

УДК 622.24

Г. М. Эфендиев, член-кор. НАН Азербайджана¹; **И. И. Джанзаков**, д-р техн. наук²;
О. Г. Кирисенко, канд. техн. наук¹; **И. А. Пиривердиев**¹,
М. Д. Сарбопеева³; **С. К. Буктыбаева**, канд. техн. наук²

¹Институт Геологии и Геофизики Национальной Академии наук Азербайджана, г. Баку

²Атырауский Институт Нефти и Газа, Республика Казахстан

³Каспийский Государственный Университет Технологий и Инжиниринга им. Ш. Есенова,
г. Актау, Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ПОРОДОЙ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Настоящий доклад посвящен построению моделей процессов взаимодействия породоразрушающего инструмента с породой, а также принятию решений по выбору наиболее эффективных типов долот и режимных параметров. Приводится краткий обзор методов и моделей принятия решений. В зависимости от характера исходной информации предлагается два подхода к принятию решений. Решения принимаются на основе двух критериев с помощью теории нечетких множеств.

Ключевые слова: долото, модель бурения, режимные параметры, принятие решений

Введение

Развитие современных технических средств и технологий для информационного обеспечения процесса бурения скважин и их широкое внедрение позволяет повысить качество получаемой информации и требует ее соответствующего анализа. Оперативная информация, получаемая в процессе бурения, имеет большое значение при бурении скважин, особенно в малоизученных регионах со сложными горно-геологическими и экологическими условиями.

Как следует из анализа опыта бурения в различных условиях, желаемого результата можно добиться при рассмотрении проблемы в виде системы, которая учитывала бы взаимосвязь между различными техническими, технологическими и геологическими характеристиками, оказывающими влияние на показатели бурения скважин. Кроме того, необходимо, на наш взгляд, также использование уровня развития в последнее время различных математических методов и программного обеспечения при классификации объектов, построении моделей, позволяющих принимать технологические решения, затруднённые наличием неопределенности. Отмеченное свидетельствует об актуальности проблемы совершенствования методов принятия решений при бурении скважин с учётом неопределённости условий.

Краткий обзор исследований последних лет

К настоящему времени разработаны различные системы и средства контроля за процессом бурения, позволяющие решать целый ряд геологических и технологических задач

[1]. Во всех работах отмечается роль оптимизации процесса бурения, которая является очень важным этапом во время ведения буровых работ. Это вызвано тем, что оптимизация позволяет сэкономить время и средства, затраченные на бурение скважины, добиться высокой скорости бурения и, таким образом, увеличить прибыль. Оптимизация процесса бурения направлена на выбор управляемых переменных во время процесса бурения, таких, как режимные параметры (нагрузка на долото, частота вращения долота, расход бурового раствора), параметры бурового раствора, тип долота, исходя из стремления добиться максимальной скорости бурения. На протяжении многих лет разработаны и использованы, так называемые, базовые модели (Бадалов Р. А., 1958; Фёдоров В. С., 1958; Cunningham, R. A. and J. G. Eenink, 1959; Garnier, A. J. and N. H. van Lingen, 1959; Graham J. W. and N. L. Muench, 1959; Galle E. M. and Woods H. B., 1963; Bingham M. G., 1965; Bourgoyne Jr., A. T. and F. S. Young, 1974; и др.). Эти работы в дальнейшем были развиты в исследованиях [2, 3, 7, 8, 13], на их основе предложены методы оптимизации, на которые получены патенты [4–6]. Так, в работе [3] на основе статистического анализа информации о работе долот режущего действия с применением и развитием базовой модели Бингхэма построена модель механической скорости, учитывающая влияние свойств горных пород (твёрдости и абразивности), глубины их залегания, режимных параметров, плотности бурового раствора. На основе обобщения исследований дана оценка надёжности долот и их срока службы. Параметры модели в каждом конкретном случае уточнялись методом случайного поиска. Метод [4] включает характеристики горных пород, отобранных из бурящихся скважин, установление особенностей хотя бы одной буровой установки; итерационное моделирование проводки скважины. Предложенный метод предусматривает расчет экономического критерия на каждом этапе моделирования. На основе результатов моделирования на различных этапах создается пакет предложений. Таким образом, создаётся система итеративного моделирования бурения и соответствующая компьютерная программа. С помощью соответствующей информации моделируются сценарии различных виртуальных комбинаций оборудования, буровой установки, долот, растворов и т. д. Компания снабжает службу, занимающуюся виртуальным моделированием, получаемой с разведочных скважин каротажной (геофизической) информацией и информацией о буровой установке, и служба в свою очередь на основе этой информации разрабатывает экономическую модель. В приведенных в работе блок-схемах показана входная и получаемая (выходная) информации. На основе входной геолого-технологической информации производится анализ времени работы и изнашивания долота, строится модель механической скорости и экономическая, по выражению авторов, модель. Долото выбирается, исходя из минимума стоимости бурения и минимального времени бурения. Модель выбора долота строится путем постепенного приближения (улучшения) с помощью компьютерной программы, благодаря чему, как отмечает автор, точнее описывает процесс, чем ранее предложенные, и тем самым обеспечивает более правильное экономическое решение и рекомендации для буровых подрядчиков и операторов.

В работе [2] в качестве базовой была выбрана известная модель Бургойна и Янга [1], учитывающая влияние нескольких параметров на механическую скорость. Основные факторы, такие как глубина, поровое давление, эквивалентная плотность, скорость вращения долота, износ зубьев долота и сила удара струи, получают из отчета о бурении. Для изучения

их соотношения был выполнен статистический анализ с применением множественного регрессионного анализа и в результате построена модель скорости проходки для месторождения. При этом вначале строились частные зависимости скорости проходки от каждого из параметров, включающих рассматриваемые факторы, которые впоследствии обобщались в множественную. В итоге, с использованием результатов отмеченного анализа определяются оптимальные значения нагрузки на долото, которые обеспечивают наилучшие показатели. Оптимальная нагрузка на долото была рассчитана для нескольких точек данных. С помощью такого же подхода в докладе [8] построена модель механической скорости проходки, рассчитываются стоимость одного фута проходки, удельная механическая энергия, учитывающая значения осевой нагрузки, частоты вращения и скорости проходки и получены выражения для определения оптимальных значений осевой нагрузки и частоты вращения, обеспечивающих минимальную стоимость. В данном случае авторы попытались учесть большое число факторов, что является главным преимуществом модели. Модель, основанная на проведении промысловых наблюдений и статистическом анализе их результатов, свойства горных пород учитывает для двух категорий (мягкие и твёрдые) на качественном уровне, тогда, как породы отличаются большим разнообразием по твёрдости и абразивности, которые являются одними из основных факторов. В связи с этим предложены разные методы оценки твёрдости и абразивности-экспериментальный, с использованием керношламового материала, результатов геофизических исследований. Так, в работе [9] предлагается метод использования геолого-геофизической информации о геологическом разрезе скважин при оценке буримости горных пород, что позволяет количественно учесть эти важные свойства горных пород при построении модели скорости проходки. За последние годы исследований накопилось достаточное количество. В целом, выполненные работы можно разделить на три группы: работы, посвящённые оценке свойств горных пород, построению моделей скорости проходки и принятию решений. В последней группе работ стали применяться методы, учитывающие неопределённость условий принятия решений при бурении скважин, в частности, многокритериальность. В связи с этим стали применять теорию нечётких множеств, которая позволяет принимать компромиссные решения в конфликтных ситуациях, проводить классификацию геологических объектов с учётом нечёткости границ, более правильно оценивать риски аварийных ситуаций в бурении [3, 10–12].

Следует отметить, что являясь очень полезными при решении конкретных задач, все же существующие методы и средства изучения разрезов в процессе бурения ввиду недостаточности комплексных исследований, а также недостаточного программно-методического обеспечения, затрудняют проведение контроля процесса бурения, оптимизации и точной оценки продуктивных интервалов, экологической обстановки и др.

Это объясняется также и тем, что при постановке цели кроме решенных на том или ином этапе задач остаются незамеченными задачи, которые учитывали бы разнообразие, различного рода неопределённость условий получения информации, а также принятия решений.

Анализ информации о работе долот

Система получения и использования геолого-технологической информации [16], включая три основных аспекта (геологический, технико-технологический, экологический),

предусматривает также: сбор и обработку данных (получение информации); построение моделей, выражающих связь показателей бурения с природными, техническими и технологическими характеристиками, прогнозирование с их помощью показателей бурения и ситуации ведения буровых работ; оценку и обеспечение оптимальных значений показателей эффективности бурения (использование информации).

При сборе и обработке данных необходимо стремиться к получению и использованию наиболее полной информации, причем эта работа осуществляется на протяжении всего процесса принятия решения. По мере перехода от одного этапа к другому при необходимости может уточняться потребность в информации. При этом результаты выполненных работ на предшествующих этапах служат исходной информацией для последующих. При этом характер исходной информации может быть различным (или по ранее пробуренным скважинам, или информация, поступающая в процессе бурения). В зависимости от этого и подход к принятию решений будет различным. Поэтому получение и правильное использование комплексной геолого-технологической информации с целью оперативного принятия решений при бурении скважин и проблема эффективности работы долот в зависимости от её характера является актуальной и требует соответствующего внимания.

При прогнозировании показателей бурения скважин, выборе техники и технологии в обеих отмеченных случаях важное значение имеет оценка буримости горных пород. Как известно, буримость горных пород определяется совокупностью геологических и технико-технологических факторов. Главную роль при учете этих факторов играют механические свойства горных пород, такие как твердость, сплошность и абразивность, оказывающие существенное влияние на работу породоразрушающего инструмента. При этом очень часто возникают затруднения, связанные с недостаточностью информации о свойствах горных пород и ее нечетким характером. При отсутствии соответствующего керношламового материала часто приходится использовать информацию, которая носит описательный характер, т. е. оценивать механические свойства горных пород на основе их геолого-петрографического описания. Такие методики есть. В частности, известная методика ВНИИБТ позволяет с использованием отмеченной информации оценить показатели свойств горных пород. Исходя из этого, представляет интерес анализ и обобщение таких данных с дальнейшей классификацией с учетом нечеткого характера информации о горных породах. Задача в данном случае заключается в анализе и обобщении информации о свойствах горных пород с целью создания удобств при использовании для оценки буримости горных пород.

Для анализа такого характера информации ранее был предложен метод построения нечетких моделей, выраженных в виде правил по принципу «если..., то...», основывающийся на процедуре кластер-анализа [14, 15].

Исходя из этого, для выделения однородных групп методом нечеткого кластер-анализа составлена соответствующая программа, реализация которой позволила разбить данные на однородные группы (кластеры) по комплексу значений твердости, абразивности и сплошности. В данном случае за основу были приняты известные классификации по твердости, абразивности и сплошности, в частности, разработанная во ВНИИБТ переводная таблица, а также соответствующие результаты по различным месторождениям, отраженные в [9].

В результате кластер-анализа породы, обычно встречающиеся в разрезах нефтяных и газовых месторождений, разделились на 5 классов. Каждый из этих классов показывает соответствие категорий сплошности, твердости и абразивности отдельной группы горных пород их геолого-петрографическому описанию, что позволяет для каждого из них сформулировать соответствующие лингвистические правила. Так, например, «если порода известняк или мергель или галит или доломит или глина и по степени уплотнения пористая или пористо-кавернозная, алевро-песчанистого материала в составе нет, кремнистых и железистых стяжений нет, трещиноватость слабая, то она относится ко 2–3,5 категории сплошности, категории твердости около 3–4 и категории абразивности около 1–2». Точно так же можно сформулировать остальные 4 правила, т.е. для каждого из полученных кластеров.

Следующий этап предусматривает анализ и оценку влияния различных факторов на показатели бурения с целью прогнозирования этих показателей, а также возможных осложнений. По результатам оценки влияния этих факторов на показатели бурения строится соответствующая модель. Данная модель наряду с параметрами, учитывающими свойства горных пород, включает также технологические факторы и параметры, учитывающие тип долота. При построении модели имелось в виду и то обстоятельство, что вследствие сложности условий бурения невозможно построить такую универсальную модель, которая могла бы успешно описывать процесс в различных геолого-технологических условиях. Наличие большого числа факторов, в том числе факторов, носящих случайный характер и тем самым не поддающихся учету, наглядно показывает трудность построения модели скорости проходки.

Учитывая, что построенные к настоящему времени модели строились для различных условий, нами предварительно проведен их сравнительный анализ, в процессе которого определялись параметры для одного и того же интервала методом случайного поиска. При этом для каждого параметра выбираются границы и шаг варьирования внутри этих границ, параметры определяются из условия сведения к минимуму суммы квадратов отклонений фактических и расчетных значений. При рассмотрении методики выбора долот и режимных параметров необходимо, как уже отмечалось, учитывать характер исходной информации, которая может быть различной. Выбор долот и режимных параметров зависит от характера этой информации. Если по ранее пробуренным скважинам имеется предварительная информация, на основе сбора и обработки данных о бурении скважин, промысловых наблюдений, а также информации о свойствах горных пород формируется комплексная информация, которая используется для идентификации моделей. Построение модели производится в пределах каждого однородного интервала. Выделение однородных интервалов производится по комплексу признаков, характеризующих геологический разрез, значения которых получены в результате реализации программы геолого-технологического прогнозирования по данным ГТИ «Каротаж». Вначале строятся частные зависимости, в которые впоследствии включаются неучтенные факторы. За основу принимается одна из известных базовых моделей, как в работе [13]. Далее рассчитывается соответствующая стоимость 1 м проходки. Наилучшие режимные параметры и типы долот уточняются (выбираются) путем вариантных расчетов с помощью положений теории нечетких множеств. Если таких данных по ранее пробуренным скважинам нет или они имеются в недостаточном

объёме, то расчёты проводятся по данным геолого-технологических исследований в процессе бурения по мере их поступления. Согласно данному алгоритму процесс принятия решений реализуется в зависимости от характера исходной информации.

Характеристики геологического разреза, оцениваемые с помощью отмеченной выше программы, позволяют решать ряд задач в процессе бурения.

Результаты анализа технологической информации и принятие решений

В качестве объектов исследований выбраны скважины месторождений Актум, Кокмай, Карамандыбас, Южный Коктау (Казахстан). Выполненный в рассматриваемых скважинах комплекс геолого-технологических и геофизических исследований позволяет иметь полное представление об условиях, технологии и показателях процесса бурения. Для принятия решений необходимо сформировать вначале исходный массив. От характера исходной информации, полученной тем или иным путем, зависит и подход, осуществляемый к принятию решений. В связи с этим нами рассматриваются вопросы принятия решений в том и другом случае.

В процессе анализа получены уравнения для соответствующих типов долот в данной породе, выражающие зависимость начальной механической скорости от режимных параметров и свойств горных пород, параметры которых в процессе обработки уточнялись методом случайного поиска:

для трёхшарошечных долот Российского производства, отработанных на месторождении Кокмай (Казахстан):

$$v_{\text{м}} = 2,0592 \frac{(G/d)^{0,18989} \cdot Q^{1,790249} \cdot A^{0,232049}}{n^{0,526293} \cdot p_{\text{ш}}^{0,434253}} \quad (1)$$

на месторождении Карамандыбас (Казахстан)

$$v_{\text{м}} = 542,211 \frac{(G/d)^{0,2522}}{p_{\text{ш}} \cdot A^{1,1319}} \quad , \quad (2)$$

для долот PDC (месторождение Актум, Казахстан):

$$v_{\text{м}} = 43,08 \frac{(G/d)^{0,3893} \cdot n^{0,7822} \cdot Q^{1,1617}}{p_{\text{ш}}^{0,7889} \cdot A^{0,6547}} \quad , \quad (3)$$

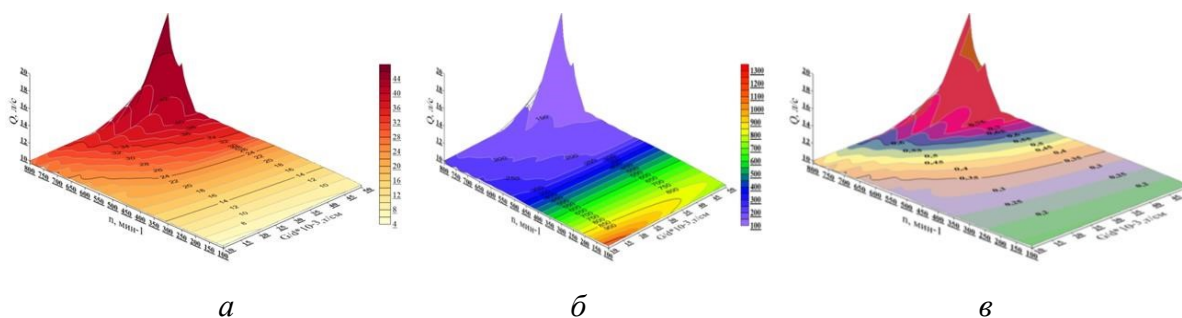
для долот 12"MXL-1 (месторождение Южный Коктау, Казахстан):

$$v_{\text{м}} = 0,06714 \frac{(G/d)^{0,53509} \cdot P_{\text{ш}}^{0,11163} \cdot n^{0,7971} \cdot Q^{0,48108}}{A^{1,1368}} \quad , \quad (4)$$

где G/d – удельная осевая нагрузка: G – осевая нагрузка на долото, тс; d – диаметр долота, см; n – частота вращения долота, мин.⁻¹; Q – расход бурового раствора, л/с; $p_{\text{ш}}$ – твёрдость пород по Л. А. Шрейнеру, МПа; A – категория абразивности.

В приведённых уравнениях влияние факторов, в частности показателей свойств горных пород, неоднозначно. Это связано с тем, что в некоторых случаях, в целом, не наблюдается существенных изменений в значениях этих показателей свойств по глубине. Выбор долот и режимных параметров производился по двум критериям – рейсовой скорости и стоимости метра проходки. Для прогнозирования рейсовой скорости по значениям начальной механической скорости проходки (v_0) и темпа затухания механической скорости

во времени (λ) вначале по известному выражению рассчитывается проходка. Далее рейсовая скорость рассчитывается по известному выражению с учётом времени, затраченного на спуско-подъёмные операции. С целью проведения вариантных расчетов задавались границы изменения значения режимных параметров и их шаги. Для всех этих вариантов проводились расчеты рейсовой скорости и стоимости 1 м проходки. Наилучшие по прогнозам режимные параметры определялись с помощью отмеченных двух критериев с применением теории нечетких множеств. Согласно этому множество решений представляет собой пересечение множеств целей (добиться наибольшей рейсовой скорости) и ограничений (при наименьшей стоимости 1 м проходки). Для этого выбирался вид функции принадлежности множеств цели и ограничения. При этом функция принадлежности для рейсовой скорости возрастает с увеличением рейсовой скорости, что выражает стремление лица, принимающего решение, добиться высокой рейсовой скорости, то есть максимальному значению рейсовой скорости бурения ставится в соответствие значение функции принадлежности, близкое к единице, а минимальному значению рейсовой скорости – наименьшее значение функции принадлежности, близкое к нулю. Функция принадлежности стоимости метра проходки, наоборот, снижается с увеличением стоимости метра проходки, так как в данном случае стремимся добиться низкой стоимости метра проходки. То есть во всех случаях наше стремление выражается результатом, соответствующим наибольшему значению функции принадлежности, близким к единице, а наибольшему значению стоимости метра проходки будет соответствовать низкое значение функции принадлежности, близкое к нулю. Для всех расчетных вариантов (при различных сочетаниях режимных параметров) рассчитывались значения рейсовых скоростей и соответствующие значения стоимости метра проходки, рассчитывались функции принадлежности цели и ограничения. Функция принадлежности множества решений согласно оценивалась как $\min(\mu_v, \mu_c)$. Наибольшее значение функции принадлежности множества решений в совокупности расчетных данных соответствует наилучшему решению. В такой же последовательности проводилась реализация алгоритма для другой однородной группы пород. В результате расчетов по моделям построены также поверхности распределения значений рейсовой скорости и стоимости метра проходки в зависимости от режимных параметров. Эти поверхности и поверхность изменения функции принадлежности в качестве примера приведены на рисунке. С помощью этих рисунков можно проследить за изменением показателей бурения в трехмерном пространстве, а также установить их оптимальные значения.



Поверхности распределения рейсовой скорости (а), стоимости 1 м проходки (б) и функции принадлежности (в) в зависимости от режимных параметров

Выводы

За последние десятилетия накоплено большое количество исследований, данных о процессе взаимодействия инструмента с породой, предложены методы и средства для определения физико-механических свойств и абразивности горных пород. Изучался механизм разрушения горных пород, влияние различных факторов на это, делались попытки

математического описания. В связи с этим в настоящей работе предложены математические модели процесса бурения скважин, основными элементами которых являются механическая скорость проходки, а также факторы, оказывающие влияние на её значения; показана возможность использования этих моделей, для исследования основных интегральных показателей эффективности процесса бурения: рейсовой скорости, стоимости проходки одного метра скважины и проходки на долото; предложена усовершенствованная схема прогнозных расчётов показателей бурения и принятия решений при выборе долот и режимных параметров с учётом свойств горных пород в зависимости от характера исходной информации; путём анализа и исследования процесса бурения предложен алгоритм прогнозирования показателей бурения скважин и принятия оптимальных решений по данным геолого-технологических исследований в процессе бурения, использование которого позволяет найти оптимальные значения режимных параметров из условия обеспечения максимума рейсовой скорости и минимума стоимости 1 метра проходки.

При принятии решений очень важно учесть условия, при которых протекает процесс бурения, а именно: неоднородность, нечеткость и случайный характер факторов, для чего развитие в последние годы методов теории управления и принятия решений при недостаточной информации может послужить надежной основой.

Стаття присвячена побудові моделей процесів взаємодії породоруйнівного інструменту з породою, а також прийняття рішень щодо вибору найбільш ефективних типів доліт і режимних параметрів. Наводиться короткий огляд методів і моделей прийняття рішень. Залежно від характеру вихідної інформації пропонується два підходи до прийняття рішень. Рішення приймаються на основі двох критеріїв за допомогою теорії нечітких множин.

Ключові слова: долото, модель буріння, режимні параметри, прийняття рішень

RESEARCHES ON THE EFFECT OF DIFFERENT FACTORS ON THE RESULTS OF THE INTERACTION BETWEEN ROCK-CUTTING TOOL AND ROCK AND DECISION-MAKING

This report focuses on the construction of models describing the interaction of rock-cutting tool with the rock, as well as decisions on selection of the most effective types of bits and regime parameters. An overview of the methods and decision-making models has been provided. Depending on the nature of the initial information, two approaches to decision-making are offered. Decisions are made on the basis of two criteria using fuzzy sets theory.

Key words: bit, drilling model, regime parameters, decision-making

Литература

1. Bourgoyne A. T., Young F. S. A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection. // SPE 4238. – 1974.
2. Irawan S., Mahfuz A., Rahman A. and Tunio S. Q. Optimization of Weight on Bit During Drilling Operation Based on Rate of Penetration Model. // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2012. – 12. – N 4. – P. 1690–1695.
3. Efendiyev G. M., Djafarova N. M. and Djevanshir R. D. The optimum decision in cutting-type drilling bits selection with regard to their operating conditions and the vagueness of the task posed. // Energy Sources. – 1991. – 13. – N 2. – P. 243–250.
4. Pat. 7085696 USA, МКИ E21B 7/00 (20060101). Iterative drilling simulation process for enhanced economic decision making. / W. W. King, – Publ. 01.08.06.

5. Pat. 7261167 USA, МКИ E21B 47/00 (20060101); E21B 44/00 (20060101). Method and system for predicting performance of a drilling system for a given formation. / W. A. Goldman, O. Matthews III; W. W. King, et al. – Publ. 28.08.07.
6. Patent 8274399 USA, МКИ G01V 3/00 (20060101). Method and system for predicting performance of a drilling system having multiple cutting structures. / M. Strachan, M. Paulk. – Publ. 25.09.12.
7. Tuna E. Real-time-optimization of drilling parameters during drilling operations (Thesis). // Middle East Technical University, 2010.
8. Maulana D. T. and Marbun B. T. H. ROP Modeling for Volcanic Geothermal Drilling Optimization // Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.
9. Байдюк Б. В., Толстова Л. И., Голик И. Г. Основы методического подхода к вопросу об использовании геолого-геофизической информации о геологическом разрезе скважин при оценке буримости горных пород. // Исследования физико-механических свойств горных пород и использование их результатов при бурении скважин, труды ВНИИБТ.– М.: 1976. – Вып. XXXIX. – С. 9–30.
10. Sivarao C. T. Surface Roughness Prediction in Deep Drilling by Fuzzy Expert System. // International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME. – 2009. –9, N 9. – P. 331–335.
11. Mamedbekov O. K., Efendiyev G. M., Mamedbekova N. M. et al. Application of fuzzy set theory for solving problems while drilling of oil and gas wells. // Fifth international Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing, ICAFS -2002, Milan, Italy, 17-18 September 2002. – P. 313–318.
12. Мыслюк М. А., Близнюков В. Ю., Мыслюк Н. М. Научно-методические основы проектирования рациональных конструкций скважин в условиях информационной неопределённости. // Обз. информ. Сер. Бурение газовых и газоконденсатных скважин. - М.: ИРЦ Газпром, 1996. – 55 с.
13. Байдюк Б. В., Абрамсон М. Г., Матвеева А. М. и др. Комплексный механико-статистический метод оценки буримости горных пород с целью прогнозирования и оптимизации процесса обработки шарошечных долот. // Процессы разрушения горных пород и пути ускорения бурения скважин. – Уфа: б.и., 1978. – С. 264–267.
14. Bezdek J. C., Ehrlich and Full W. The fuzzy c-means clustering algorithm, Computers and Geosciences. – 1984. - N10, P. 191-203.
15. Aliev R. A., Guirimov B. G. Type-2 Fuzzy Neural Networks and Their Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.springer.com/us/book/9783319090719>.
16. Хисметов Т. В., Эфендиев Г. М., Кирисенко О. Г. и др. Оценка показателей бурения и принятие решений на основе комплексной геолого-технологической информации. // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 10. – С. 42–45.

Поступила 02.08.16