

# Нечеткая логика интеллектуального бурения

## Модель прогноза скорости проходки

Расул Хосраваниан, Бехзад Чудар, Дэвид А. Вуд, Бернт С. Адной

Точные прогнозы механической скорости проходки (Rate Of Penetration, ROP) чрезвычайно важны для оптимизации затрат на бурение. На прогнозирование ROP влияют многие факторы, включая глубину скважины, тип долота, его гидравлику, скорость вращения, свойства породы и другие. Такие факторы, как свойства породы, являются неопределенными и региональными, а глубина залегания формаций индивидуальна для каждой скважины. Отношения между этими параметрами являются нелинейными, сложными и стохастическими. В статье предложен новый, улучшенный, нечетко-логический подход к прогнозированию механической скорости проходки (ROP) при бурении с использованием модели, построенной по имеющимся полевым данным для нефтяных месторождений Ahvaz в Иране и Kinabalu в Малайзии. Предлагаемая модель прогнозирования по точности превосходит существующие.

Ключевые слова: Иран, Малайзия, бурение, методы прогнозирования механической скорости проходки (ROP), нечетко-логическая модель, искусственные нейронные сети (ИНС).

В промышленности широко используется модель прогнозирования механической скорости проходки (ROP), разработанная А. Т. Bourgoyne и F. S. Young, хотя она не всегда обеспечивает достаточную точность.

Модель Bourgoyne и Young требует расчета нескольких параметров или коэффициентов, основанных на полевых данных. Другие методы прогнозирования ROP предусматривают использование искусственных нейронных сетей (ИНС), основанных на данных для конкретных месторождений.

Предложенная нечетко-логическая модель со средними ошибками 2,56% для месторождения Ahvaz и 3,01% для месторождения Kinabalu по точности превзошла модель Bourgoyne и Young.

### Методология

Нечетко-логическая модель легче строится и более прозрачна, чем модели прогнозирования ROP с использованием ИНС или экстремальных алгоритмов машинного обучения. Простота и прозрачность нечетко-логической модели позволяют легко модифицировать ее для применения на других месторождениях и в других регионах.

Рисунок 1  
Нечетко-логическая модель расчета ROP

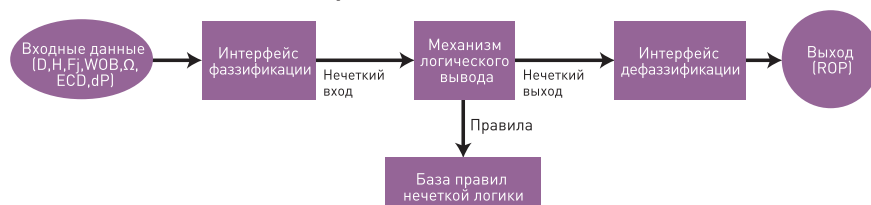


Таблица 1  
Показатели бурения для месторождения Ahvaz (Иран)

Параметр	Объем выборки	Минимум	Максимум
Глубина (D), ft	30	3231	7032
Износ зуба (H) (0<H<1)	30	0	0,75
Сила гидромониторного эффекта (Fj), тыс. lb	30	1,58	2,46
Нагрузка на долото (WOB), тыс. lb-in	30	0,97	4,00
Скорость вращения бурового долота (Ω), об/мин	30	145	190
Эквивалентная циркуляционная плотность (ECD), ppg	30	8,57	11,15
Градиент порового давления (dP), ppg	30	9,00	9,00
Общая механическая скорость проходки (ROP), ft/час	30	3,30	45

Предложенная модель позволяет получать точные результаты при ограниченном количестве имеющихся исходных данных, но не стоит рассчитывать на то, что она будет эффективной во всех ситуациях.

Потребуется дополнительная работа с большими наборами данных для различных геологических условий и технологий бурения.

Нечетко-логические системы включают в себя четыре компонента:

- нечеткие правила описания соотношений между параметрами;
- нечеткий механизм логического вывода (математическая формула) для связи входных переменных с выходными значениями;
- размывание (фазсификация) для преобразования заданных входных значений в члены нечеткого множества;
- получение результата методом нечеткой логики (дефазсификация) для генерации расчетных выходных значений.

Авторы разработали нечетко-логическую модель для прогнозирования ROP на нефтяных месторождениях Ahvaz и Kinabalu, куда входят данные для тех же семи переменных, что и у Bourgoyne и Young:

- глубина скважины (D);
- износ зуба бурового долота (H);
- сила гидромониторного эффекта (Fj);
- нагрузка на долото (WOB);
- скорость вращения бурового долота ( $\Omega$ );
- эквивалентная циркуляционная плотность (ECD);
- градиент порового давления (dP).

### Уравнения

$$MD_A(x) \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \leq x < b \\ (c-x)/(c-b) & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (1)$$

Где  $MD_A(x)$  — функция принадлежности к нечеткому множеству  $a, b, c$  — постоянные ограничения

$$Z^*_{COA} = \frac{\int \mu_A(z) z dz}{\int \mu_A(z) dz} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SSy} \quad (3)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2 \quad (4)$$

$$SSy = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

Где:

$x$  — измеренное значение

$\hat{x}$  — расчетное (прогнозируемое) значение

$\bar{x}$  — среднее значение измеренной величины

**Rassoul Khosravanian** — доцент (с 2001 г.) Технологического университета им. Амира Кабира в Тегеране. Имеет более чем 10-летний опыт управления проектами бурения скважин, реализуемыми непосредственно на шельфе и на суше, и закупок соответствующей техники. Бакалавр в области горного дела от Университета Кермана в Иране, магистр и PhD в области промышленного инжиниринга от Иранского университета науки и технологий. Член SPE. Сфера научных интересов: экономическая оценка проектов.

**Behzad Choodar** — бакалавр (2015 г.) в области нефтяного дела от Технологического университета им. Амира Кабира в Тегеране. Сфера научных интересов: интеллектуальное бурение, нечеткая логика и прогнозирование механической скорости проходки при бурении скважин.

**David A. Wood** — главный консультант компании DWA Energy Ltd, Великобритания. Специализируется на интеграции технической, экономической и стратегической информации с оценкой рисков для планирования проекта клиентами и оценки активов. Имеет более чем 35-летний опыт работы в отрасли. Ранее работал на руководящих технических и корпоративных должностях в Phillips Petroleum, Amoco, Lundin Oil и в независимых канадских компаниях.

**Bernt S. Aadnoy** — профессор нефтегазового дела в Университете Ставангера (Норвегия). Ранее работал в Phillips Petroleum, Rogaland Research, Statoil ASA и Saga Petroleum. Бакалавр в области машиностроения от Университета Вайоминга, магистр в области автоматизации от Университета Техаса, а также PhD в области механики нефтесодержащих пород от Норвежского технологического института.

### ROP FUZZY-LOGIC MODEL PROPOSED FOR INTELLIGENT DRILLING IN IRAN, MALAYSIA

This article proposes a new improved fuzzy-logic approach to predict drilling rate-of-penetration (ROP) using a model built from available data for Ahvaz oil field in Iran and Kinabalu oil field in Malaysia. Accurate ROP forecasts are important to drilling-cost optimization. Many factors affect ROP forecasting, including depth, bit type, bit hydraulics, rotary speed, rock properties, and depth.

Factors such as rock properties are uncertain and regional. Factors such as the depth of specific formations vary for individual wells. The relationships between these parameters are nonlinear, complex, and stochastic.

The industry widely uses a ROP model developed by A.T. Bourgoyne Jr. and F.S. Young Jr., although it sometimes provides insufficient accuracy. The Bourgoyne and Young model requires the calculation of several parameters or coefficients based on field data. Other ROP forecasting methods involve artificial neural networks (ANNs) based on data for specific fields. The proposed fuzzy-logic model outperformed the Bourgoyne and Young model, with mean errors of 2.56% for Ahvaz field and 3.01% for Kinabalu field.

Keywords: Iran, Malaysia, drilling, ROP forecasting methods, fuzzy-logic model, artificial neural networks (ANNs).

**Rassoul Khosravanian, Behzad Choodar, David A. Wood, Bernt S. Aadnoy**

Рисунок 2

Сравнение скорости проходки ROP. Месторождение Ahvaz

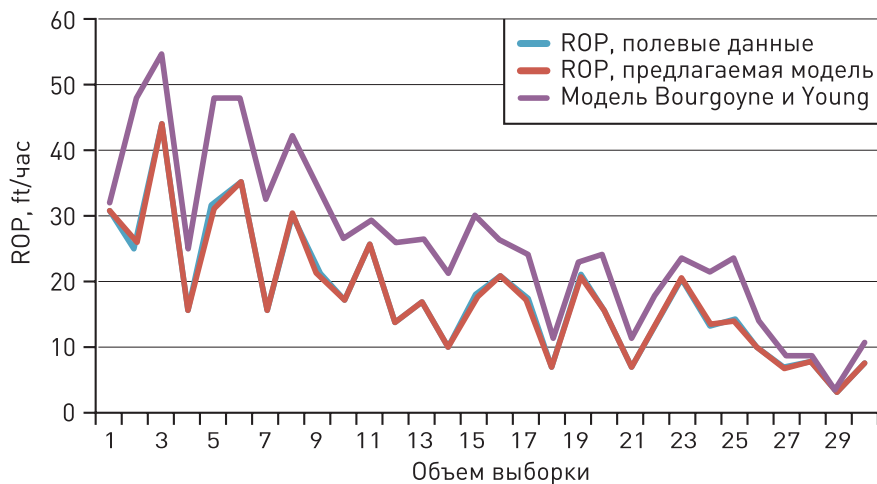


Рисунок 3

Сравнение нечетко-логической и линейной моделей расчета ROP

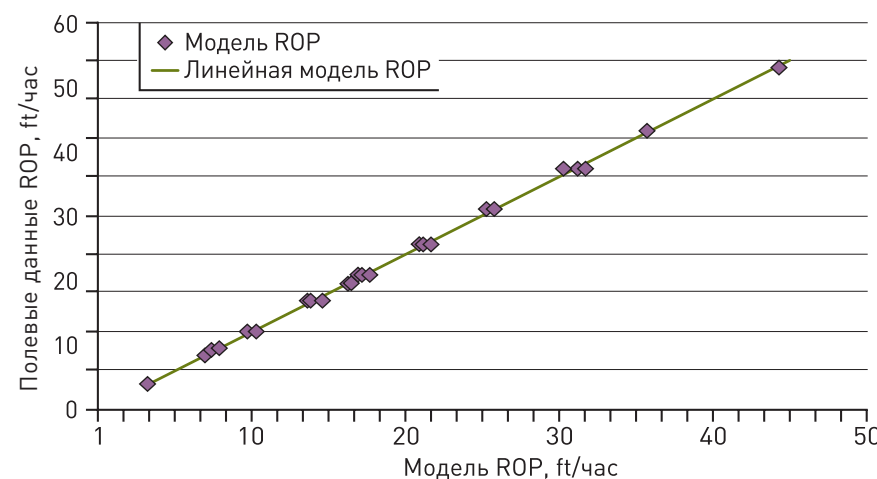
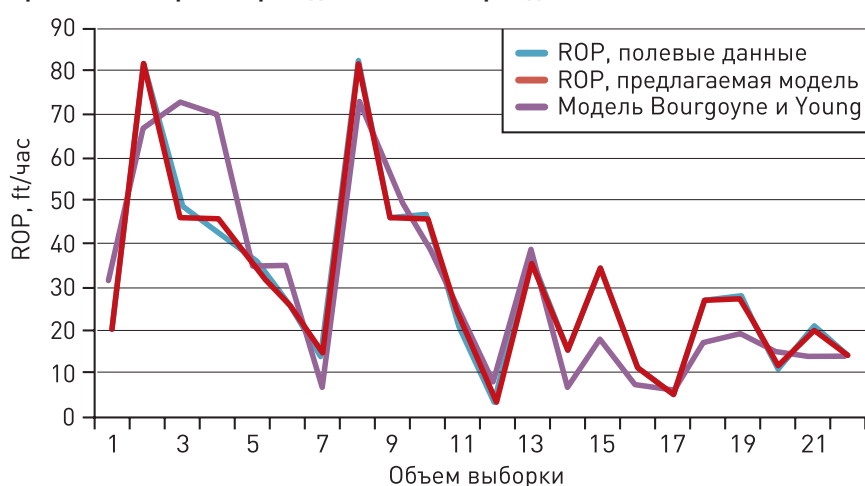


Рисунок 4

Сравнение скорости проходки ROP. Месторождение Kinabalu



На рисунке 1 показаны этапы построения нечетко-логической модели механической скорости проходки. Нечетко-логические модели решают задачи с неопределенностью путем объединения функций

принадлежности (ФП) к нечеткому множеству с правилами поиска решений if-then. Соответствующие ФП имеют определяющее значение для построения нечеткой модели. Функции принадлежности могут использовать субъективное суждение и интуицию, которая обеспечивает преимущество в тех случаях, когда достоверных данных недостаточно.

Предложенная в этой статье модель использует ФП треугольной формы, так как она проста в обращении и быстро вычисляется с помощью шаблонных соотношений (1).

В таблице 1 приведена описательная статистика семи входных переменных для нечетко-логической модели расчета ROP при бурении. Входные и выходные переменные нечетко-логической модели генерированы в редакторе нечеткого логического вывода в программном обеспечении MATLAB – собственном языке программирования, разработанном компанией MathWorks.

### Правила поиска решений

Правила, состоящие из предпосылки и следствия, называемые правилами поиска решений if-then, определяют соотношение между входом и выходом в нечетко-логической модели. Если возникает предпосылка, то из нее вытекает следствие.

Функции принадлежности представляют собой предпосылки и следствия. Рассуждение нечеткой логики включает в себя композиционные правила логического вывода. Выходные переменные получены путем применения этих правил к входным переменным.

Нечеткие множества и нечеткая логика могут перевести полностью неструктурированный набор входных данных в полезный алгоритм с применением алгоритма логического вывода, предложенного Е. Н. Mamdani и S. Assilian. Этот

алгоритм может быть выражен следующим образом:  
 Если  $X_1$  есть  $A_{1i}$  ... и  $X_r$  есть  $A_{ri}$ , то  $Y$  есть  $B_i$  для  $i = 1, 2, \dots, K$ ;  
 где  $X_1, X_r$  – входные переменные;

Таблица 2

Значения скорости проходки (ROP, ft/час) для месторождения Ahvaz (Иран)

Выборка	ROP, полевые данные	ROP, модель	Выборка	ROP, полевые данные	ROP, модель
1	31,3	31,0	16	21,4	21,3
2	25,3	26,0	17	18,3	17,5
3	45,0	44,0	18	7,3	7,0
4	16,5	16,0	19	21,7	21,2
5	32,2	31,0	20	16,1	16
6	35,6	36,0	21	7,1	7,0
7	15,9	16,0	22	13,6	14
8	29,5	31,0	23	20,8	21,3
9	22,0	21,3	24	13,4	14
10	17,6	17,5	25	14,8	14
11	26,2	26,0	26	9,8	10
12	13,9	14,0	27	6,9	7,0
13	17,1	17,5	28	8,7	8,0
14	10,6	10,0	29	3,3	3,3
15	18,2	17,5	30	8,0	8,0

Таблица 3

Показатели бурения для месторождения Kinabalu (Малайзия)

Параметр	Объем выборки	Минимум	Максимум
Глубина (D), ft	22	2156	14 300
Скорость вращения бурового долота ( $\Omega$ ), об/мин	22	65	185
Градиент порового давления (dP), ррг	22	8,365	10,12
Сила гидромониторного эффекта (Fj), тыс. lb	22	0,632	1,338
Нагрузка на долото (WOB), тыс. lb-in	22	0,41	3,27
Эквивалентная циркуляционная плотность (ECD), ррг	22	9,06	11,10
Износ зуба (H)	22	-1	—
Общая механическая скорость проходки (ROP), ft/час	22	3	83

$A_{it}$ ,  $A_{it}$ ,  $V_i$  – лингвистические термины (нечеткие множества);

$Y$  – выходные переменные,  $K$  – число правил.

Правила нечеткой логики модели опираются на имеющиеся знания и точечные данные. Авторы составили 30 выборок, чтобы покрыть возможные случаи для предлагаемой нечетко-логической модели ROP при бурении.

В нечетко-логической модели ROP при бурении наиболее часто используется центроидный метод дефазификации, позволяющий вычислить область функции принадлежности.

### Результаты для месторождения Ahvaz

Авторы определили функции принадлежности и применили правила поиска решений if-then для проверки нечетко-логической модели. Прогнозы ROP, рассчитанные с использованием модели, были сопостав-

лены с результатами измерений ROP при бурении скважины на нефтяном месторождении Ahvaz в Иране (табл. 2).

Измеренные и прогнозные значения ROP по предложенной модели сравнивались со значениями ROP, рассчитанными с использованием модели Bourgoyne и Young. Статистический коэффициент корреляции ( $R^2$ ) помог продемонстрировать высокую точность модели. Числа в диапазоне от 0 до 1 выражают степень принадлежности к нечеткому множеству как степень истины.

Способность нечетких множеств выразить постепенные переходы от принадлежности к непринадлежности обеспечивает значимое представление неопределенностей (уравнения (2) – (5)).

Чем ближе  $R^2$  к 1, тем больше у исследователей доверия к способности модели прогнозировать выходные переменные на основе измеренных входных данных для месторождения.

Расчетное значение  $R^2$  для нечетко-логической модели ROP при бурении составляет 0,996 (рис. 2, 3), что подтверждает высокую эффективность механизма нечеткого логического вывода величины ROP по семи входным переменным, используемого для определения правил if-then для данной модели.

Расчет ошибки нечетко-логической модели ROP при бурении ведется по следующей формуле:

$$\Delta ROP (\%) = \left( \sum_1^{30} \frac{(ROP_{field} - ROP_{model})}{ROP_{field}} \right) / 30 \times 100$$

Низкое значение ошибки 2,56% характеризует точность модели для оценки ROP при бурении на месторождении Ahvaz (табл. 1).

### Результаты для месторождения Kinabalu

В таблице 3 приведена статистика семи входных переменных для нечетко-логической модели расчета ROP при бурении для месторождения Kinabalu в Малайзии. Средняя погрешность данных модели на этом месторождении по сравнению с полевыми данными составляет 3,01%. На рисунке 4 показано сравнение измеренных и прогнозируемых значений ROP для месторождения Kinabalu. ●