

Технология геологической разведки

УДК:622.24.051

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОЛОТ PDC

В.И. Зайцев¹, А.В. Карпиков², В.В. Че³

^{1,2}Иркутский государственный технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

³ИФ ООО «РН-Бурение», 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 257.

Выбор наилучшего породоразрушающего инструмента для определенных условий является одной из проблем, с которой приходится сталкиваться нефтяным компаниям и буровым подрядчикам при планировании строительства скважины. Рациональный выбор способен обеспечить значительную экономию капитальных затрат при строительстве нефтегазовых скважин, поэтому оптимизация процессов бурения стимулирует внедрение новых типов и конструкций буровых долот.

В последние годы безопорные долота с поликристаллическими алмазно-твердосплавными резцами (PDC) стремительно завоевывают популярность, увеличивая проходку на долото, механические скорости бурения, сокращая время на спуско-подъемные операции и вытесняя тем самым долота шарошечного типа. Принцип действия новых долот заключается в срезании и скалывании слоя горной породы, как на токарном станке, в отличие от уже устоявшихся долот шарошечного типа, которые разрушают горную породу дробяще-скалывающим действием.

В ходе анализа процесса разрушения породы при бурении резцами долота типа PDC получены геометрические зависимости нормальной силы резания и ее составляющих от переднего угла резания и параметров площади, разбуриваемой резцом. При изучении стойкости резцов определен оптимальный дисперсионно твердеющий сплав в качестве матрицы долота и рациональный угол резания для этого сплава. Выявлены причины ухудшения процесса резания-скалывания при развороте под небольшим углом резцов в долоте. Даны рекомендации по применению модуля переднего угла в зависимости от расположения резца по отношению к оси долота. Получены эмпирические формулы зависимости отжимающей силы инструмента от осевой и тангенциальной составляющих сил при постоянном переднем угле резания. Представлены сравнительные графики работы шарошечных и PDC-долот в аналогичных горно-геологических условиях. При пересчете на затраты на 1 м проходки долота PDC показали более эффективную работу.

В целом PDC-долота показали механические скорости бурения на 5–7 м/ч выше, а проходку в 2,5–4 раза большую, чем шарошки при прочих равных условиях.

Ключевые слова: анализ; геометрия; нарост; испытание; экономическая эффективность.

APPLICATION EFFICIENCY OF PDC BITS

V.I. Zaitsev, A.V. Karpikov, V.V. Che

Irkutsk State Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk, 664074, Russia.

ООО “RN-Burenie”, 257 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Selection of the best rock breaking tool for certain conditions is one of the challenges oil companies and boring contractors face when planning a well construction. Rational choice is able to ensure considerable economy

¹Зайцев Виталий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, тел.: (3952) 405278, e-mail: zaitsev@istu.edu

Zaitsev Vitaly, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business, tel.: (3952) 405278, e-mail: zaitsev@istu.edu

²Карпиков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, тел.: (3952) 405659, e-mail: karpikov@istu.edu

Karpikov Alexander, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business, tel.: (3952) 405659, e-mail: karpikov@istu.edu

³Че Вячеслав Викторович, начальник смены ЦИТС, тел.: 89246392566, e-mail: che.slava18@gmail.ru
Che Viacheslav, Shiftman, tel.: 89246392566, e-mail: che.slava18@gmail.ru

of capital expenditure at the construction of oil and gas wells, therefore optimization of drilling processes stimulates the introduction of new types and designs of drill bits.

In recent years unsupported drill bits with polycrystalline diamond hard-alloy cutters (PDC) are rapidly becoming more popular, since they increase both the headway per bit and mechanical speeds of drilling, reduce the round-trip time and, therefore, force out roller cone bits. The operation principle of such bits is in cutting and shearing of a layer of rock as on the lathe, unlike the one of traditional roller cone bits, which destroy the rock by the chipping and crushing action. Analyzing the operation of the rock breaking mechanism when drilling by PDC bits, the geometrical dependences of normal force of cutting and its components from the front angle of cutting and the parameters of the area drilled by a cutter are obtained. The study of cutter durability allows to identify the optimum age-hardening alloy as a matrix for a bit and a rational cutting angle for this alloy. The reasons of cutting-shearing worsening under a turn at a small angle of cutters in a bit are identified. Recommendations on the use of the front angle module depending on cutter arrangement in relation to a bit axis are given. Empirical formulas of dependence of the driving out force of the tool from the axial and the tangential components of forces are received at constant front angle of cutting. The paper introduces comparative graphs of roller cone bits and PDC bits operation in similar mining and geological conditions, and indicates that in terms of cost per meter PDC bits demonstrate more effective operation.

In general, PDC bits demonstrate 5–7 m/h higher mechanical speeds of drilling, and 2,5–4 times deeper penetration than roller cones with other conditions being equal.

Keywords: analysis; geometry; incrustation; test; cost-effectiveness.

Долота, оснащенные поликристаллическими алмазными зубками (англ. polycrystalline diamond cutter), относят к классу PDC-долот (рис. 1). К основным достоинствам долот с алмазотвердосплавными пластинками (АТП) относятся отсутствие в их конструкции подвижных частей, высокая износостойкость, самозатачивающееся действие резцов и низкая требуемая осевая нагрузка на долото. Для создания ре-

жущего действия требуется осевая нагрузка на долото на порядок меньше, чем для шарошечных долот при тех же или больших скоростях бурения.

Высокая устойчивая механическая скорость бурения обусловлена острой режущей кромкой резцов, низкой скоростью их износа и эффектом самозатачивания резцов во время бурения. Самозатачивание резцов происходит в результате некоторого опережающего

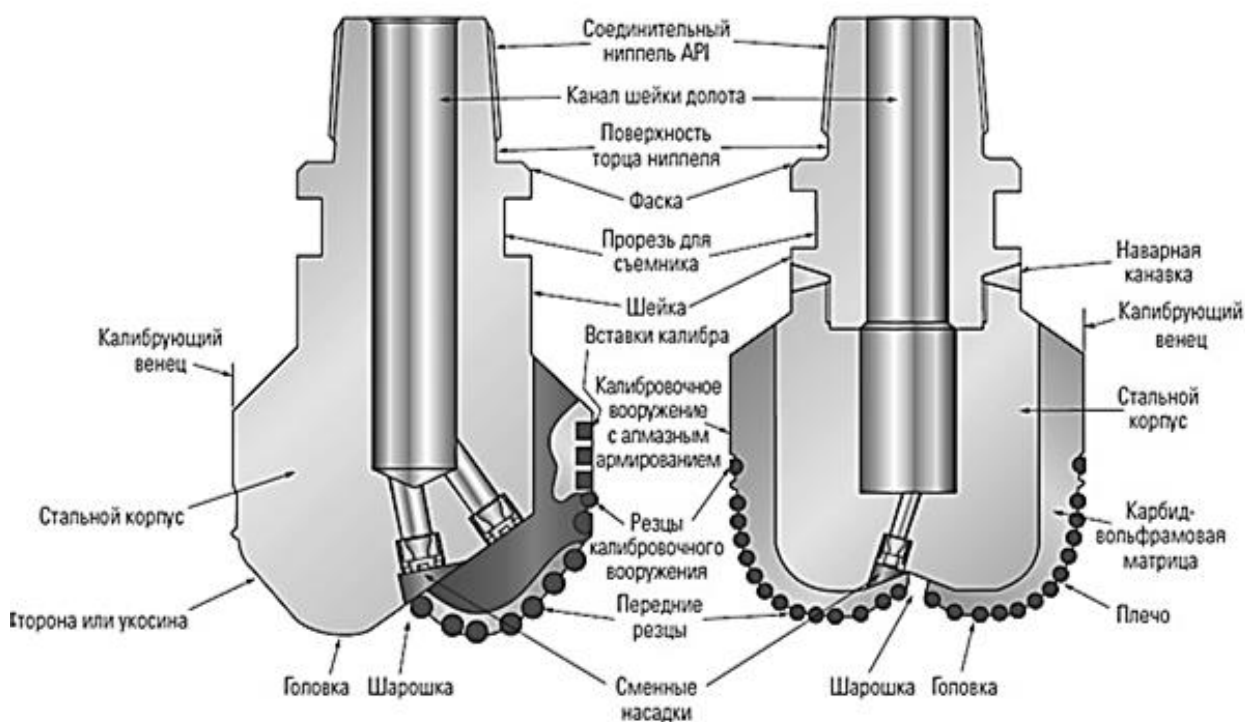


Рис. 1. Схема долота PDC

изнашивания твердосплавной основы по сравнению с износом алмазного слоя.

Высокая износостойкость вооружения обеспечивает большие проходки на долото при условии применения их по назначению.

Практика показывает, что при бурении скважин долота PDC обеспечивают проходку на инструмент 400–500 м при средней механической скорости бурения до 8–11 м/ч [2]. Такие результаты были получены при промысловых испытаниях на Федоровском месторождении в зоне деятельности Сургутнефтегаза, на месторождении Талакана в Восточной Сибири и др.

Основу элемента вооружения составляют алмазно-твердосплавные таблетки (диски), получившие название стратапакс. Алмазный слой на передней поверхности резца имеет толщину 0,6–0,8 мм.

Центральная часть долот PDC выполняется в виде вертикальных или спиральных лопастей, защищенных от истирания наплавкой из твердого сплава. Промывка осуществляется через твердосплавные насадки, максимально приближенные к забою. Количество лопастей варьируется от трех до двенадцати и зависит в основном от свойств буримых пород: чем тверже порода, тем больше лопастей и тем меньше сечение шламовых каналов.

Породоразрушающие вставки размещаются в трех основных зонах долота: основное вооружение, второй ряд вооружения, калибрующая часть. Основное вооружение может быть представлено как вертикальными, так и цилиндрическими зубками.

Большие размеры резцов позволяют обеспечить их выступ над корпусом долота до 15 мм. При этом создаются хорошие условия для удаления шлама из зоны разрушения (см. рис. 1).

Тем не менее до сих пор применение долот типа PDC для бурения среднетвердых и твердых, а также средне- и высокоабразивных пород проблематично. Анализ состояния долот PDC после

бурения в различных породах показывает неравномерность их износа, а иногда и разрушение резцов по профилю долота.

Выбор наилучшего породоразрушающего инструмента для определения условий является одной из проблем, с которой приходится сталкиваться нефтяным компаниям и буровым подрядчикам при планировании строительства скважин. Принцип работы долот PDC заключается в срезании слоя горной породы, как на токарном станке, в отличие от уже устоявшихся долот шарошечного типа, которые в свою очередь разрушают горную породу дробяще-скалывающим действием (рис. 2–3).

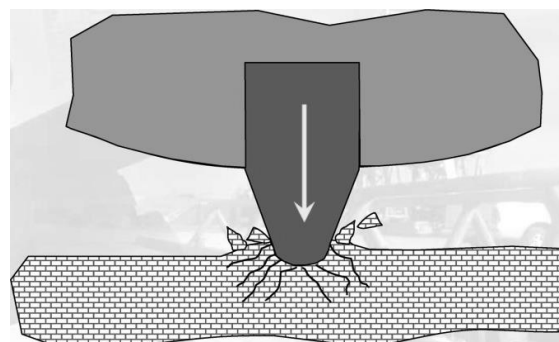


Рис. 2. Механика разрушения горной породы шарошечным долотом

Долота PDC со стальным корпусом лучше выдерживают ударные и крутильные нагрузки. Они используются для мягких пород и скважин большого диаметра. Матричные долота значительно дороже, но более долговечны и износостойки. Они более устойчивы к эрозионному воздействию и износу абразивными породами. Матричные долота предпочтительно использовать при бурении с раствором, содержащим значительную твердую фазу, бурении с высоким расходом и давлением промышленной жидкости, а также бурении скважин с большой длиной рейса в породах средней и высокой твердости.

Рассмотрим схему процесса резания-скалывания пород одним резцом типа PDC (рис. 4). Основную роль при

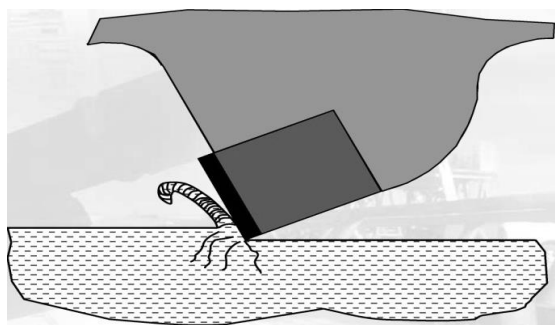


Рис. 3. Механика разрушения пород PDC-долотом

бурении породы играет нормальная сила F_n , ориентированная под прямым углом к передней поверхности резца. В процессе преодоления сопротивления породы происходят колебания величины и направления силы из-за постоянно меняющихся упругопластических и прочностных свойств горной породы. Немалую роль в этом играет наличие трещиноватости, пропластков, упругих колебаний инструмента и пр.

При этом происходят колебания толщины снимаемого слоя, которые еще больше усиливают крутильные колебания буровой колонны. Для того чтобы лучше понять механизм работы нормальной силы F_n , разложим ее на составляющие: тангенциальную силу F_t , совершающую срезание слоя породы, и осевую силу F_o , разрушающую породу путем ее сжатия и экструзии (выдавлив-

вания). Соотношение между ними следующее:

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \gamma} = \frac{F_o}{\sin \gamma} \text{ и } F_t = \frac{F_o}{\tan \gamma}, \quad (1)$$

где γ – отрицательный передний угол резца, при этом угол резания получается тупым, то есть больше 90° . Угол резания определяет наклон нагруженной рабочей поверхности резца по отношению к горизонтальной плоскости. При изучении стойкости (ресурса работы за рейс) резцов были получены следующие результаты: для матриц, изготовленных из дисперсионно твердеющего сплава ВК8, необходимо применять отрицательный передний угол $\gamma_n \geq 20^\circ$, для двухкарбидного сплава Т5К10 $\gamma_n \geq 25-30^\circ$, для трехкарбидного ТТ10К8Б и ТТ7К12 $\gamma_n \geq 15^\circ$.

При малых значениях переднего угла условия срезания слоев горной породы улучшались, а затрачиваемый момент кручения буровой колонны и мощность уменьшались, механическая скорость бурения увеличивалась. Наилучшие результаты, полученные нами при применении сплавов ТТ10К8Б и ТТ7К12, состоящих из карбидов тантала, титана и вольфрама, объясняются их повышенной прочностью, упругостью и ударной вязкостью.

Форма площади, разбуриваемая резцом, представляет собой площадь половины эллипса с полуосями a и b .

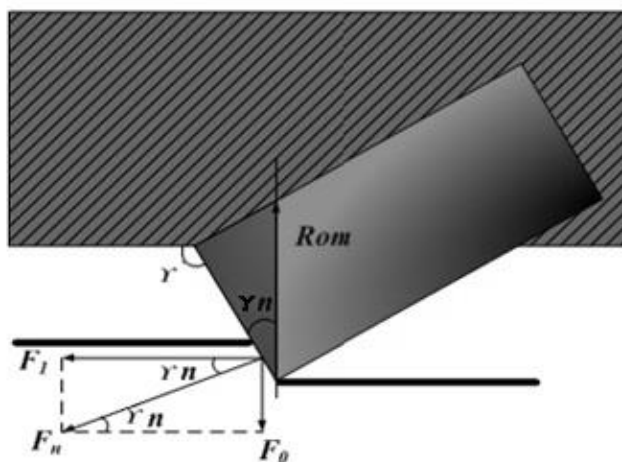
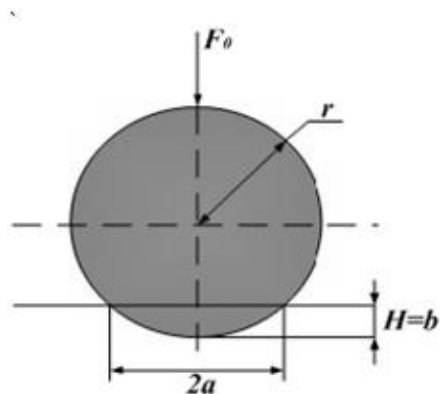


Рис. 4. Схема процесса резания-скалывания породы резцом PDC

Размер площади, формируемой передней гранью инструмента

$$S_{пл} = 0,5 \times \pi \times a \times b \times \cos \gamma_n = 0,5 \times \pi \times a \times h \times \cos \gamma_n, \quad (2)$$

где h – глубина срезаемого слоя породы; γ_n – угол между передней поверхностью резца и вертикальной отжимающей резец силой.

Если резец устанавливается в долоте с небольшим разворотом под углом $\varphi_{рез}$, то есть нормальная сила F_n не перпендикулярна передней поверхности резца, то такое положение резца только ухудшает процесс резания-скалывания, так как не вся калибрующая часть резца участвует в работе, а объем разбуриваемой массы породы при этом уменьшается. Отсюда площадь разбуривания становится меньше:

$$S_{пл} = 0,5 \times \pi \times 2a \times b \times \cos \gamma_n \times \cos \varphi_{рез}. \quad (3)$$

По нашему мнению, разбуриванию поверхностного слоя забоя способствует нарост в виде клина, который образуется на рабочей (передней) поверхности резца. Нарост возникает, растет, срывается и снова возникает благодаря высокому удельному давлению на породу и прилипанию к неровностям рабочей поверхности алмазно-твердосплавной таблетки. Форма и размер нароста зависят от скорости рыхления пород и ее свойств, а также положения и шероховатости рабочей поверхности резца.

Опыты показали, что для обеспечения условий прочности твердосплавной подложки рекомендуется резцам на периферии придавать больший отрицательный угол, чем резцам, расположенным ближе к оси. Линейная скорость резцов на периферии долота составляет 3–5 м/с, что приводит к большим динамическим (ударным) нагрузкам и выходу инструмента из строя.

Для того чтобы резцы долота изнашивались с одинаковой интенсивностью (при одинаковом их вылете), необходимо часть резцов с малым модулем переднего угла устанавливать ближе к оси долота. Что касается диаметра алмазно-твердосплавной таблет-

ки, то резцы, работающие на периферии, должны иметь больший диаметральный размер из-за более напряженной их работы. Причина этого – более высокая температура при резании-сдвиге из-за повышенной скорости вращения долота, масштабный фактор, влияющий на износ режущих и давящих кромок поликристаллов. Номинальные диаметры вставок у долот: 8, 10, 13, 16 и 19 мм. Зависимость усилия резания-скалывания породы от скорости обработки породы (рис. 5) близка к прямо пропорциональной [1]. Чем меньше модуль переднего угла резца, тем большая часть работы, выполняемой инструментом, относится к процессу резания: составляющая силы F_r возрастает (см. рис. 4), а меньшая – к скалыванию.

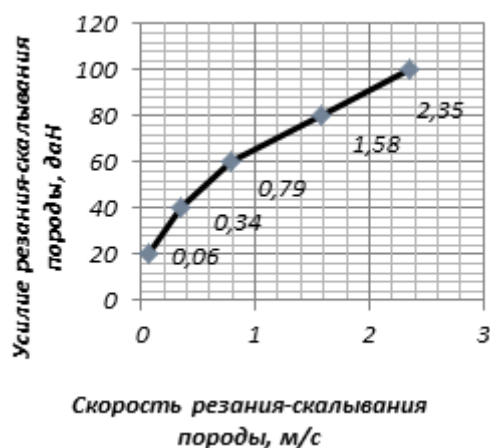


Рис. 5. Зависимость усилия резания-скалывания породы от скорости резания-скалывания

Из-за повышенной хрупкости и чувствительности к изменению условий резания-скалывания положительный угол γ_n на резцах с твердосплавной матрицей не применим, тем более в трещиноватых горных породах и при наличии в породе твердых включений. При этом возможны появления сколов и трещин в твердом сплаве и полный выход резца из строя. Особенно это важно для резцов, находящихся на периферии долота, где линейные скорости $V_{рез}$ значительны и зависят от величины радиуса r по отношению к оси долота:

$$V_{рез} = \omega \times r, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения долота.

При конструировании долот PDC необходимо учитывать реакцию R_{om} , отжимающую силу горной породы на резцы инструмента. Она направлена вертикально вверх и уменьшает величину осевого усилия F_o , а соответственно, и глубину снимаемого пласта породы. Величина R_{om} зависит в первую очередь от допускаемого напряжения буримой породы на сжатие и от линейной скорости резца по забою скважины. При их увеличении значение отжимающей силы также возрастает. При этом уменьшается глубина резания-скалывания породы. Для сохранения заданной глубины снятия горной породы следует несколько повысить осевую нагрузку на инструмент, например при помощи регулятора подачи долота на забой.

Глубину резания одним резцом, расположенным на конкретном радиусе долота, можно менять изменением количества резцов на радиусе и угловым их расположением в плане долота. Поскольку резец в процессе бурения движется по спирали с шагом, равным проходке за один оборот долота t_i , то глубина резания i -м резцом, расположенным на некотором радиусе долота, определяется как

$$t_i = t \times \alpha_i / 360, \quad (5)$$

где t – проходка за один оборот долота; α_i – угол в градусах на плане долота между i -м резцом и резцом, находящимся на одном радиусе с i -м и разрушающим забой перед ним.

Зависимость между отжимающей силой R_{om} и режущей составляющей F_t определяется как

$$R_{om} = F_t \times \sin \gamma_n \times \cos \gamma_n. \quad (6)$$

Данная формула получается проектированием тангенциальной силы на плоскость, в которой действует отжимающая сила. При γ_n , равной 15° ,

$$R_{om} \approx 0,25 \times F_t. \quad (7)$$

Согласно формулам (1) и (6), $R_{om} \approx$

$0,9 \times F_o$, то есть реакция отжатия долота будет зависеть в первую очередь от предела прочности породы на сжатие-скалывание и ее пластических свойств.

Предельные нагрузки на долото в значительной степени определяются конструкцией самого долота (количеством и размерами основных резцов) и могут достигать 0,5 т на один резец и составлять от 3 до 25 т для долота. С уменьшением размера (диаметра) резца уменьшается и максимальная нагрузка.

Частоты вращения определяются типом буримых пород и применяемым забойным двигателем, она достигает величин 600–650 об./мин. Как правило, в технических характеристиках каждого выпускаемого долота указывается рабочий диапазон нагрузок, максимальная нагрузка на долото и диапазон частот вращения.

Из вышеприведенного можно сделать вывод о том, что долото с пластинами стратапакса – это высокоэффективный инструмент. При роторном бурении и бурении винтовыми забойными двигателями долота этого типа по сравнению с шарошечными долотами в среднем увеличивают механическую скорость проходки в 2 раза по сравнению с шарошечными долотами, проходку на долото – в 2–4 раза при сопоставимом крутящем моменте.

Для проверки вывода были проведены сравнительные испытания долот PDC-БИТ 292,9B716УСМ, БИТ 295,3Z47KRS и трехшарошечных долот MXL-30H, GX-44G при бурении наклонно-направленных поисковых скважин в интервалах мягких и средних по твердости пород с труднобуримыми пропластками в северных районах Красноярского края и Иркутской области. Исследования продемонстрировали эффективную работу долот PDC (рис. 6–7). Как видно из графиков, долота PDC на выделенных интервалах бурения превосходят шарошечные долота как по скорости, так и по проходке.

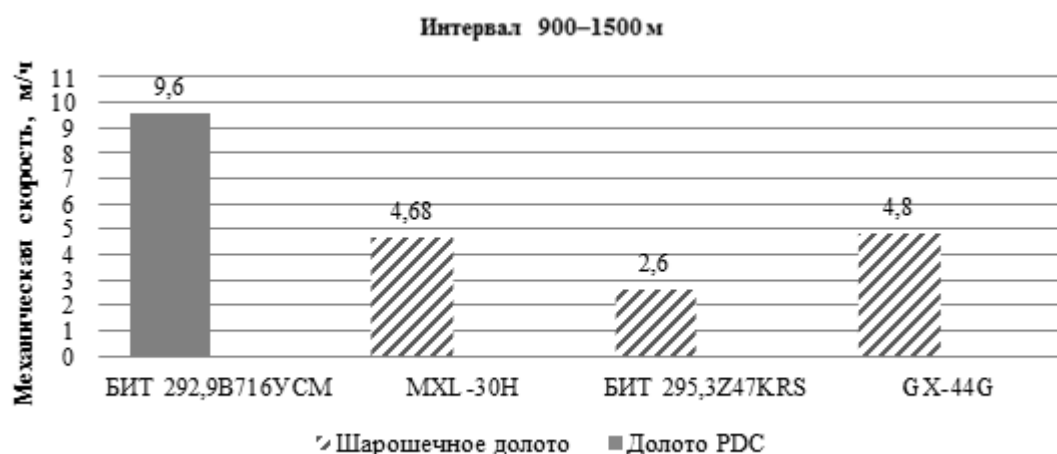


Рис. 6. Механическая скорость при бурении под техническую колонну для применяемых типов долот

В пересчете на затраты на 1 метр проходки (рис. 8) становится понятно, что долота PDC показали более эффективную работу по сравнению с традиционными шарошечными долотами в одинаковых горно-геологических условиях.

Долота производства ООО НПП «Буринтех» при бурении в компоновке с двигателем ДЗ-195 показали более высокую механическую скорость, чем шарошечные долота, что, возможно, вызвано более агрессивной режущей структурой долота с увеличенным количеством промывочных насадок. Показываемые долотами PDC механические

скорости бурения в интервалах 900–1500 м при равных условиях на 5–7 м/ч больше, чем те же скорости бурения шарошечными долотами. При этом буримая порода должна быть не выше VI категории твердости и низкой или средней абразивности. Исключение составляют породы с большими пластами солей. В этом случае у шарошек наблюдается незначительный износ и более высокая скорость проходки [2].

В целом долота PDC показали проходку на долото в 2,5–4 раза больше, чем шарошечные долота.



Рис. 7. Проходка на долото при бурении под техническую колонну для применяемых типов

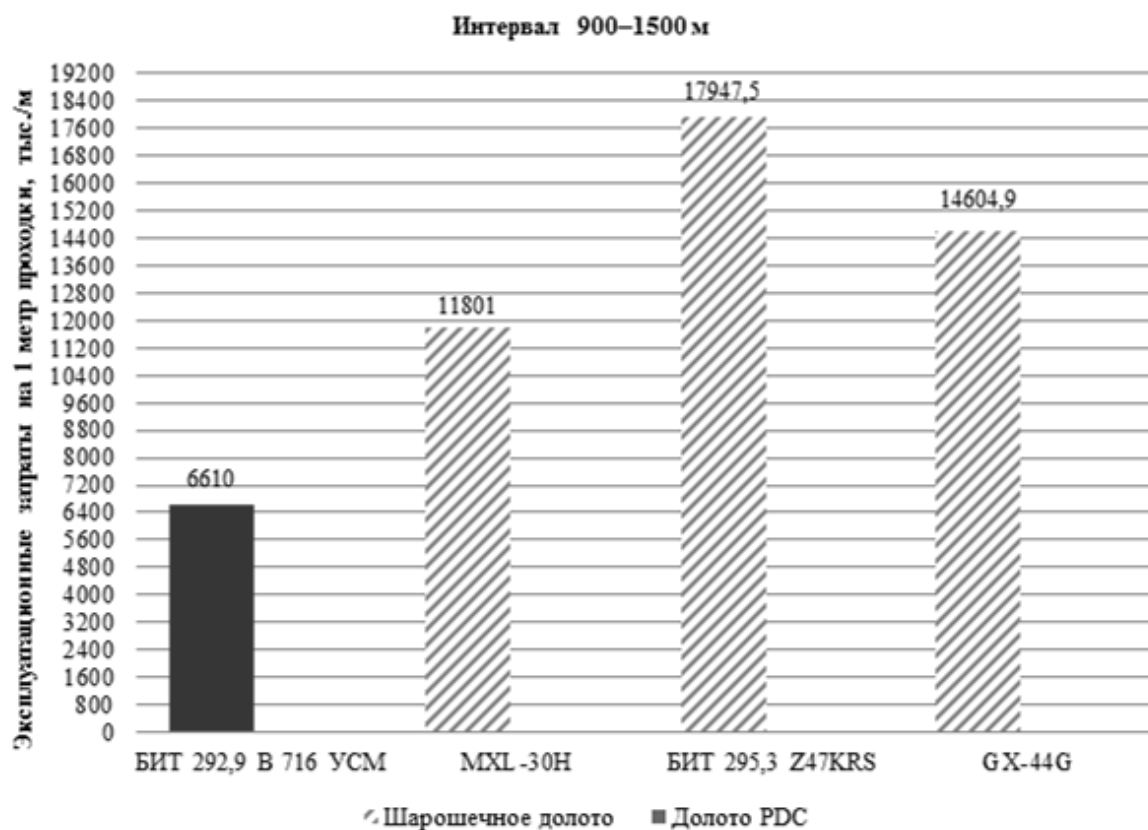


Рис. 8. Эксплуатационные затраты при бурении под техническую колонну

Наши выводы подтверждаются фоновыми материалами ИФ ООО «РН-Бурение», где в качестве критерия эффективности долот PDC рассматрива-

ются эксплуатационные затраты на 1 метр проходки, величина которых определяется комплексом переменных (рис. 9).



Рис. 9. Переменные, влияющие на эффективность долот PDC

Практическое применение долот PDC вызвало малый риск возникновения аварийных ситуаций из-за отсутствия движения деталей и, следовательно, возможного оставления шарошек в забое скважин.

Кроме того, после затупления долота PDC его можно восстановить и повторно использовать в соседних скважинах, в то время как шарошечные долота бракуются окончательно.

В случае бурения карбонатных коллекторов, часто окремненных каверно-трещиноватых доломитов применяемые в настоящее время конструкции долот PDC показывают невысокую износостойкость и часто выходят из строя.

В заключение можно сказать, что эффективность применения долот PDC достигается не только за счет принципиального подхода к разрушению горных пород. Процесс бурения является многофакторной системой, и каждая переменная вносит свой вклад в общую эффективность работы породоразрушающего инструмента.

На сегодняшний день одним из основных ресурсов долот PDC является применение специальных износостойких резцов, обладающих большей ударной, абразивной и термомеханической стойкостью. Резервом повышения эф-

фективности бурения являются также следующие переменные: материал и профиль долота, форма и число лопастей, размещение, величина и ориентация режущих элементов, а также свойства бурового раствора.

Подобный комплексный подход к процессу отработки долот PDC позволяет добиться существенного увеличения проходки на долото, средней механической скорости, а следовательно, коммерческой скорости бурения при одновременном снижении эксплуатационных затрат на 1 метр проходки. Все это означает, что применение долот PDC позволяет снизить стоимость строительства скважин.

Библиографический список

1. Нескормных В.В., Борисов К.И., Пушмин П.С. Аналитическое исследование пород резцами PDC // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. № 2. С. 78–85.
2. Че В.В., Заливин В.Г. Эффективность применения долот PDC на нефтяных месторождениях Западной и Восточной Сибири: сб. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. Вып. 12. 180 с.

Рецензент кандидат геолого-минералогических наук,
доцент Иркутского государственного технического университета В.В. Большаков