



Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев

В.В.НЕСКОРОМНЫХ, М.С.ПОПОВА✉

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Соответствие требованиям к буровым работам достигается введением прогрессивных подходов в управлении процессом бурения. Основным требованием является снижение временных и материальных затрат на прохождение скважины. Повышение скорости бурения обеспечивается рациональным подбором породоразрушающего инструмента и режимов его использования. Разработка нового поколения породоразрушающего инструмента – трудоемкий процесс и нуждается в системном, комплексном подходе. Чтобы высокие затраты на разработку и изготовление инструмента окупались, не увеличивая существенно себестоимость буровых работ, значительное внимание следует уделять научно обоснованным методикам его отработки. При бурении скважин с применением забойных телеметрических систем при полном компьютерном сопровождении процесса бурения имеется обоснованная возможность использования методики управления, основанной на объективных результатах бурового процесса, поступающих непосредственно с забоя скважины в режиме реального времени. Применение полного факторного эксперимента является оправданным для обработки данных, влияющих на показатели бурения.

Целью исследований является разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев в режиме онлайн. Объекты исследований: механизм разрушения горной породы при бурении; параметры, влияющие на процесс бурения скважин; оптимизация процессов бурения скважин. В исследовании использованы: экспериментальное бурение алмазным инструментом на стенде, метод полного факторного эксперимента, аналитические исследования.

В статье выделены факторы, влияющие на эффективность работы алмазного породоразрушающего инструмента в процессе бурения скважины, отмечены основные критерии, влияющие на эффективность процесса бурения. А также описан механизм объемного разрушения, определены условия разрушения горной породы при различных режимах бурения и зависимости изменения углубления за оборот от параметров режимов бурения. Рассмотрена методика управления параметрами режима бурения, позволяющая определить по косвенным признакам режим разрушения горной породы на забое скважины и выбрать оптимальные значения параметров режима бурения, которые соответствуют наиболее выгодным условиям.

Ключевые слова: алмазное бурение; полный факторный эксперимент; алмазные буровые инструменты; управление процессом бурения; отработка бурового инструмента

Как цитировать эту статью: Нескоромных В.В. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев / В.В.Нескоромных, М.С.Попова // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 701-710. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.701

Введение. Современное бурение характеризуется применением дорогостоящих буровых инструментов, призванных обеспечить как высокий темп проходки, так и значительный, непрерывно растущий по мере создания новых сверхтвёрдых материалов, ресурс [9, 13, 18].

Новые технологии в области материаловедения и конструирования инструментов для обработки и разрушения твердых тел, а также многолетний опыт применения средств разрушения горных пород при бурении выявили наиболее перспективный буровой инструмент – алмазный породоразрушающий инструмент, который на современном этапе развития характеризуется тем, что для изготовления коронок и долот применяются искусственные алмазы как в виде кристаллов различного размера, так и резцов PDC (polycrystalline diamante cutters) [1, 5, 9, 10, 12, 13, 15, 17].

В разработке бурового инструмента можно выделить такие тенденции: для разрушения твердых кристаллических горных пород создаются в основном импрегнированные коронки и долота, ресурс которых определяется качеством алмазного сырья малой зернистости и степенью износостойкости (твёрдости) матрицы, а для разрушения мягких горных пород и пород средней твёрдости – буровые инструменты с резцами PDC [3].

Постановка проблемы. Разработка бурового породоразрушающего инструмента, армированного алмазным материалом, требует одновременного изучения многих факторов, влияющих на эффективность его работы на забое [7, 11]. Таким фактором является анализ аспектов механизма разрушения горной породы с учетом индивидуальных особенностей вооружения и состояния буровых инструментов и разбуриваемых типов горных пород, а также режим управления



процессом бурения. Режим управления процессом бурения должен выстраиваться с использованием имеющихся компьютерных технологий [4, 14, 16] и современных высокотехнологичных забойных телеметрических систем, позволяющих «вести» процесс бурения, регулируя ключевые параметры управления в режиме текущего времени, фиксируя и обрабатывая поступающие выходные данные:

- осевую нагрузку на забой, частоту вращения бурового инструмента, крутящий момент и забойную мощность;
- параметры вибрации бурового инструмента;
- углубление за один оборот вращения инструмента на забое $h_0 = v_0/n$, где n – частота вращения породоразрушающего инструмента, мин^{-1} ; v_0 – механическая скорость бурения, м/ч .
- энергоемкость процесса разрушения горной породы N/v_0 , где N – мощность, потребляемая на разрушение горной породы на забое скважины (забойная мощность), kВт .

Целью управления является достижение максимально высокого ресурса инструмента при высоких, но не предельных, значениях механической скорости проходки.

По мнению авторов, результата можно достичь, основываясь на комплексном анализе критериев процесса бурения скважины.

Комплексный анализ критериев процесса бурения скважин. Набор представленных для анализа критериев в полной мере характеризует процесс разрушения горной породы при бурении. Так, механическая скорость дает показатель буримости и темп проходки, а критерий углубления бурового инструмента за один оборот на забое дает возможность управления процессом бурения по заданному оптимальному значению этого параметра.

Критерий энергоемкости N/v_0 [8] отражает, прежде всего, возможный ресурс бурового инструмента, поскольку минимизация этого критерия позволяет получить максимальную проходку на инструмент и оптимизировать затраты на бурение, особенно протяженных скважин, при бурении которых доля времени на вспомогательные и спуско-подъемные операции значительно возрастает.

Поэтому значительное внимание следует уделять научно обоснованным методикам отработки современного бурового инструмента, с тем чтобы высокие затраты окупались, существенно не увеличивая себестоимость буровых работ. При бурении скважин на нефть и газ с применением забойных телеметрических систем при полном компьютерном сопровождении процесса бурения имеется вполне обоснованная возможность использования методики управления, основанной на объективных результатах бурового процесса, поступающих непосредственно с забоя скважины в режиме реального времени.

Для анализа в рамках разрабатываемой методики используются текущие значения параметров, поступающих с забоя скважины от датчиков забойной телеметрической системы, это реальные значения частоты вращения бурового инструмента n , осевой нагрузки P_{oc} и крутящего момента на буровом инструменте M_{kp} . Забойная мощность N рассчитывается из простой зависимости $N = M_{kp}n$ на основании полученных значений параметров.

Методология. Обработка получаемых в режиме текущего времени данных может осуществляться в соответствии с методикой полного факторного эксперимента с использованием двух (осевая нагрузка P_{oc} , kН и частота вращения n , мин^{-1}) или трех (осевая нагрузка, частота вращения и количество бурового раствора Q), влияющих на показатели бурения, факторов k в соответствии с алгоритмом $N = 2^k$, где k – число факторов [2, 6].

Методика полного факторного эксперимента позволяет оптимизировать анализ данных и получить эмпирические модели процессов со статистически значимыми коэффициентами вида:

$$\begin{aligned} v_0 &= A + BP_{oc} + Cn + DP_{oc}n; \\ h_0 &= E + FP_{oc} + D\omega + HP_{oc}n; \\ \frac{N}{v_0} &= K + LP_{oc} + Mn + SP_{oc}n, \end{aligned} \tag{1}$$



где наряду с параметрами режима бурения P_{oc} и n указаны числовые значения коэффициентов, рассчитываемые в соответствии с методикой полного факторного эксперимента.

Совокупный анализ моделей (1) позволяет решать задачи поиска наиболее приемлемых значений параметров, ориентированных на высокие темпы проходки и высокий ресурс бурового инструмента. Например, одна из представленных выше моделей может применяться для определения рациональной величины осевого усилия при выбранном значении частоты вращения и заданной величине углубления за один оборот

$$P_{oc} = \frac{h_0 - E - Dn}{F + Hn}. \quad (2)$$

Так, выбирая величину частоты вращения n при заданной величине углубления за один оборот h_0 , можно определить соответствующую этой частоте вращения и заданному углублению оптимальную величину осевой нагрузки.

Если в качестве третьего фактора, оказывающего влияние на процесс бурения, рассмотреть количество подаваемой промывочной жидкости Q , модель будет иметь вид

$$h_0 = A + BP_{oc} + Cn + FQ + DP_{oc}nQ. \quad (3)$$

Решение может производиться следующим образом: сначала рассчитываются осевое усилие P_{oc} по формуле (2) и модель для углубления за оборот h_0 по формуле (1), далее вычисляется значение подачи промывочной жидкости

$$Q = \frac{h_0 - A - BP_{oc} - Cn}{DP_{oc}n + F}. \quad (4)$$

Построение данных моделей и решение уравнений для определения P_{oc} и Q при реализации методики управления процессом бурения скважины следует производить на компьютере, управляющем процессом бурения в режиме реального времени с мгновенной оценкой углубления за один оборот, скорости бурения и энергоемкости процесса разрушения горной породы, рассчитываемых последовательно по мере отработки бурового инструмента.

Наглядность анализа исследуемого процесса при использовании полного факторного эксперимента решается путем графической интерпретации моделей вида (1).

Рассмотрим возможности анализа забойной ситуации при отработке бурового инструмента на примере бурения габбро алмазным однослойным инструментом (коронка 01А3-59) с применением в качестве буровых жидкостей воды и воды с поверхностно-активным веществом (ПАВ). Результаты бурения, выполненного на буровом стенде, приведены в таблице.

Критерии оптимизации, рассчитанные по данным бурения габбро коронкой 01А3-59

Частота вращения n , мин ⁻¹	Осевая нагрузка P_{oc} , кН	Механическая скорость бурения при промывке v_0 , м/ч		Затраты мощности на бурение при промывке N_0 , кВт		Энергоемкость разрушения горной породы при бурении при промывке $N_0/v_0 \rightarrow \min$, кВт·ч/м	
		водой	водой + ПАВ	водой	водой + ПАВ	водой	водой + ПАВ
625	3	1,6	2,5	1,4	1,6	0,88	0,64
	6	3,2	4,4	2,8	2,7	0,88	0,61
	9	5,1	5,4	3,8	3,9	0,75	0,72
	12	6,2	6,3	4,7	5,4	0,76	0,86
	15	6,6	7,5	6,8	6,6	1,03	0,88
1020	3	2,1	3,2	2,1	2,06		0,63
	6	4,5	6,1	3,7	4,09	0,82	0,67
	9	6,1	7,8	5,7	6,9	0,93	0,88
	12	6,8	8,7	9,5	8,7	1,4	1
	15	6,1	9,9	11,5	9,4	1,88	0,95
1480	3	2,7	4,2	2,6	2,9	0,96	0,69
	6	5,8	8,4	5,0	5,96	0,86	0,71
	9	6,9	9,8	8,0	8,7	1,16	0,89
	12	8,6	10,6	12,2	12,5	1,42	1,18
	15	8,2	9,8	16,1	16,46	1,96	1,68



После обработки данных получены модели в соответствии с планом полного факторного эксперимента, отражающие процесс бурения габбро с промывкой технической водой при постоянной подаче:

$$v_6 = 4,78 + 2,63 P_{oc} + 0,675 n + 0,125 P_{oc} n; \quad (5)$$

$$h_0 = 0,085 + 0,049 P_{oc} - 0,024 n - 0,0185 P_{oc} n; \quad (6)$$

$$\frac{N_6}{v_6} = 1,21 + 0,29 P_{oc} + 0,25 n + 0,21 P_{oc} n. \quad (7)$$

При промывке водой с добавлением ПАВ получены иные модели, отражающие процесс разрушения горной породы при бурении:

$$v_6 = 6,0 + 2,65 P_{oc} + n + 0,15 P_{oc} n; \quad (8)$$

$$h_0 = 0,083 + 0,026 P_{oc} - 0,045 n + 0,19 P_{oc} n; \quad (9)$$

$$\frac{N_6}{v_6} = 0,97 + 0,31 P_{oc} + 0,21 n + 0,0094 P_{oc} n. \quad (10)$$

Как следует из данных аналитических моделей, применение бурового раствора с ПАВ привело к повышению механической скорости бурения в среднем на 21 %, снижению энергоемкости бурения на 20 %. При этом величина углубления за один оборот коронки на забое не увеличилась, но существенно изменился уровень влияния частоты вращения и осевого усилия на величину углубления за один оборот коронки на забое: влияние осевого усилия снизилось почти в два раза, а влияние частоты вращения возросло на 47 %.

Наглядно представленные выводы следуют из графической интерпретации полученных аналитических моделей. На рис.1 приведены графики, построенные по уравнениям (5)-(10), в зависимости от значений частоты вращения и осевой нагрузки на буровой инструмент. Анализ представленных графиков позволяет выделить рациональные значения углубления за один оборот, соответствующие как высокому уровню механической скорости бурения, так и умеренной энергоемкости разрушения горной породы. Полученные модели и графики позволяют осуществлять рациональное управление параметрами режима бурения. Например, зависимость (2) может иметь графическое решение, показывающее возможности предлагаемой методики управления режимами бурения.

На рис.1, *в* приведен пример использования выявленной функциональной зависимости осевого усилия на буровой инструмент от частоты вращения для конкретного случая бурения. Так, если задана определенная величина углубления за один оборот как основной параметр управления процессом бурения (в данном случае 0,097 мм/об), то при частоте вращения n_1 будет необходимо поддерживать осевую нагрузку P_1 , а при увеличении частоты вращения, например, для повышения механической скорости бурения, до величины n_2 осевая нагрузка должна будет возрасти до P_2 .

При этом анализ точек 1 и 2 (рис.1, *д*) показывает, что энергоемкость бурения, определяющая ресурс инструмента, выросла с 1,02 до 1,1 кВт·ч/м, что означает снижение ресурса инструмента примерно на 7 %. Скорость бурения (рис.1, *а*) при этом может возрасти с 5 до 6,3 м/ч, т.е. на 20 %. Таким образом, возможен поиск наиболее выгодных параметров режима бурения на основе комплексного анализа наиболее оптимального сочетания параметров трех критериев оптимизации процесса бурения.

На рис.1, *д* выделена область управления параметрами режима бурения по величине углубления за один оборот и круг допустимых значений в центральной части графика показывает наиболее подходящие границы этого управления.

При бурении габбро с использованием ПАВ (рис.1, *б*, *г*, *е*) получены несколько большая механическая скорость и углубление за один оборот и более умеренные значения энергоемкости бурения. Для этих условий бурения могут быть применены иные рациональные параметры режима бурения, если придерживаться прежних значений углубления за один оборот (см. рис.1, *г*).

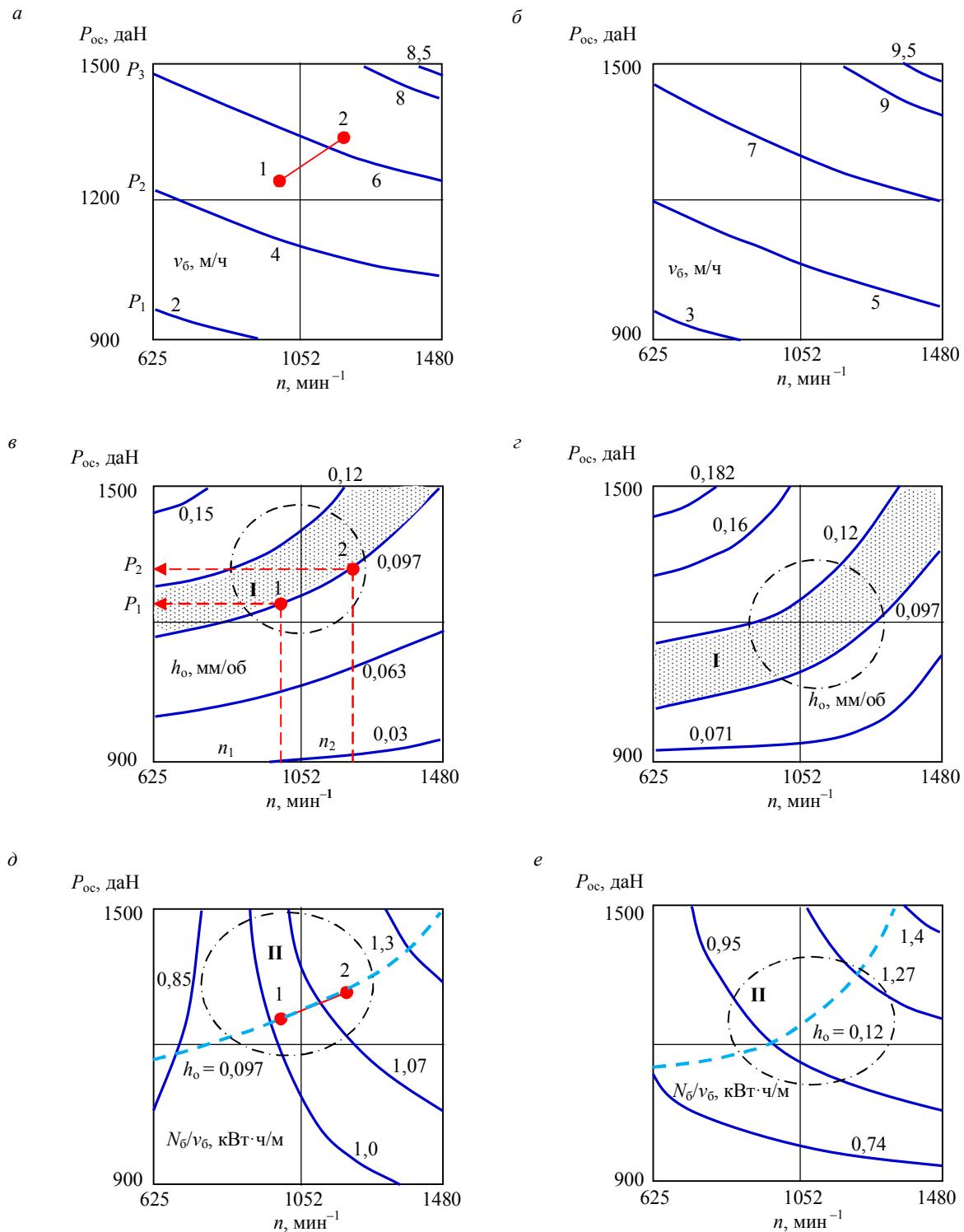


Рис.1. Графическая интерпретация уравнений механической скорости бурения (a, б), углубления за оборот (в, г) и критерия N_6/v_6 (д, е) для однослойной алмазной коронки 01А3-59 при бурении габбро и промывке водой (а, в, д) и ПАВ (б, г, е)
I и II – рациональные области вращения и осевой нагрузки соответственно

Под оптимальным углублением за один оборот понимается величина срезания-скалывания породы за один оборот вращения бурового инструмента на забое, заданная таким внедрением резцов в породу, при котором происходит объемное разрушение горной породы, но не наблюдается повышенного изнашивания резцов, а энергоемкость разрушения имеет умеренные значения или тенденцию к снижению.

С целью оценки процесса разрушения горной породы и выявления аналитической связи параметров режима бурения при заданном углублении коронки в породу за один оборот вращения

необходимо произвести расчеты с использованием полученных аналитических моделей и соответствующих графиков (см. рис.1, *a*, *б*). Для расчета величины углубления при различных значениях частоты вращения и осевой нагрузки следует произвести расчеты, используя пересечения линий механической скорости с вертикальными линиями, которые определяют значения частоты вращения. Например, для минимального значения частоты вращения 625 мин^{-1} (см. рис.1, *а*) имеем три пересечения с линиями скоростей 2, 4 и 6 м/ч, соответственно можно получить три значения углубления за один оборот:

$$h_{o1} = \frac{v_M}{n} = \frac{2}{625 \cdot 60} = 0,05 \text{ мм/об};$$

$$h_{o2} = \frac{v_M}{n} = \frac{4}{625 \cdot 60} = 0,1 \text{ мм/об};$$

$$h_{o3} = \frac{v_M}{n} = \frac{6}{625 \cdot 60} = 0,15 \text{ мм/об}.$$

Полученным значениям h_{o1} , h_{o2} , h_{o3} на графике (см. рис.1, *а*) соответствуют значения P_{oc} : $P_1 = 950 \text{ даH}$, $P_2 = 1210 \text{ даH}$ и $P_3 = 1480 \text{ даH}$.

Таким образом, определяется зависимость углубления за один оборот коронки на забое от осевой нагрузки при минимальном значении частоты вращения. Для расчета подобной зависимости при частоте вращения 1052 мин^{-1} используются пересечения с осью графика линий со значениями механической скорости бурения 4 и 6 м/ч, а для частоты вращения 1480 мин^{-1} пересечения с линиями механических скоростей 4, 6 и 8 м/ч.

В результате расчетов получена графическая зависимость углубления за один оборот коронки на забое от осевой нагрузки при различных значениях частоты вращения коронки (рис.2).

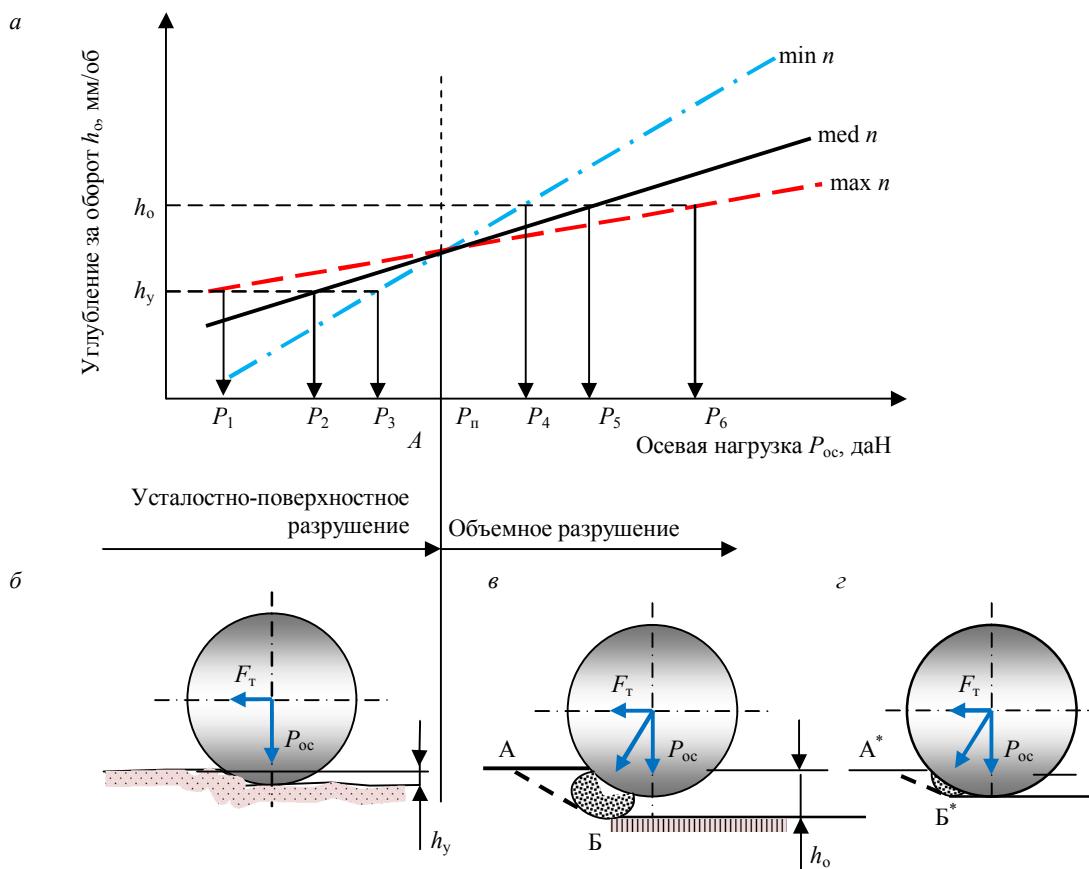


Рис.2. Зависимость углубления от параметров режима бурения (*а*) и схемы, поясняющие усталостно-поверхностное (*б*) и объемное (*в*, *г*) разрушение породы под действием осевого P_{oc} и тангенциального F_T усилий



На рис.2, *a* дана зависимость углубления за один оборот от частоты вращения и осевого усилия. Графики построены по данным скорости бурения (см. рис.1, *a*) и объективно отражают процесс разрушения горных пород. Величина углубления за один оборот возрастает при повышении осевого усилия независимо от частоты вращения коронки. Это связано с тем, что по мере роста осевой нагрузки повышается заглубление резцов в породу.

Сложный характер имеет зависимость углубления за один оборот от частоты вращения. В случае, когда осевая нагрузка недостаточна для объемного разрушения породы (интервал усталостно-поверхностного разрушения), большие значения углубления за один оборот h_o характерны для бурения на более высоких частотах вращения бурового инструмента, а углубление за один оборот равное h_y по мере снижения частоты вращения достигается при более высокой осевой нагрузке P_1, P_2, P_3 (рис.2, *a*). Это объясняется тем, что вследствие циклически повторяющихся нагрузений породы и образования, а также развития трещин в породе режим усталостного разрушения оказывает влияние на снижение твердости и прочности породы. При недостаточной осевой нагрузке для внедрения в породу резца этот режим разрушения будет более интенсивным в случае более высокой частоты вращения коронки. Повышение частоты вращения приведет к большему заглублению резцов, а значит и углублению за один оборот.

При определенной осевой нагрузке P_n режим разрушения становится объемным, поскольку нарастающая осевая нагрузка уже оказывается достаточной для внедрения резца в породу. При этом режиме разрушения большее углубление за один оборот достигается уже при меньшей частоте вращения, и по мере роста частоты вращения углубление за один оборот снижается.

Действие данного механизма состоит в том, что при образовании борозды разрушения порода скальвается перед резцом по поверхности в направлении забоя (линия АБ на рис.2, *в*). Оптимальными будут условия разрушения породы, при которых скорость перемещения резца будет равна скорости образования трещины отрыва породы по линии АБ в направлении от ядра сжатия к поверхности забоя скважины. При повышении частоты вращения скорость образования трещины отрыва породы перед резцом может отставать от скорости перемещения резца. Испытывая повышенную сопротивляемость породы перемещению, резец «всплывает» (рис.2, *г*). Это связано со снижением глубины его внедрения в породу и повышением выталкивающего сопротивления не успевшей разрушиться породы. «Всплытие» резца происходит, пока не уменьшится длина трещины отрыва А^{*}Б^{*}, чтобы вновь время поступательного перемещения резца соответствовало времени образования трещины отрыва А^{*}Б^{*}.

При объемном разрушении породы равное углубление за один оборот h_{ob} может быть получено при повышении частоты вращения путем увеличения осевого усилия на строго заданную величину P_4, P_5, P_6 (рис.2, *a*).

Объемное разрушение горной породы будет в наибольшей степени эффективно при обеспечении наиболее полной очистки забоя от шлама и такого сочетания частоты вращения и осевого усилия, при котором скорость формирования трещины отрыва АБ (рис.2, *в*) равнялась бы скорости перемещения резца породоразрушающего инструмента. При этом напряжения в ядре сжатия породы будут достаточны для эффективного скальвания породы передней гранью резца под действием касательных и растягивающих напряжений. Именно такие условия разрушения горной породы могут соответствовать максимально эффективному процессу разрушения. При этом достигается минимальная энергоемкость разрушения породы и высокий ресурс бурового инструмента.

В случае недостаточного количества подаваемого к забою очистного агента Q из-за зашламования забоя условия разрушения будут ухудшаться. При достаточной для объемного разрушения породы осевой нагрузке наблюдается режим, сходный с усталостно-поверхностным. Резцы коронки, повторно измельчая шламовую подушку, не могут создавать достаточных для эффективного разрушения породы напряжений. В этом случае зависимость углубления за один оборот от частоты вращения будет как при режиме усталостно-поверхностного разрушения, при котором большее углубление за один оборот достигается при более высокой частоте вращения бурового инструмента (рис.3, *а, б*).

При избытке подачи бурового раствора наступит эффект гидравлического подпора бурового инструмента. Определенная доля осевого усилия будет расходоваться на преодоление гидравлического сопротивления, что приведет к аналогичному процессу разрушения породы.

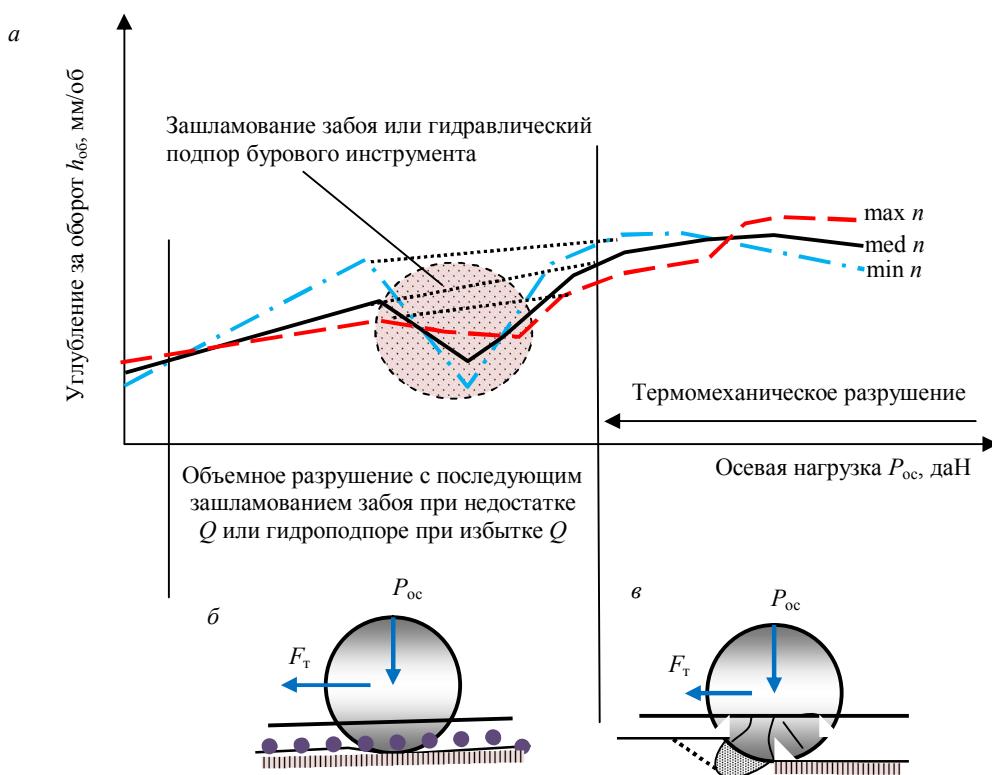


Рис.3. Зависимость углубления за один оборот от параметров режима бурения (а) и схемы, поясняющие процесс объемного разрушения при зашламовании забоя (б) и термомеханическом разрушении (в)

При чрезмерном повышении осевой нагрузки наступает сложный режим термомеханического разрушения породы (рис.3, в). Однако, при этом наблюдается разрушение коронки в результате ее термического разупрочнения. Слишком высокая частота вращения приводит к разрушению резцов, что сопровождается ощутимым снижением углубления породоразрушающего инструмента в забой скважины [6].

Анализ участка графика (см. рис.2, а) с интервалом объемного – наиболее эффективного – режима разрушения, позволяет получить в режиме текущего времени проходки скважины наиболее рациональное соотношение основных параметров: частоты вращения и осевой нагрузки на буровой инструмент при заданном значении углубления за один оборот.

Если углубление за один оборот задано на уровне h_0 (см. рис.2, а), значениям частоты вращения будут соответствовать значения осевого усилия P_4 , P_5 и P_6 . В результате такого решения при заданном углублении будет получена зависимость, которая строго определяет связь параметров (рис.4). В данном случае показано решение на основе анализа трех значений частоты вращения и осевой нагрузки, а также вариант с пятью значениями частоты вращения и осевой нагрузки, алгоритм 2 отличается большей точностью. Точность решения может быть повышенена при анализе большего количества точек измерений. Количество подаваемой буровой жидкости также можно учесть в случае выбора значений осевого усилия при изменении частоты вращения бурового инструмента.

Результаты исследований. Параметр энергоемкости разрушения горной породы при бурении (см. рис.1, д, е) позволяет выбирать интервал варьирования значениями режима бурения с учетом прогнозируемого ресурса бурового инструмента, поскольку этот параметр находится в строгой зависимости от ресурсных возможностей бурового инструмента. Например, с учетом умеренной энергоемкости могут

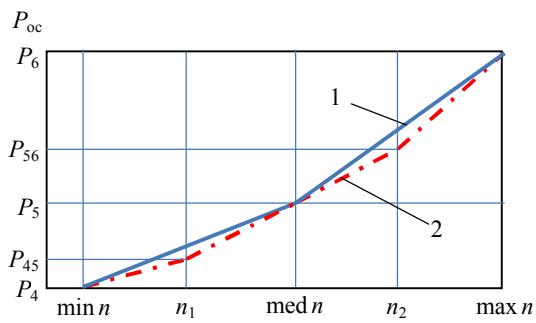


Рис.4. Алгоритм управления параметрами режима бурения на интервале объемного разрушения буровым инструментом горной породы:
1 – по трем значениям частоты вращения n и осевого усилия P_4 , P_5 , P_6 ;
2 – по пяти значениям частоты вращения n и осевого усилия P_4 , P_{45} , P_5 , P_{56} , P_6



быть определены рациональные значения углубления за один оборот 0,097 и 0,12 мм/об и области значений частоты вращения и осевой нагрузки II (рис.1, *д*, *е*), которые обеспечат более значительный ресурс бурового инструмента. Для бурения с более высокой скоростью, но меньшим ресурсом инструмента для управления может выбираться более высокое значение углубления за один оборот и область управления с увеличенной энергоемкостью, что соответствует более высоким значениям частоты вращения инструмента и осевого усилия.

Заключение. Рассмотренная методика управления параметрами режима бурения, выстроенная как алгоритм поиска оптимальных условий по трем основным критериям с применением поступающих в режиме реального времени данных о бурении, позволяет определить по косвенным признакам режим разрушения горной породы на забое скважины и выбрать оптимальные значения параметров режима бурения, которые, в свою очередь, соответствуют наиболее выгодным условиям разрушения горной породы. В данном случае наиболее эффективно используются возможности современной буровой техники, высокотехнологичного и дорогостоящего бурового инструмента, забойных телеметрических систем и компьютерных технологий, что позволяет выстраивать технологию, ориентированную на высокую производительность и высокий ресурс бурового инструмента.

В результате исследований можно сделать следующие выводы.

1. Объективный анализ процесса разрушения горных пород при бурении и выбор оптимальных параметров управления процессом бурения возможен на основе комплексного анализа таких критерии как механическая скорость бурения, углубление за один оборот вращения бурового инструмента на забое скважины и энергоемкость разрушения горной породы при бурении.

2. Технические возможности современного бурения позволяют определять в процессе проходки необходимые для анализа параметры в режиме реального времени (online) при использовании современных забойных телеметрических систем, а также возможностей компьютерных технологий, с помощью которых анализ полученных с забоя параметров может преобразовываться и анализироваться с целью получения алгоритма управления процессом бурения.

3. В качестве метода аналитического исследования параметров и анализа процесса бурения может использоваться метод полного факторного эксперимента, который с высокой точностью позволяет получить аналитические модели и провести их геометрическую интерпретацию, определяя по косвенным признакам как механизм разрушения горной породы, так и области наиболее эффективных значений параметров бурения с целью выявления, при определенных заданных параметрах, рационального соотношения значений частоты вращения инструмента, осевой нагрузки и количества подаваемой в скважину буровой жидкости.

4. В качестве основного параметра управления процессом бурения может применяться заданное значение углубления скважины за один оборот вращения бурового инструмента на забое при установленных значениях энергоемкости разрушения горной породы во время бурения в определенной на основании проанализированных данных области объемного разрушения горной породы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гореликов В.Г. Исследование механизма углубки скважин при алмазном бурении / В.Г.Гореликов, Г.А.Блинов // Техника, технология и организация геологоразведочных работ. 1994. № 6. С. 53-55.
2. Грачев Ю.П. Математические методы планирования эксперимента / Ю.П.Грачев, Ю.М.Плаксин. М.: ДeЛи прнт, 2005. 296 с.
3. Инновационные подходы к конструированию высокоеффективного породоразрушающего инструмента / А.Я.Третьяк, В.В.Попов, А.Н.Грессу, К.А.Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225-230.
4. Литвиненко В.С. Обоснование выбора параметров режима бурения скважин роторными управляемыми системами / В.С.Литвиненко, М.В.Двойников // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 24-29. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.24
5. Нескоромных В.В. Аналитическое исследование процесса резания-скальвания горной породы долотом с резцами PDC / В.В.Нескоромных, К.И.Борисов // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 191-195.
6. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. 199 с.
7. Нескоромных В.В. Основы системного подхода к проектированию бурового инструмента / В.В.Нескоромных, М.С.Попова // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 8. С. 26-31. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-8-26-31



8. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин: М.: ИНФРА-М; Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015. 336 с.
9. Повышение эффективности колонкового алмазного бурения / Б.И.Воздвиженский, Г.А.Воробьев, Л.К.Горшков и др. М.: Недра, 1990. 208 с.
10. Сверхтвёрдые материалы в геологоразведочном бурении / П.В.Зыбинский, Р.К.Богданов, А.П.Закора, А.М.Исонкин. Донецк: Норд-Пресс, 2007. 244 с.
11. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002. Vol. 39. Iss. 1. P. 41-58. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00007-2
12. Hasan A.R. Wellbore heat-transfer modeling and applications / A.R.Hasan, S.Kabir // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2012. Vol. 86-87. P. 127-136. DOI: 10.1016/S.petrol.2012.03.021
13. Huang H. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting / H.Huang, B.Lecampion, E.Detournay // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2013. Vol. 37. Iss. 13. P. 1913-1929. DOI: 10.1002/nag.2113
14. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H.Aslaksen, M.Annand, R.Duncan, A.Fjaere, L.Paez, U.Tran // Society of Petroleum Engineers / SPE Drilling Conference. 2006. 21-23 February. Miami, Florida, USA. P. 669-684. DOI: 10.2118/99018-MS
15. Litvinenko V.S. XVIII International Coal Preparation Congress: Saint-Petersburg, 28 June-01 July 2016 / Springer International Publishing. 2016. Vol. 1. P. 1196. DOI: 10.1007/978-3-319-40943-6
16. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z.Ai, Y.Han, Y.Kuang, Y.Wang, M.Zhang // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10. Iss. 6. DOI: 10.1177/1687814018781494
17. Production of coarse-grained high-strength microgrits to be used in drilling tools / O.A.Zanevskii, S.A.Ivakhnenko, G.D.Ilnitskaya, A.P.Zakora, R.K.Bogdanov, A.A.Karakozov, M.C.Popova // Journal of Superhard Materials. 2015. Vol. 37. Iss. 2. P. 132-139. DOI: 10.3103/S1063457615020082
18. Su O. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method / O.Su, N.A.Akcin // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences . 2011. Vol 48. Iss. 3. P. 434-442. DOI: 10.1016/j.ijrmms. 2010.08.012

Авторы: **В.В.Нескоромных**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, sovair@bk.ru (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия), **М.С.Попова**, старший преподаватель, alleniram83@mail.ru (Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия).

Статья поступила в редакцию 20.03.2019.

Статья принята к публикации 20.09.2019.