

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ ДОЛОТ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Г.М. Эфендиев¹, С.А. Алиев², М.Д. Сарбопеева³, К.К. Агаева⁴, О.Г. Кирисенко⁵

¹*Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, просп. Г. Джавида, 119, Баку AZ1073, Азербайджан, e-mail: galib_2000@yahoo.com*

²*Институт математики и механики НАН Азербайджана, ул. Б. Вахабзаде, 9, Баку AZ1141, Азербайджан, e-mail: soltanaliyev@yahoo.com*

³*Каспийский государственный университет технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, 32-й мкр., Актау 130003, Казахстан, e-mail: manshyk84@mail.ru*

⁴*Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, просп. Г. Джавида, 119, Баку AZ1073, Азербайджан, e-mail: kamila.agayeva@hotmail.com*

⁵*Институт геологии и геофизики НАН Азербайджана, просп. Г. Джавида, 119, Баку AZ1073, Азербайджан, e-mail: oleg.kirisenko@gmail.com*

Рассмотрены актуальные вопросы получения и правильного использования комплексной геолого-технологической информации с целью оперативного принятия решений при бурении скважин, проблема эффективности работы долот в зависимости от характера этой информации. Предложены методика и алгоритм выбора долот и режимных параметров как важнейшего фактора оптимизации и снижения стоимости буровых работ для конкретных условий бурения. Проведен анализ изменения механической скорости во времени, влияния режимных параметров на начальную механическую скорость и темп ее затухания с построением статистической модели. Используются данные геолого-технологических исследований процесса бурения скважин, данные о работе долот, отработанных при бурении на различных месторождениях Азербайджана и Казахстана. Разработанный алгоритм оптимизации режимных параметров в процессе бурения скважин описан на основе двух критериев – рейсовой скорости и стоимости 1 м проходки (на примере скважины, пробуренной на площади Карабаглы, Азербайджан). При решении поставленных задач использованы статистические методы обработки данных и анализа информации, метод случайного поиска, программа нечеткого кластер-анализа, основные положения теории нечетких множеств. На основании полученных моделей приведена усовершенствованная схема прогнозирования показателей бурения скважин в режиме реального времени. Показано, что на основе комплексной геолого-технологической информации алгоритм прогнозирования позволяет принимать решения о выборе оптимальных значений режимных параметров, при которых обеспечиваются максимум скорости бурения и минимум стоимости 1 м проходки. Внедрение предложенных рекомендаций дало возможность увеличить коммерческую скорость на 51,4 м/станко-мес, т. е. в 1,086 раза. При этом экономия затрат на 1 м составила 51,42 долл. США.

Ключевые слова: геолого-технологическая информация, оперативное принятие решения, долота, нечеткие множества, скорость бурения, неопределенность, функция принадлежности.

Введение. Увеличение добычи нефти неразрывно связано с ростом объема буровых работ, в связи с чем большое значение приобретают повышение показателей бурения скважин, совершенствование технологии бурения, в частности на основе оптимизации режимных параметров. Развитие систем и средств получения информации позволяет решать эту задачу на более высоком уровне, когда роль геолого-технологических исследований возрастает, создавая тем самым условия для успешного решения задач анализа информации и повышения эффективности породоразрушающего инструмента в оперативном порядке.

Уровень развития техники и технологии в настоящее время выдвигает соответствующие требования к методикам проектирования оптимальных режимных параметров бурения. В этих параметрах учитывается способность современных долот пройти за одно долбление большой интервал на основе

моделей, включающих влияние технико-технологических параметров и геологических условий на показатели бурения. Подходы к принятию решений разные, поскольку используется информация по ранее пробуренным скважинам или информация, поступающая в процессе бурения. Поэтому правильное использование полученной комплексной геолого-технологической информации с целью оперативного принятия решений при бурении скважин и реализации проблемы эффективности работы долот в зависимости от ее характера актуально и требует соответствующего внимания.

Методика и алгоритм выбора долот и режимных параметров в зависимости от характера исходной информации. Выбор долот и режимных параметров для конкретных условий бурения является важнейшим фактором оптимизации и снижения стоимости буровых работ. Исходя из этого для облегчения процесса выбора долот составлен клас-



Рис. 1. Блок-схема принятия решений при бурении скважин в зависимости от характера исходной информации
 Fig. 1. A block diagram of decision-making during drilling, depending on the nature of the initial information

сификатор [2], предложены методики и способы оптимизации на уровне изобретений и патентов [9]. Вопросы оптимизации выбора долот и режимных параметров требуют постоянного изучения закономерностей процесса разрушения горных пород, сравнительного анализа показателей работы долот в различных условиях их отработки на основе классификации горных пород по их свойствам на однородные группы. В результате такого анализа строятся модели, позволяющие прогнозировать показатели работы долот. При рассмотрении методики выбора долот и режимных параметров необходимо учитывать характер исходной информации. Данные о ранее пробуренных скважинах следует отсортировать, обработать, построить зависимости. Затем проводят прогнозную оценку показателей бурения и выбирают наилучшее сочетание типа долот, режимных параметров и свойств горных пород. При осуществлении геолого-технологических исследований данные поступают непосредственно в процессе бурения, что дает возможность оперативно принимать решения (рис. 1). Выбор долот и режимных параметров, как уже отмечалось, зависит от характера информации. Имея по ранее пробуренным скважинам предварительную информацию, расчеты проводят согласно блокам, расположенным на левой ветви схемы. При отсутствии такой информации или недостаточном ее объеме расчеты выполняют по данным геолого-технологических исследований в процессе бурения по мере их поступления. Согласно приведенному алгоритму принятие решений реализуется в зависимости от характера исходной информации. На схеме показана

последовательность расчетов для одного и другого случаев. Все рассматриваемые при этом факторы, определяющие процесс бурения скважин, можно разделить на три группы [7, 8, 13, 16, 18, 19].

В последнее время получили развитие исследования как геологического, так и технологического характера, учитывающие неопределенность условий принятия решений. Усовершенствованы методы и модели, позволяющие решать задачи классификации объектов, распознавания образов; реализованы процедуры экспертных оценок перспектив продуктивности локальных структур нефтегазоносного региона, анализа и оценки рисков, решения многокритериальных задач при выборе оптимальных технологических параметров бурения с помощью соответствующих алгоритмов и программного обеспечения.

Применение разработанных компьютерных технологий обеспечивает сбор и обработку данных, анализ и использование геологической и технологической информации и в конечном итоге принятие оптимальных решений на основе положений теории нечетких множеств [3, 6, 17, 18]. В основном, все эти методы предусматривают выбор цели, критериев и построение модели при решении задачи выбора наилучшего сочетания типов долот, режимных параметров и свойств горных пород.

При моделировании процесса работы долота в работе [5] учтена нечеткость условий, построены нечеткие модели, выражающие зависимость начальной скорости проходки и темпа затухания ее во времени от режимных параметров и свойств горных пород. При этом сделано допущение, что количес-

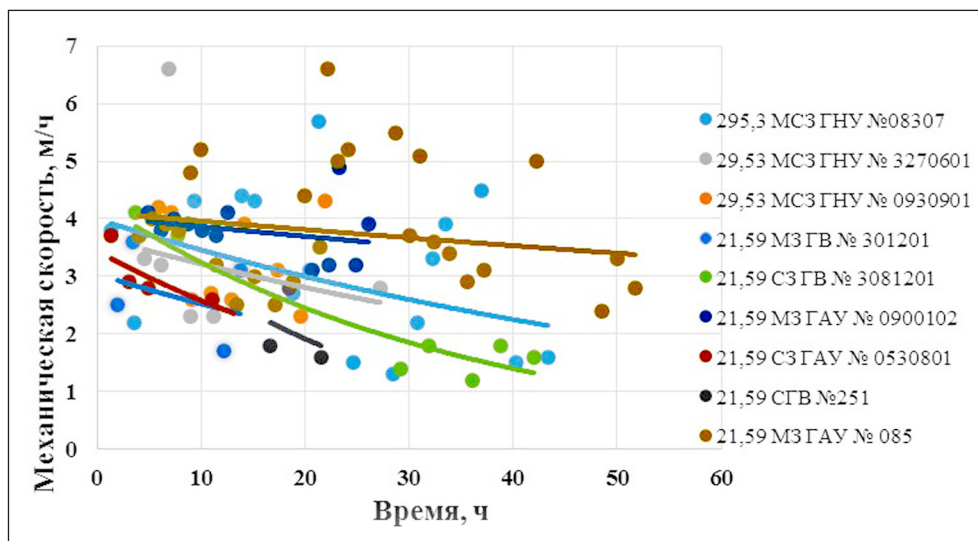


Рис. 2. Зависимости изменения механической скорости во времени (1 кластер)

Fig. 2. The dependence of the mechanical speed on time (1 cluster)

тво бурового раствора обеспечивает достаточную для бурения очистку скважины от шлама.

На базе функциональных зависимостей, разработанных различными авторами, с позиций правил теории нечетких множеств, выбрана модель скорости бурения, учитывающая падение скорости вследствие износа долота во времени. Модель включает осевую нагрузку, частоту вращения инструмента, твердость и абразивность пород. Данная модель и алгоритм оптимизации составляют усовершенствованную схему системы управления процессом бурения.

Блок оптимизации получает данные от информационно-измерительной системы, снимающей показания с датчиков, а также данные из лаборатории о составе пород разреза. Ввиду риска возникновения осложнений в ходе проведения буровых работ вследствие принятия неправильного решения окончательный выбор управляющих воздействий оставлен за бурильщиком, хотя и в таком случае этот риск имеет место.

Для моделирования скорости бурения выбрана нечеткая модель с лингвистическими переменными [5].

Твердость и абразивность породы [5] сложно определять оперативно, однако в настоящее время системы геолого-технологического контроля в процессе бурения скважин позволяют оценивать необходимые показатели свойств горных пород в оперативном порядке. Кроме того, при отсутствии количественной информации представляется возможным по качественному описанию пород прогнозировать их твердость и абразивность с помощью нечетких правил [3]. Для решения задачи выбора наилучших типов долот и режимных параметров в качестве критериев выбраны рейсовая скорость и стоимость 1 м проходки.

В связи с этим построена зависимость рейсовой скорости от режимных параметров в выделен-

ной однородной пачке пород на основе анализа изменения механической скорости во времени, а также влияния различных факторов на начальную скорость проходки и темп затухания механической скорости. При принятии решений применены основные положения теории нечетких множеств.

Анализ изменения механической скорости во времени. Исследование изменения механической скорости во времени [1, 4, 8, 10, 13, 16] имеет большое значение для анализа влияния условий бурения на его показатели, прогнозирования новых аналогичных условий проходки на долото, рейсовой скорости, стоимости 1 м проходки и выбора на этой основе режимных параметров, которые обеспечат наилучшие показатели бурения. Кроме того, изучение таких зависимостей дает возможность проследить за процессом изнашивания долота во времени, проанализировать влияние свойств горных пород на темп затухания в первую очередь абразивности, а также режимных параметров. С учетом необходимости этого анализа выполнены исследования по изучению влияния свойств горных пород и режимных параметров на начальную механическую скорость и темп затухания ее во времени. Для анализа были использованы данные геолого-технологических исследований процесса бурения скважин на площади Карабаглы (Азербайджан) и скважины, пробуренной в Волго-Уральском нефтегазовом районе. Расчеты проводились в следующей последовательности: 1) расчет показателей литологии, пористости, твердости и абразивности; 2) выделение однородных групп пород; 3) анализ значений механической скорости для различных типов долот; 4) расчет параметров v_0 и λ зависимости $v = v_0 e^{-\lambda t}$; 5) построение зависимостей

$$v_0 = f\left(\frac{G}{D}, n, Q\right)$$

и

$$\lambda = f\left(\frac{G}{D}, n, Q\right),$$

вариантные расчеты v_p и C ; 6) выбор оптимальных режимов бурения G , n и Q , обеспечивающих наибольшую рейсовую скорость и наименьшую стоимость 1 м проходки ($v_0, \lambda, \frac{G}{D}, n, Q, v_p, C$ – соответственно начальная механическая скорость, темп снижения ее во времени, удельная осевая нагрузка, частота вращения, расход бурового раствора, рейсовая скорость, стоимость 1 м проходки).

Как видно, вначале по данным бурения скважин оцениваются характеристики горных пород с помощью соответствующей программы. Анализ обработки долот проводился в пределах однородных по свойствам горных пород интервалов (пачек), для выделения которых использовалась программа нечеткого кластер-анализа. Отмеченные зависимости строились для долот одинаковых типов. Для каждого из долот, отработанных в выделенных интервалах, построены зависимости механической скорости от времени (рис. 2).

Для аналитической аппроксимации выбрана ранее предложенная различными исследователями простая экспоненциальная функция в виде

$$v_m = v_0 e^{-\lambda t},$$

где v_0 – начальная механическая скорость, м/ч; λ – темп снижения механической скорости во времени, ч⁻¹.

В результате статистической обработки зависимостей механической скорости от времени получены значения v_0 и λ . Каждая пара значений параметров, т. е. начальная механическая скорость бурения и темп ее затухания во времени, представляет собой функцию режимных параметров. Поэтому для наиболее правильного описания процесса необходим статистический анализ с построением моделей, наиболее полно отражающих влияние режимных параметров.

Построение статистической модели влияния режимных параметров на начальную механическую скорость и темп снижения механической скорости во времени. С использованием полученных значений v_0 и λ , а также данных бурения в рассматриваемой породе проведен статистический анализ с целью установления зависимостей вида

$$v_0 = f\left(\frac{G}{D}, n, Q\right) \quad \text{и} \quad \lambda = f\left(\frac{G}{D}, n, Q\right).$$

Для анализа и прогнозирования скорости проходки были собраны данные о работе долот, отработанных при бурении скважин на различных месторождениях. Исследованы следующие показатели: проходка, механическая скорость, время бурения. В качестве факторов, оказывающих влияние, рассматривались параметры режима бурения и свойства пород (твердость и абразивность). В результате ста-

тистического анализа путем соответствующих преобразований были построены линейные модели, для чего переменные представлены в логарифмах и преобразованы в мультипликативный вид. При этом получены зависимости, параметры которых в процессе обработки уточнялись методом случайного поиска, исходя из следующих условий [15]:

$$\sum (v_0 - v_{0p})^2 \rightarrow \min, \\ \sum (\lambda - \lambda_0)^2 \rightarrow \min.$$

В результате для отработанных трехшарошечных долот российского производства получено: на месторождении Кокмай (Казахстан)

$$v_m = 2,0592 \frac{\left(\frac{G}{d}\right)^{0,18989} \cdot Q^{1,790249} \cdot A^{0,232049}}{n^{0,526293} \cdot P_{\text{ш}}^{0,434253}},$$

на месторождении Карамандыбас (Казахстан)

$$v_m = 542,211 \frac{\left(\frac{G}{d}\right)^{0,2522}}{P_{\text{ш}} \cdot A^{1,1319}},$$

для долот PDC (месторождение Актум, Казахстан)

$$v_m = 43,08 \frac{\left(\frac{G}{d}\right)^{0,3893} \cdot n^{0,7822} \cdot Q^{1,1617}}{P_{\text{ш}}^{0,7889} \cdot A^{0,6547}},$$

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

$$v_m = 0,06714 \frac{\left(\frac{G}{d}\right)^{0,53509} \cdot P_{\text{ш}}^{0,11163} \cdot n^{0,7971} \cdot Q^{0,48108}}{A^{1,1368}}.$$

Здесь $\frac{G}{d}$ – удельная осевая нагрузка: G – осевая нагрузка на долото, тс (~10⁴ Н); d – диаметр долота, см; n – частота вращения долота, мин⁻¹; Q – расход бурового раствора, л/с; $P_{\text{ш}}$ – твердость пород, по Л.А. Шрейнеру, МПа; A – категория абразивности; v_m – механическая скорость, м/ч.

В приведенных 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 показателей свойств по глубине.

Прогнозирование рейсовой скорости, стоимости 1 м проходки, варианты расчеты и принятие решений по выбору режимных параметров согласно данным о ранее пробуренных скважинах. Для расчета рейсовой скорости и стоимости 1 м проходки по результатам регрессионного анализа информации о бурении скважин можно получить уравнения для соответствующих типов долот в данной породе, вы-

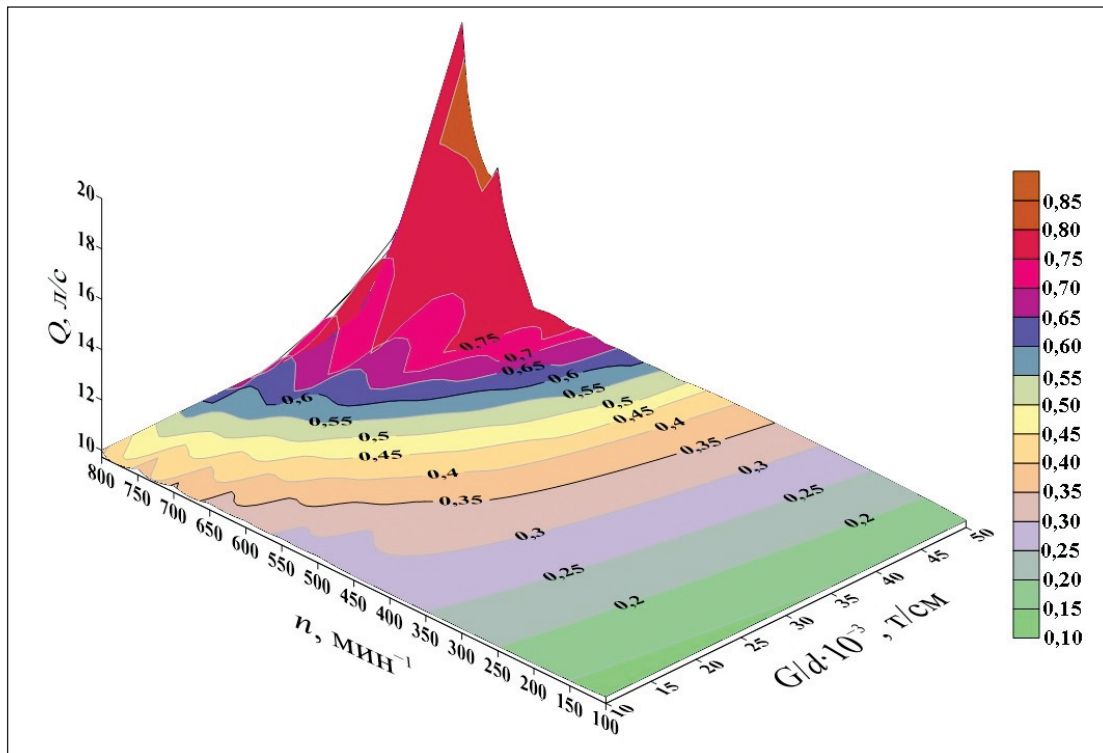


Рис. 3. Изменение функции принадлежности множества решений в зависимости от режимных параметров
 Fig. 3. Changes of the membership functions of the set of solutions depending on the mode parameters

ражающих зависимость времени бурения от режимных параметров.

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:

$$H = \frac{v_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}).$$

Далее по известному выражению с учетом времени, затраченного на спуско-подъемные операции, вычисляется рейсовая скорость.

С целью проведения вариантных расчетов задавались границы изменения значений режимных параметров и их шаги. Для всех вариантов рассчитывались рейсовая скорость и стоимость 1 м проходки. Наилучшие по прогнозам режимные параметры определялись с помощью отмеченных двух критериев с применением теории нечетких множеств [14, 16]. Согласно этому, множество решений представляет собой пересечение множеств целей (добиться наибольшей рейсовой скорости) и ограничений (при наименьшей стоимости 1 м проходки). Была выбрана функция принадлежности множеств цели и ограничения в виде

$$\mu = ae^{bx}, \quad (1)$$

где x – в одном случае стоимость 1 м проходки, в другом – рейсовая скорость.

С учетом параметров для оценки значения

функции принадлежности рейсовой скорости выражение (1) примет вид

$$\mu_{v_p} = 0,104e^{0,05v_p}, \quad (2)$$

а для оценки функции принадлежности стоимости 1 м проходки –

$$\mu_C = 0,97e^{-0,0015C}. \quad (3)$$

Как видно, функция принадлежности для рейсовой скорости возрастает с увеличением последней, что выражает стремление лица, принимающего решение, добиться высокой рейсовой скорости. Другими словами, максимальному значению рейсовой скорости бурения ставится в соответствие значение функции принадлежности, близкое к единице (2), а минимальному значению рейсовой скорости – наименьшее значение функции принадлежности, близкое к нулю. Функция принадлежности стоимости 1 м проходки, наоборот, снижается с увеличением стоимости 1 м проходки, так как в данном случае стремимся добиться низкой стоимости 1 м проходки. Иначе говоря, во всех случаях стремление выражается результатом, соответствующим наибольшему значению функции принадлежности, близким к единице, а наибольшему значению стоимости 1 м проходки будет соответствовать низкое значение функции принадлежности, близкое к нулю (3). Для всех расчетных вариантов (при различных сочетаниях режимных параметров) рассчитывались значения рейсовых скоростей и соответствующие значения стоимости метра проходки, а по выра-

жениям (2) и (3) – функции принадлежности цели и ограничения. Функция принадлежности множества решений, согласно [14, 16], оценивалась как $\min(\mu_p, \mu_c)$. Наибольшее значение функции принадлежности множества решений в совокупности расчетных данных соответствует наилучшему решению. В такой же последовательности был реализован алгоритм для другой однородной группы пород (следующего выделенного кластера). В результате расчетов по моделям построена поверхность изменения функции принадлежности множества решений в зависимости от режимных параметров, на которой заметно выделяется область оптимального сочетания режимных параметров, соответствующая максимальному значению функции принадлежности множества решений (рис. 3).

Принятие оптимальных решений по данным геолого-технологических исследований, поступающим в процессе бурения скважин. Геолого-технологические исследования играют большую роль в выборе оптимальных режимных параметров, параметров бурового раствора, обеспечивающих высокие показатели бурения скважин. Они также позволяют уточнять характеристики геологического разреза, производить анализ технологической информации (износ долот, соответствие режимных параметров, параметров бурового раствора и т. д.) в процессе бурения и принимать технологические решения оперативно, в процессе бурения скважин.

Как следует из опыта выполнения подобных исследований, принимаемые решения, в основном, опираются на модели процесса, выражающие зависимость одного из показателей бурения (механической скорости, рейсовой скорости, стоимости метра проходки) от показателей свойств горных пород, режимных параметров, типа породоразрушающего инструмента. Построено большое количество моделей, которые, в свою очередь, опираются на различные, так называемые базовые, модели. В работах [11, 12] приведены разные виды базовых моделей. В зависимости от условий бурения может оказаться более адекватной та или иная модель. Поэтому, на наш взгляд, в общем виде модель должна характеризовать все режимные параметры с учетом зависимостей различного рода (линейных, нелинейных), т. е. модель должна быть гибкой и адаптируемой к конкретным рассматриваемым условиям. В работе [11] описан алгоритм оптимизации в процессе бурения на основе линейных моделей, выражающих зависимость механической скорости и проходки на долото от осевой нагрузки и частоты вращения с дальнейшим расчетом на этой основе рейсовой скорости и нахождением ее экстремума. Однако в общем случае эти зависимости носят нелинейный характер, хотя принимается линейность для небольшого промежутка времени. Вместе с тем модели не включают ни в прямом, ни косвенном

виде такой важный параметр режима бурения, как расход бурового раствора. Современный уровень математических методов, наличие различных программ позволяют максимально использовать возможности геолого-технологической информации, получаемой в процессе бурения скважин и принимать оперативные технологические решения.

В результате анализа различных исследований разработан алгоритм оптимизации режимных параметров в процессе бурения скважин, описание которого на примере скважины, пробуренной на площади Карабаглы, приводится ниже.

Алгоритм оптимизации режимных параметров в процессе бурения скважин. Согласно алгоритму, оптимизация режимных параметров по данным, поступающим в процессе бурения, проводится на основе двух критериев – рейсовой скорости и стоимости 1 м проходки. Вначале на основе данных, поступающих в процессе бурения через короткие интервалы, формируется исходный массив. Количество строк массива устанавливается при построении моделей. В рассматриваемом случае минимальное количество строк равно 20, массив включает данные об удельной осевой нагрузке, частоте вращения, расходе бурового раствора, механической скорости, а также текущей скорости проходки (через каждые 5 м). Другими словами, через каждые 5 м отбираются данные, куда входят режимные параметры и механическая скорость, строится модель, выражающая зависимость механической скорости от осевой нагрузки на долото, частоты вращения инструмента и расхода бурового раствора. Модель каждый раз корректируется по мере поступления данных. Если имеется предварительная информация о разрезе, т. е. о свойствах горных пород, то сначала в разрезе выделяют однородные интервалы, для которых строится модель, а затем рассчитывают оптимальные режимные параметры. Если таких данных нет, то контроль свойств пород осуществляется на основе результатов расчетов геологических характеристик по поступающим на рассматриваемый момент данным.

Как отмечалось выше, соответствующая программа позволяет по технологическим данным бурения рассчитывать характеристики горных пород, в том числе твердость и абразивность, оказывающие влияние на работу породоразрушающего инструмента. Модели для механической скорости и проходки на долото выбраны в мультипликативно-экспоненциальном виде. Этот вид моделей удобен тем, что в частном конкретном случае учитывается разный характер исследуемой зависимости, выраженный в значениях входящих в нее параметров. Для построения таких моделей входные (осевая нагрузка на долото, частота вращения инструмента, расход бурового раствора, показатели свойств горных пород) и выходные (механическая скорость проходки) переменные преобразуются в

логарифмический вид. Строится линейная модель (для этого используется пакет программ линейной регрессии, в котором также рассчитываются статистические оценки) в логарифмах, после чего путем потенцирования получается модель в мультипликативном виде. По поступившим данным оцениваются параметры моделей механической скорости и проходки на долото. Вначале задаются интервалы изменения искомым параметров и их шаги, как в предыдущем случае. В результате работы программы случайного поиска получают соответствующие искомым значения параметров. Для этих же данных рассчитываются параметры зависимости проходки от режимов бурения. Согласно сравнительным расчетам, максимальное отклонение расчетных значений и фактических составило около 8 %.

Прогнозирование значений рейсовой скорости и стоимости 1 м проходки, расчет оптимальных параметров режима бурения. Как отмечалось выше, в качестве критериев оптимизации используются два критерия – рейсовая скорость и стоимость 1 м проходки. Располагая моделями для расчета механической скорости и проходки, для расчета рейсовой скорости используем выражение

$$v_p = \frac{H \cdot v_m}{H + v_m t_{сп}}$$

Стоимость 1 м проходки равна:

$$C = \frac{C_1}{v_m} + \frac{C_1(t_{сп} + t_{пз}) + C_2}{H}, \quad (14)$$

где C_1 – стоимость 1 ч работы буровой установки, $t_{сп}$ – время, затраченное на спуско-подъемные операции; $t_{пз}$ – время, затраченное на подготовительно-заключительные операции; C_2 – стоимость долота. Режимные параметры устанавливаются исходя из максимума рейсовой скорости и минимума стоимости 1 м проходки. Для этого проводятся варианты расчеты этих показателей при заданных границах и шагах режимных параметров, которые выбираются исходя из данных конкретных условий. Экстремумы находим методом случайного поиска для условий изменения режимных параметров:

$$0,03 \leq \frac{G}{D} \leq 0,5, \text{ шаг } 0,1;$$

$$80 \leq n \leq 800, \text{ шаг } 20;$$

$$12 \leq Q \leq 30, \text{ шаг } 15.$$

Согласно результатам расчетов, для получения максимума рейсовой скорости ($v_p = 66,7$ м/ч) необходимо обеспечить следующие значения режимных параметров: $\frac{G}{d} = 0,3$ т/см; $n = 780$ мин⁻¹, $Q = 22,8$ л/с. При этом значение стоимости 1 м проходки в условно принятых единицах составит: $C = 870$ у. д. е./м; механическая скорость проходки $v_m = 80,9$ м/ч, проходка на долото $H = 184$ м.

Минимум стоимости 1 м проходки обеспечивается ($C = 820$ у. д. е.) при $\frac{G}{d} = 0,29$ т/см, $n = 780$ мин⁻¹, $Q = 28,7$ л/с. При этом рейсовая скорость $v_p = 63,6$ м/ч, механическая скорость $v_m = 71,6$ м/ч, проходка на долото $H = 275,9$ м.

Как видно из сравнения этих вариантов, во втором случае при незначительно меньших рейсовой и механической скоростях меньше и стоимость 1 м проходки, а также заметно выше проходка на долото. Поэтому в данном случае предпочтение следует отдать второму варианту (критерию стоимости 1 м проходки).

Таким образом, на основании полученных моделей в режиме реального времени по результатам геолого-технологических исследований обеспечивается возможность осуществления поиска оптимальных нагрузки на долото, частоты вращения и расхода бурового раствора, при которых обеспечивается максимум скорости проходки и минимум стоимости 1 м проходки.

Выводы. В результате исследований, основанных на статистическом анализе информации о бурении скважин, предложены математические модели в виде зависимостей текущих значений проходки и механической скорости от режимных параметров, показателей свойств горных пород и времени бурения для некоторых месторождений Азербайджана и Казахстана.

Приведены результаты определения зависимости механической скорости от времени бурения, установлены зависимости начальной механической скорости и темпа затухания механической скорости во времени от режимных параметров, которые позволяют проводить прогнозные расчеты рейсовой скорости и стоимости 1 м проходки. Предложены усовершенствованные модели прогнозирования показателей бурения и поиск оптимальных технологических решений, основывающиеся на использовании математической статистики, современных технологий обработки данных и анализа информации. Основная их задача – обеспечение максимальной рейсовой скорости при минимальных затратах на бурение 1 м проходки.

Предложены математические модели процесса бурения скважин, основными элементами которых являются механическая скорость проходки, а также факторы, влияющие на ее значения. Показана возможность использования этих моделей для исследования основных интегральных показателей эффективности процесса бурения: рейсовой скорости, стоимости проходки 1 м скважины и проходки на долото.

Разработана методика получения зависимости механической скорости от времени бурения в виде экспоненциальной зависимости, отличающейся от известных тем, что параметры данного выражения (темп снижения механической скорости во времени

и начальная механическая скорость) представляют собой функции режимных параметров и свойств горных пород.

Предложена усовершенствованная схема прогнозных расчетов показателей бурения и принятия решений при выборе долот и режимных параметров с учетом свойств горных пород в зависимости от характера исходной информации.

Предложен алгоритм прогнозирования показателей бурения скважин и принятия оптимальных решений по данным геолого-технологических исследований в процессе бурения. Использование алгоритма позволяет найти оптимальные значения режимных параметров из условия обеспечения максимума рейсовой скорости и минимума стоимости 1 м проходки.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской программы НАНА по теме “Комплекс теоретических и экспериментальных исследований междисциплинарных проблем геомеханики”, утвержденной Постановлением Президиума Национальной академии наук Азербайджана № 5/3 от 11 февраля 2015 г. (2015-2017 гг.).

1. *Дюсенов А.Т.* Повышение эффективности бурения скважин путем выбора оптимального сочетания типов долот и технологических параметров: автореф. дис... канд. техн. наук. — Атырау, 2008. — 23 с.
2. *Кершенбаум В.Я.* Буровой породоразрушающий инструмент. Т. 1. Шарошечные долота: международный транслятор-справочник / Под ред. В.Я. Кершенбаума, А.В. Торгашева, А.Г. Мессера. — М.: Нац. Ин-т нефти и газа, 2003. — 258 с.
3. *Кирисенко О.Г.* Разработка системы контроля за процессом бурения скважин с целью принятия решений в условиях неопределенности: автореф. дис... д-ра философии по техн. наукам. — Баку, 2012. — 24 с.
4. *Кузнецов Ю.А.* Оперативный контроль процесса бурения — новые решения / Ю.А. Кузнецов, С.Л. Любчанский, А.В. Пономарев // Каротажник. — 2002. — № 97. — С. 54–61.
5. *Литвинов М.А.* Система комплексного моделирования процессов при бурении нефтяных скважин на основе нечетких множеств: автореф. дис... канд. техн. наук. — Оренбург, 2005. — 24 с.
6. *Лозинський О.Є.* Алгоритм і програмна реалізація експертної оцінки локальних структур на нафтогазоносність / О.Є. Лозинський, В.О. Лозинський // Геоінформатика. — 2013. — № 3 (47). — С. 26–31.
7. *Лукьянов Э.Е.* Геолого-технологические исследования в процессе бурения / Э.Е. Лукьянов, В.В. Стрельченко. — М.: Нефть и газ, 1997. — 688 с.
8. *Меджидов Г.Н.* Повышение эффективности процесса бурения скважин с учетом закономерностей разрушения горных пород в осложненных условиях: автореф. дис... канд. техн. наук. — Баку, 1999. — 24 с.
9. *Политучий А.И.* Исследование и разработка математических моделей для создания средств информатизации и компьютеризации принятия решений в производственных процессах при строительстве нефтяных и газовых скважин: автореф. дис... канд. техн. наук [Электронный ресурс]. — Киев, 1995. — 21 с. — Режим доступа: <http://www.referun.com/n/issledovanie-i-razrabotka-matematicheskikh-modeley-dlya-sozdaniya-sredstv-informatizatsii-i-kompyuterizatsii-prinyatiya-re> (Дата обращения: 14.03.2016).
10. *Потапов О.А.* Определение эффективного времени работы долота / О.А. Потапов, А.Г. Потапов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2000. — № 8–9. — С. 8–11.
11. *Хаиров Г.Б.* Экологически безопасная технология строительства глубоких разведочных скважин. — М.: ВНИИОЭНГ, 1996. — 203 с.
12. *Эфендиев Г.М.* Построение и идентификация модели механической скорости проходки итерационным методом / Г.М. Эфендиев, Г.Н. Меджидов // Азербайджанское нефтяное хозяйство. — 1999. — № 6. — С. 25–30.
13. *Эфендиев Г.М.* Основные направления исследований свойств горных пород и процессов их разрушения с целью принятия оптимальных решений при бурении скважин / Г.М. Эфендиев, Г.Н. Меджидов, П.О. Рзаев // Нефтедобывающая промышленность. — Баку: АЗНИИТИ, 1998. — 36 с.
14. *Эфендиев Г.М.* Методы классификации объектов для решения геолого-технологических задач (обзор) / Г.М. Эфендиев, Л.А. Садых-заде, Н.М. Джафарова. — Баку: NaftaPress, 2002. — 56 с.
15. *Эфендиев Г.М.* Выбор оптимальных параметров бурения / Г.М. Эфендиев, М.Д. Сарбопеева, В.Л. Кызылгулов // Нефть и газ. — 2012. — № 3(69). — С. 41–43.
16. *Bezdek J.C.* The fuzzy *c*-means clustering algorithm / J.C. Bezdek, R. Ehrlich, W. Full // Computers and Geosciences. — 1984. — V. 10, iss. 2–3. — P. 191–203.
17. *Asli K.H.* Mathematical concepts for mechanical engineering design / K.H. Asli, H. Sahleh, S.A. Aliyev. — Waretown; New Jersey, USA: Apple Academic Press, 2013. — 246 p.
18. *Eren T.* Real-time-optimization of drilling parameters during drilling operations [thesis]. — Ankara, Turkey, 2010. — 145 p.
19. *Irawan S.* Optimization of Weight on Bit During Drilling Operation Based on Rate of Penetration Model / S. Irawan, A. Mahfuz, A.M. Abd Rahman, S.Q. Tunio // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. — 2012. — V. 4. — P. 1690–1695.

Поступила в редакцию 14.04.2016 г.

ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПІД ЧАС ВИБОРУ ДОЛІТ І РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ БУРІННЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ХАРАКТЕРУ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Г.М. Ефендієв¹, С.А. Алієв², М.Д. Сарбоєєва³, К.К. Агаєва⁴, О.Г. Кірісенко⁵

¹Інститут геології і геофізики НАН Азербайджану, просп. Г. Джавіда, 119, Баку AZ1073, Азербайджан, e-mail: galib_2000@yahoo.com

²Інститут математики і механіки НАН Азербайджану, вул. Б. Вахабзаде, 9, Баку AZ1141, Азербайджан, e-mail: soltanaliyev@yahoo.com

³Каспійський державний університет технологій та інжиніринг ім. Ш. Есенова, 32-й мкр., Актау 130003, Казахстан, e-mail: Manshyk84@mail.ru

⁴Інститут геології і геофізики НАН Азербайджану, просп. Г. Джавіда, 119, Баку AZ1073, Азербайджан, e-mail: kamila.agayeva@hotmail.com

⁵Інститут геології і геофізики НАН Азербайджану, просп. Г. Джавіда, 119, Баку AZ1073, Азербайджан, e-mail: oleg.kirisenko@gmail.com

Розглянуто актуальні питання отримання і правильного використання комплексної геолого-технологічної інформації з метою оперативного прийняття рішень під час буріння свердловин, проблему ефективності роботи доліт залежно від характеру цієї інформації. Запропоновано методику і алгоритм вибору доліт і режимних параметрів як найважливіші чинники оптимізації і зниження вартості бурових робіт для конкретних умов буріння. Проведено аналіз зміни механічної швидкості в часі, впливу режимних параметрів на початкову механічну швидкість і темп її загасання з побудовою статистичної моделі. Використано дані геолого-технологічних досліджень процесу буріння свердловин, дані щодо роботи доліт, відпрацьованих під час буріння на різних родовищах Азербайджану і Казахстану. Описано розроблений алгоритм оптимізації режимних параметрів у процесі буріння свердловин на основі двох критеріїв – рейсової швидкості та вартості 1 м проходки (на прикладі свердловини, пробуреної на площі Карабагли, Азербайджан). При вирішенні поставлених завдань використано статистичні методи обробки даних і аналізу інформації, метод випадкового пошуку, програму нечіткого кластер-аналізу, основні положення теорії нечітких множин. На підставі отриманих моделей наведено вдосконалену схему прогнозування показників буріння свердловин у режимі реального часу. За допомогою запропонованого алгоритму прогнозування, зважаючи на комплексну геолого-технологічну інформацію, можна приймати рішення щодо вибору оптимальних значень режимних параметрів, за яких забезпечуються максимум швидкості буріння і мінімум вартості 1 м проходки. Впровадження запропонованих рекомендацій дало змогу збільшити комерційну швидкість на 51,4 м / верстато-міс, тобто в 1,086 раза. При цьому економія витрат на 1 м дорівнювала 51,42 дол. США.

Ключові слова: геолого-технологічна інформація, оперативне прийняття рішення, долота, нечіткі множини, швидкість буріння, невизначеність, функція приналежності.

DECISION-MAKING IN CHOOSING DRILL BITS AND DRILLING OPERATIONAL PARAMETERS BASED ON INITIAL DATA

G.M. Efendiyev¹, S.A. Aliyev², M.D. Sarboeyeva³, K.K. Aghayeva⁴, O.G. Kirisenko⁵

¹Institute of Geology and Geophysics of Azerbaijan National Academy of Sciences, 119 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan, e-mail: galib_2000@yahoo.com

²Institute of Mathematics and Mechanics of Azerbaijan National Academy of Sciences, 9 B. Vahabzade Str., Baku AZ1141, Azerbaijan, e-mail: soltanaliyev@yahoo.com

³Caspian State University of Technologies and Engineering named after Sh. Yesenov, Aktau, 32 micro district, Mangystau region 130003, The Republic of Kazakhstan, e-mail: manshyk84@mail.ru

⁴Institute of Geology and Geophysics of Azerbaijan National Academy of Sciences, 119 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan, e-mail: kamila.agayeva@hotmail.com

⁵Institute of Geology and Geophysics of Azerbaijan National Academy of Sciences, 119 H. Javid Ave., Baku AZ1073, Azerbaijan, e-mail: oleg.kirisenko@gmail.com

The **purpose** of the paper is to discuss some practical issues regarding the obtaining and usage of complex geological and technological data to assist in decision-making during drilling operations and to suggest methodology and algorithm for bit selection and operational parameters to increase economic viability for specific drilling operations.

Design/methodology/approach. We analyzed the change of mechanical speed with time and effects of operational parameters on diminishing the effect of rock properties by developing a statistical model. We used geological drilling process research along with drill bit operational data from various Azerbaijani and Kazakhstan oil fields. We described

an operational parameters optimization algorithm using the data of Karabagly (Azerbaijan) oilfield well, where the following 2 criteria were taken into account: bit run rate and one meter drilling cost.

Practical value/implications. In solving the problems mentioned above, we used statistical models and analysis, random search method and cluster-analysis program. Fuzzy sets concepts were also applied.

Findings. Advanced prediction scheme for drilling operations in real time has been developed based on the obtained models. The suggested prediction algorithm assists in decision-making of optimal drilling parameters which maximize the drilling rate and minimize the cost. Implementation of these models has led to an increase in speed by 51.4, 8.6%, decreasing the cost by \$51.42 per meter.

Keywords: geological technical information, swift decision making, drill bits, fuzzy sets, penetration rate, uncertainty, accessories function.

References:

1. Dyusenov A.T. Povyshenie effektivnosti bureniya skvazhin putem vybora optimal'nogo sochetaniya tipov dolot i tekhnologicheskikh parametrov: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. Atyrau, 2008, 23 p. (in Russian).
2. Kershenbaum V.Ya., Torgashev A.V., Messer A.G. Burovoy porodorazrushayushchiy instrument. T. 1. Sharoshechnye dolota: mezhdunarodnyy translyator-spravochnik. Moscow, Natsional'nyy institut nefti i gaza, 2003, 258 p. (in Russian).
3. Kirisenko O.G. Development process control system for drilling for decision-making under uncertainty: avtoref. dis... dokt. filos. tekhn. nauk. Baku, 2012, 24 p. (in Russian).
4. Kuznetsov Yu.A., Lyubchanskiy S.L., Ponomarev A.V. Operativnyy kontrol' protsessa bureniya – novye resheniya. *Karotazhnik*, no. 97, 2002, pp. 54-61 (in Russian).
5. Litvinov M.A. Sistema kompleksnogo modelirovaniya protsessov pri burenii neftnykh skvazhin na osnove nechetkikh mnozhestv: avtoref. diss... kand. tekhn. nauk. Orenburg, 2005, 24 p. (in Russian).
6. Lozynskiy O.E., Lozynskiy V.O. An algorithm and routine for peer assessment of prospects for petroleum productivity of local structures. *Geoinformatika*, 2013, no. 3, pp. 26-31 (in Ukrainian).
7. Lukyanov E.E., Strelchenko V.V. Geological and Technological Studies While Drilling. Moscow, Oil and Gas, 1997, 688 p. (in Russian).
8. Medzhidov G.N. Povyshenie effektivnosti protsessa bureniya skvazhin s uchedom zakonomernostey razrusheniya gornykh porod v oslozhnennykh usloviyakh: avtoref. diss... kand. tekhn. nauk. Baku, 1999, 24 p. (in Russian).
9. Polytuchiy A.I. Research and elaboration of the mathematical models for creation of informatization and computerization means of decision making at industrial processes while constructing wells for oil and gas: avtoref. diss... kand. tekhn. nauk. "Mathematical modelling in scientific researches". Kyiv, 1995, 21 p. Available at: <http://www.referun.com/n/issledovanie-i-razrabotka-matematicheskikh-modeley-dlya-sozdaniya-sredstv-informatizatsii-i-kompyuterizatsii-prinyatiya-re> (Accessed 14 March 2016) (in Russian).
10. Potapov O.A., Potapov A.G. Opredelenie effektivnogo vremeni raboty dolota. *Stroitel'stvo neftnykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2000, № 8-9, pp. 8-11 (in Russian).
11. Khairov G.B. Ekologicheski bezopasnaya tekhnologiya stroitel'stva glubokikh razvedochnykh skvazhin. Moscow, VNIIOENG, 1996, 203 p. (in Russian).
12. Efendiev G.M., Medzhidov G.N. Postroenie i identifikatsiya modeli mekhanicheskoy skorosti prokhodki iteratsionnym metodom. *Azerbaydzhanskoe neftyanoe khozyaystvo*, 1999, no. 6, pp. 25-30 (in Russian).
13. Efendiev G.M., Medzhidov G.N., Rzaev P.O. Osnovnye napravleniya issledovaniy svoystv gornykh porod i protsessov ikh razrusheniya s tsel'yu prinyatiya optimal'nykh resheniy pri burenii skvazhin. *Neftedobyvayushchaya promyshlennost*, Baku, AzNIINTI, 1998, 36 p. (in Russian).
14. Efendiev G.M., Sadykh-zade L.A., Dzhafarova N.M. Metody klassifikatsii obektov dlya resheniya geologo-tekhnologicheskikh zadach (obzor). Baku, NaftaPress, 2002, 56 p. (in Russian).
15. Efendiev G.M., Sarbopeeva M.D., Kyzylgulov V.L. Vybora optimal'nykh parametrov bureniya. *Oil and gas*, 2012, no. 3, pp. 41-43 (in Russian).
16. Bezdek J.C., Ehrlich R., Full W. The fuzzy *c*-means clustering algorithm. *Computers and Geosciences*, 1984, vol. 10, iss. 2-3, pp. 191-203.
17. Asli K.H., Sahleh H., Aliyev S.A. Mathematical concepts for mechanical engineering design. Waretown, New Jersey, USA, Apple Academic Press, USA, 2013, 246 p.
18. Eren T. Real-time-optimization of drilling parameters during drilling operations [thesis]. Ankara, Turkey, 2010, 145 p.
19. Irawan S., Mahfuz A., Abd Rahman A.M., 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, vol. 4, pp. 1690-1695.

Received 14/04/2016