порядке убывания численных значений $\{K_{2m}\}$.

14. Формирование множества скважин-кандидатов для ГТМ, подходящих по геолого-технологическим факторам, как пересечение множеств $\{K_2\}$ и $\{K_{2m}\}$.

15. Критическая оценка рейтингового списка.

Используя данный алгоритм, получено решение задачи поиска скважин с оптимальными геолого-технологическими условиями, графически результат представлен на рис. 2.

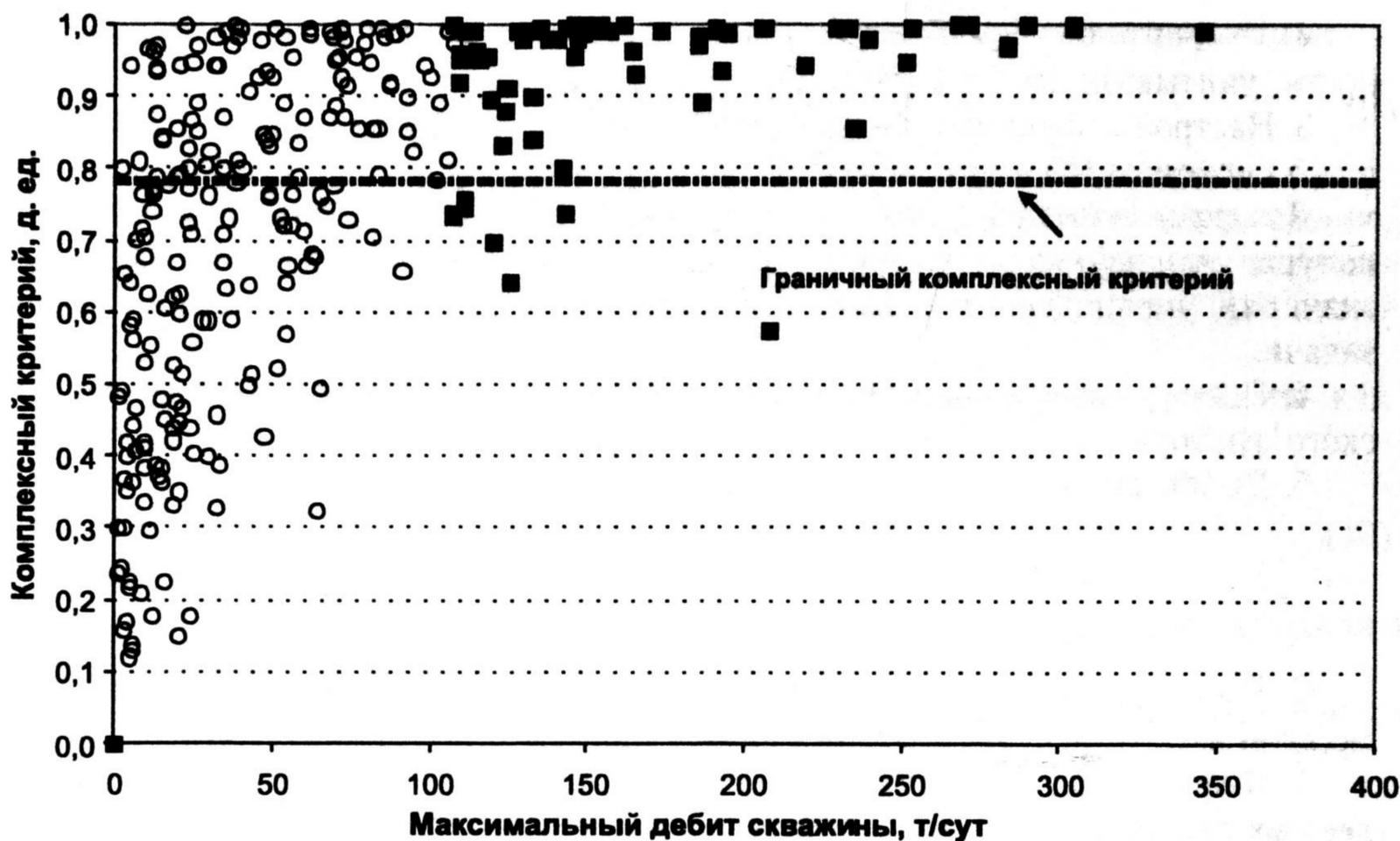


Рис. 2. Зависимость КК и максимального дебита скважины

Как видно из рис. 2, диапазон изменения КК для высокодебитных скважин (заполненные квадратики) от 0,6 до 1, наиболее плотное облако в районе 1. По остальным скважинам (пустые круги) КК меняется от 0,1 до 1. Согласно сформированному лингвистическому переменной, скважины, у которых КК стремится к 1, располагаются в наилучших геологических условиях. Граничный КК рассчитывался как разность сумм двух наборов скважин.

На основе данных по скважинам высокодебитного фонда, для которых информация бралась на момент времени, предшествующий ГТМ, получены параметры всех ФП, а также значения весовых коэффициентов. Используя значения рассчитанных K_g и $K_{эт}$ для каждой скважины, сформирован рейтинговый список скважин, которые удовлетворяют условию максимальности K_g и $K_{эт}$.

После проведения пересечения множества скважин, которые удовлетворяют геологическому критерию, с множеством скважин, удовлетворяющих технологическому критерию, получили итоговый список перспективных скважин для проведения ГТМ, который составляет порядка 7% от всего действующего фонда предприятия.

Заключение

1. Описанная методика анализа высокодебитного фонда скважин и выбора перспективных «скважин-кандидатов» с использованием теории нечетких множеств отвечает принципу развития и может дополняться новыми параметрами. Разработанный алгоритм можно применять неоднократно и повторять процедуру поиска при появлении новых фактических данных или добавлении параметров.

2. Предложенный метод позволяет находить предпочтительные скважины-кандидаты для проведения геолого-технологических мероприятий, при наличии значительного объема накопленной информации в ходе эксплуатации месторождений, снижать трудовые и временные затраты, повысить качество принимаемых решений.

3. На 8 скважинах, выбранных с использованием ТНМ, проведены ГТМ. В одном случае отмечен рост добычи жидкости и обводненности, в 7 случаях получено увеличение добычи нефти. Таким образом, предложенный метод прошел успешную первоначальную апробацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягафаров А.К., Клещенко И.Н., Зозуля Г.П. и др. Разработка нефтяных и газовых месторождений. Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. 396 с.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 32 с.
3. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2002. 268 с.
4. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Расчеты в условиях риска и неопределенности в нефтегазовых технологиях: Монография. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2005. 220 с.
5. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. С. 626-628.