



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-96-102>

Анализ работы алмазных долот при строительстве скважин в сложных условиях

© В.И. Зайцев^a^aИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования – анализ применения алмазных долот – долот типа PDC (polycrystalline diamond cutters – поликристаллические алмазные резцы) – при их работе в районах со сложным геологическим разрезом, а также разработка рекомендаций для дальнейшего усовершенствования инструмента. Долота PDC созданы для бурения породы мягкой и средней твердости, в регионах со сложным геологическим разрезом применение данных долот было неэффективным. В ходе работы изучалась механика образования нароста на резцах долота и его воздействие на разрушение горной породы. Исследовалось влияние прокачивания объема бурового раствора и перепада давления в винтовом забойном двигателе на механическую скорость бурения долота PDC. Выдвинут ряд предложений по улучшению геометрии и ориентации резцов инструмента, изменению конструкции площадки калибрующего вооружения и лопастей долота. Предложен ряд мер по уменьшению забойных вибраций долота при его работе. В результате установлен механизм возникновения нароста на рабочей грани резца и его опережающее воздействие на образование трещин в объемном слое породы. Выявлено влияние максимальной подачи раствора на полное отсутствие сальникообразования и резкое увеличение механической скорости бурения. Большую эффективность показали винтовые забойные двигатели с высоким крутящим моментом, найдены оптимальные диапазоны падения давления у долот PDC в зависимости от скорости потока раствора. Предложены методы уменьшения вибраций и стабилизации долот PDC при помощи применения конструктивного исполнения и геометрического улучшения резцов и лопастей инструмента, введения гибридных резцов в качестве резцов вспомогательных. Использование усовершенствованных долот PDC поможет повысить эффективность их работы в сложных геолого-технических условиях Восточной Сибири и Якутии.

Ключевые слова: бурение скважин, резцы PDC, долото, испытание

Информация о статье: Дата поступления 08 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 11 февраля 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 марта 2020 г.

Для цитирования: Зайцев В.И. Анализ работы алмазных долот при строительстве скважин в сложных условиях. *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 1. С. 96–102. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-96-102>

Analysis of diamond drill bit operation in well drilling under complicated conditions

© Vitaly I. Zaitsev^a^aIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study has been to analyze the operation of diamond drill bits of a PDC type (polycrystalline diamond cutters) in the regions with a complex geological section, and to develop recommendations on optimizing the drill bits. The PDC drill bits are originally designed for soft to medium-hard rocks, thus being ineffective for complex geological sections. As part of the research, the mechanics of the build-up formation on the drill bit cutter and its impact on the rock destruction have been studied. The influence of the pumped drilling mud volume and the pressure differential in the downhole motor on the mechanical drilling speed of the PDC bit has been analyzed. Proposals on improving the geometry and orientation of the tool cutters and optimizing the design of the cutting structure calibration site and the bit blades have been given; measures on reducing the bottomhole vibrations of the bit during its operation have been suggested. As a result of the study, the mechanism of the build-up formation on the cutter's working edge and its advance influence on the fracturing in the rock volumetric stratum has been determined. It has been found that the maximum feed of the drilling mud results in the complete absence of the build-up formation and a sharp increase in the mechanical speed of drilling. The study has shown the high performance of high-torque downhole screw motors and defined the optimum range of the pressure differential for the PDC drill bits as a function



of the drilling mud flow rate. The authors have suggested the ways to reduce the vibration and stabilize the PDC drill bits by optimizing the structure and geometry of the tool's cutters and blades, and by using hybrid cutters as auxiliary ones. The conclusion is that the optimization of the PDC drill bits enhances their operation performance under complicated geological-engineering conditions in Eastern Siberia and Yakutia.

Keywords: well drilling, PDC cutters, drill bit, testing

Information about the article: Received December 08, 2019; accepted for publication February 11, 2020; available online March 30, 2020.

For citation: Zaitsev VI. Analysis of diamond drill bit operation in well drilling under complicated conditions. *Earth sciences and subsoil use*. 2020;43(1):96–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-1-96-102>

Введение

В последнее время при бурении нефтегазовых месторождений особое внимание уделяется повышению технико-экономических показателей за счет использования эффективного бурового инструмента [1, 2]. Буровые долота составляют только долю (1–5 %) от общей стоимости скважины, но являются основным компонентом экономики строительства скважины. Время, необходимое для бурения скважины, напрямую зависит от скорости бурения, которая обеспечивается долотом, и от продолжительности его работы до износа. На основе относительной стоимости проходки одного метра инвестирование в правильно выбранное долото значительно снизит время бурения и количество спуско-подъемных операций.

При бурении новыми алмазными долотами – долотами типа PDC (polycrystalline diamond cutters – поликристаллические алмазные резцы) – обеспечивается большая механическая скорость проходки, как и сама проходка на долото по сравнению с бурением алмазными и трехшарошечными долотами при меньших энергетических затратах. При применении долот PDC разрушение породы осуществляется путем резания. Из всех основных механизмов разрушения горной породы резание является наиболее эффективным методом, потому что прочность на растяжение пород обычно меньше прочности на сжатие.

На месторождениях Восточной Сибири и Якутии геологические разрезы сложнее, чем в Западной Сибири. В данных районах наблюдаются плотные доломиты и известняки, соль и мергель

различной крепости. В условиях карбонатных пород чередуются породы V–IX категорий твердости. Присутствуют труднобуримые пропластки. Выпускаемые же долота PDC в основном предназначены для пород не выше VI категории буримости и средней, а также высокой абразивности [3]. Преимуществами долот PDC перед шарошечными долотами являются отсутствие в их составе подвесных элементов (деталей), высокая износостойкость и при этом самозатачиваемость за счет опережающего изнашивания твердосплавной матрицы по сравнению с износом алмазного слоя. Долото PDC имеет высокую устойчивую механическую скорость бурения, что объясняется эффектом самозатачивания инструмента. Тем не менее в Восточной Сибири и Якутии в условиях карбонатных коллекторов и трещиноватых пород применяемые долота PDC показывают невысокую стойкость и прочность, выходят из строя. В связи с этим необходимо разрабатывать более рациональный инструмент и технологию его применения [4].

Материалы

и методы исследования

В настоящее время в Сибири и Якутии для бурения нефтегазовых наклонно-направленных и горизонтальных скважин сплошным забоем широко применяются долота PDC почти всех ведущих производителей мира. В данной работе проанализирована эксплуатация долота PDC на Талаканском, Верхнечонском месторождениях и Куюмбинской площади. Резцы PDC показали стойкое сопротивление абразивному износу и большую чувствительность к ударной нагрузке.



Рассматривались долота 220,7 FD 368-MH-A80-01; БИТ 292,9 В 716 УСМ; MDi 713NPX производства компании Smith. Режимы бурения: роторный способ при комбинированном бурении гидравлическим винтовым забойным двигателем с нагрузкой на долото 80–13 кН, частотой вращения 50–200 об./мин, расходе бурового раствора до 40 л/с и давлении 10–15 МПа.

При бурении сложного и «неудобного» геологического разреза механическая скорость проходки и проходка на долото падают. Незначительная проходка, ограниченная опережающим износом вооружения, делала нерациональным применение долот PDC. При бурении наблюдался как механический, так и термомеханический износ резцов. Бурение кремнистых участков, крепких доломитов, пород с вертикальной и субвертикальной трещиноватостью, твердых и переслаивающихся пород приводит к многочисленным сколам на резцах, отслаиванию и выкрашиванию алмазосодержащих пластин, слому и даже вырыванию режущих деталей.

Необходимо выработать новые технологические материалы и конструкции долот для бурения сложных геологических разрезов. Оптимизировать режущие механизмы на сопротивление ударным нагрузкам, увеличить их термостойкость и вибрационную стойкость, разработать более совершенные конструкции долот, в том числе гибридные.

Результаты исследования и их анализ

При бурении скважин следует учитывать такие параметры, как тип горной породы и планируемый режим вращения долота. Замечено, что при бурении мягких пород и пород средней прочности происходит их резание, а при бурении твердых пород – хрупкое разрушение путем скалывания. Причем способ разрушения породы зависит не только от ее прочности, но и от таких параметров скважины, как температура и давление в ней [1, 5].

При хрупком скалывании порода разрушается с очень небольшой или нулевой деформацией. При пластическом разрушении порода упруго деформируется до предела текучести, после которого происходит пластическая деформация до разрыва.

При бурении долотами PDC на резцы действуют вертикальная сила веса колонны и горизонтальная сила от ротора. Главными при этом являются приложенные касательные силы [6, 7]. Полученная равнодействующая сила, по нашему мнению, определяет плоскость упора резца. В результате при бурении элемент породы сдвигается под определенным углом относительно плоскости упора резца, который зависит от прочности породы.

Разбуриванию поверхностного слоя забоя помогает образующееся ядро сжатия на рабочей поверхности резца. Форма и размер ядра зависят от свойств горной породы и скорости воздействия на нее. На некоторых рабочих поверхностях резца долота после его поднятия на дневную поверхность можно увидеть неразрушенные наросты (ядра сжатия) в виде усеченного конуса с расширением к нижнему краю резца. Картина образования таких наростов на резцах долота схожа с образованием и мгновенным удалением таких же наростов при токарной обработке пластмасс и мягких металлов.

Нарост прилипает к неровностям передней грани резца со значительной силой в зависимости от положения инструмента и шероховатой рабочей грани резца [8]. Именно наросты создают опережающее воздействие на породу, а затем уже передняя поверхность инструмента. Нарост создает трещины в ближайшей к резцу области породы. Трещины увеличиваются благодаря сдавливанию резцом. Происходит объемное разрушение породы по линиям сдвига и ее отброс в стороны от проложенной борозды с захватом отбуренной породы потоком раствора и вынос ее на поверхность. В результате анализа подачи



раствора на месторождениях при бурении рекомендуется подавать максимальное количество бурового раствора, не ограничивая его объем. Так, на Талаканском месторождении при бурении на скоростях 50–150 об./мин долотом PDC механическая скорость бурения была увеличена на 40–55 % при повышении расхода раствора с 32 до 40–50 л/с. При этом поднятое на поверхность долото и резцы были чистыми, без следов сальникообразования.

Для увеличения проходки на долото и улучшения управляемости рекомендуется применять резцы уменьшенного диаметра, до 12–13 мм, с увеличенным количеством гидромониторных насадок.

В Западной Сибири при бурении наклонно-направленной эксплуатационной скважины применялось долото БИТ 215,9 ВТ 519 УСВ, 32-01 с резцами уменьшенного диаметра до 13 мм и увеличенным количеством гидромониторных насадок до восьми вместо обычных пяти. При этом расположение их в корпусе было подобрано таким образом, чтобы улучшить вынос шлама из призабойной зоны [9]. В результате была увеличена проходка на долото с сохранением показателя механической скорости и улучшенной управляемостью. Данная модель показала высокую стойкость и повышенную способность набирать необходимые параметры кривизны.

При работе с забойным двигателем для эффективности работы PDC рекомендуется, чтобы скорости потока бурового раствора были в верхнем диапазоне скоростей двигателя, так как работа со скоростями из нижнего диапазона приводит к ограничению нагрузки на долото и, соответственно, к уменьшению вращающего момента, что влияет на скорость проходки.

Как показывает опыт бурения с применением забойных двигателей, для использования долот PDC более эффективны забойные двигатели с высоким моментом вращения. Это особенно видно,

когда скорости потока раствора и его давление на дневной поверхности ограничены.

Для забойных двигателей с высоким моментом и низкой скоростью вращения рекомендуется иметь падение давления в диапазоне 4,1–5,5 МПа, для двигателей с более высокой скоростью вращения падение давления должно быть в диапазоне 7–8,3 МПа.

Для бурения с большим отклонением от вертикали общее падение давления при применении забойных двигателей рекомендуется в диапазоне 8,3–10 МПа.

Практический опыт показывает, что долото PDC работает лучше, если оно снабжено насадками для достижения высоких скоростей раствора. Высокое давление при этом не требуется. Скорости потока раствора для долот PDC с открытыми насадками должны превышать 35 л/с для ствола насадки в $\frac{1}{2}$ дм и 45 л/с в $\frac{1}{4}$ дм, конечно, с коррекцией в зависимости от литологии и типа бурового раствора.

Кроме того, обильная подача раствора не дает повышаться температуре резцов выше 700 °С [10]. При достижении данной температуры резцы быстро изнашиваются из-за неравномерности теплового расширения между связкой (кобальтом) и алмазом. Поэтому при бурении твердых пород лучше использовать термостойкие резцы PDC. Их истирающее действие обеспечивает разрушение цементирующих веществ, связывающих отдельные зерна породы. Резцы с TSP (thermally stable polycrystalline – поликристаллические термостойкие) устойчивы до температуры 2100 °С [11, 12].

Для эффективной ориентации резцов относительно корпуса долота рекомендуется такое их расположение, при котором нагрузка на них во время эксплуатации создавалась бы только под действием сил сжатия.

Что касается подбора материала матрицы резца, его геометрических характеристик и скорости вращения



долота, то эти вопросы рассматривались автором данной статьи ранее^{1,2}.

Также важную роль для всего процесса бурения играет стабильность долота PDC. На забое долота совершают хаотичные движения, которые включают боковые, осевые и крутильные колебания, отмечающиеся отдельно и в комплексе. Забойные вибрации снижают срок службы отдельных резцов, они мешают контролю траектории скважины, создают ствол неправильной формы и невыдержанного диаметра.

На Талаканском месторождении долота PDC производства «Буринтех» и Steeringwhell применялись с активным калибрующим резцом, который обеспечивает агрессивную способность бокового резания из-за малых передних углов. При этом улучшилась управляемость в отношении изменения траектории движения, снизилось трение калибрующего вооружения о стенки скважины, уменьшились затяжки и реактивный крутящий момент.

Предлагается влияние крутящего момента снизить уменьшением переднего угла резцов до $-5...-10^\circ$, ограничить размеры резцов до диаметров 13–14 мм, а в качестве вспомогательных резцов применять гибридные резцы.

Для уменьшения прихвата-скольжения рекомендуем применять гибридные долота PDC с импрегнированными резцами на калибрующей части инструмента. Такие резцы будут ограничивать проникновение в породу стенок ствола и сглаживать резкие изменения крутящего момента. В настоящее время применяемые долота PDC имеют в качестве вооружения калибрующей части такие же резцы, как и резцы на забое. При колебании они выхватывают элементы породы стенки ствола скважины и этим создают ствол овальной формы и ненормативного диаметра.

Балансировать долото PDC можно и с помощью конструктивных особенностей, например, создавая спиральные площадки калибрующего вооружения. Они будут снижать способность долота к боковому проникновению или долблению стенок скважины за счет увеличения кругового контакта. Создавая спиральные лопасти, мы будем приближать точку вращения долота к центру.

Таким образом, для долот PDC рекомендуется применение низкофрикционного калибрующего вооружения на одной стороне долота и размещение резцов таким образом, чтобы все неуравновешенные силы были в направлении калибровочного вооружения.

Рекомендуется также для бурения наклонно-направленных скважин применять долота общей короткой длины.

Заключение

На сегодняшний день основными ресурсами использования долот PDC являются применение износостойких резцов, улучшение конструкции лопастей и корпуса долота, рациональные величина и ориентация режущих элементов, а также их размещение, балансировка инструмента и оптимизация бурового раствора для резания-скалывания разных пород.

В данном исследовании описан процесс разрушения горных пород с образованием нароста на рабочей поверхности резца и его опережающее воздействие на породу. Приведены опытные данные по подаче количества бурового раствора для улучшения выноса шлама и препятствия сальникообразованию. Рассмотрены вопросы стабильности работы долота PDC, так как возникающие боковые, осевые и крутильные колебания приводят к вибрациям, которые, в свою очередь, снижают срок службы долота.

¹ Зайцев В.И., Карпиков А.В., Че В.В. Исследование применения долот PDC // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 5. С. 58–66.

² Зайцев В.И., Карпиков А.В., Осипов В.Г. Применение долот PDC на месторождениях Восточной и Западной Сибири // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4. С. 62–69.



Согласно опытным данным, приведены рекомендации по улучшению конструкции долот для стадии их проектирования и доработки.

Оптимизация конструкции долот типа PDC, применение нового типа

долот – так называемых гибридных долот PDC – позволит частично решить проблему качественного строительства скважины, в том числе за счет их балансировки и снижения таким образом вибраций инструмента.

Библиографический список

1. Сверкунов С.А., Карпиков А.В. Исследование штыревых и алмазных долот на месторождениях нефтегазоносных площадей севера Красноярского края // Геонаука-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Вып. 12. Иркутск, 2012. С. 148–152.
2. Че В.В., Заливин В.Г. Эффективность применения долот PDC на нефтяных месторождениях Западной и Восточной Сибири // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2012. С. 137–144.
3. Рабиа Х. Технология бурения нефтяных скважин / пер. с англ. М.: Недра, 1989. 361 с.
4. Шарипов А.Н., Храмов Д.Г., Ковалевский Е.А. Оптимизация конструкций долот PDC, направленная на снижение времени бурения секции под эксплуатационную колонну // Бурение и нефть. 2013. № 6. С. 42–44.
5. Пушмин П.С. Возможные направления интенсификации процесса разрушения твердых горных пород // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2004. № 4 (20). С. 182.
6. Бурмистров И.А., Сокольников Д.С., Заливин В.Г. Результаты применения долот PDC на

- месторождениях Восточной Сибири // Геонаука-2012: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Вып. 12. Иркутск, 2012. С. 163–167.
7. Чворо Е.О., Поминова Е.О. Результаты отработки долот типа PDC на месторождениях Томской области // Проблемы геологии и освоения недр: сб. тр. науч. симпозиума. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. С. 450.
8. Гусман А.М., Лышенко А.А. Пути создания эффективных долот PDC для бурения крепких пород // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2009. № 1. С. 24–27.
9. Пикетт С. Техника отклонения инструмента при наклонно-направленном бурении: в прошлом, настоящем и будущем // Нефтяная инженерия. 1987. С. 41–43.
10. Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Асеева А.Е. Исследование подачи и модуля скорости при вращательном бурении горных пород // Интервал. 2006. № 2. С. 25–27.
11. Брауз М. Применение гидравлики: ключ к эффективному бурению // Нефть мира. 1982. Октябрь. С. 13–16.
12. Робинсон Л. Улучшение гидравлических долот для увеличения скорости проникновения в породу // Нефть мира. 1982. Июль. С. 24–26.

References

1. Sverkunov SA, Karpikov AV. Study of carbide and diamond drill bits in the oil-and-gas fields of the north of the Krasnoyarsk Territory. In: *Geonauka-2012: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = Geonauka-2012: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference. Iss. 12. Irkutsk; 2012. p.148–152. (In Russ.)
2. Che VV, Zalivin VG. Efficiency of PDC bits in the oil fields of Western and Eastern Siberia. In: *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri* = Development of the mineral resources base in Eastern Siberia. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2012. p.137–144. (In Russ.)
3. Rabia H. Oilwell drilling engineering: principles and practice. Graham & Trotman; 1989. 400 p. (Russ. ed.: *Tekhnologiya bureniya neftyanykh skvazhin*. Moscow: Nedra; 1989. 361 p.).
4. Sharipov AN, Khramov DG, Kovalevskiy EA. PDC bits' constructions optimization to decrease speed of section drilling for exploitation string. *Burenie i neft'*. 2013;6:42–44. (In Russ.)

5. Pushmin PS. Potential directions in the intensification of hard rock destruction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2004;4:182. (In Russ.)
6. Burmistrov IA, Sokol'nikov DS, Zalivin VG. Results of the PDC drill bit usage at the Eastern Siberian deposits. In: *Geonauka-2012: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* = Geonauka-2012: Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference. Iss. 12. Irkutsk; 2012. p.163–167. (In Russ.)
7. Chvoro EO, Pominova EO. Results of the PDC drill bit usage at the deposits of Tomsk region. In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr* = Issues of geology and resource extraction. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2016. p.450. (In Russ.)
8. Gusman AM, Lyshenko AA. Development of high performance PDC bits for hard formations. *Vestnik Assotsiatsii burovyykh podryadchikov* = Bulletin of the Association of Drilling Contractors. 2009;1:24–27. (In Russ.)



9. Pikett S. Tool deflection techniques in directional drilling: past, present and future. *Neftyanaya inzheneriya*. 1987:41–43. (In Russ.)

10. Tret'yak AYa, Litkevich YuF, Aseeva AE. Study of the feed and module of velocity in rotation rock drilling. *Interval*. 2006;2:25–27. (In Russ.)

11. Brauz M. Practical hydraulics: key to efficient drilling. *Neft' mira*. 1982:13–16. (In Russ.)

12. Robinson L. Optimization of hydraulic drill bits as a way to increase the rock penetration rate. *Neft' mira*. 1982:24–26. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Зайцев В.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Vitaly I. Zaitsev is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The author has read and approved the final version of this manuscript.

Сведения об авторе / Information about the author



Зайцев Виталий Иванович,

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры нефтегазового дела,

Институт недропользования,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

✉ e-mail: zaicshev@istu.edu

Vitaly I. Zaitsev,

Cand. Sci. (Eng.), Docent,

Associate Professor, Oil and Gaz Department,

Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

✉ e-mail: zaicshev@istu.edu