ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗБУРИВАНИЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ОБСАДНОЙ КОЛОННЫ

METHODS OF IMPROOVING CASING BITS DRILLING OUT EFFICIENCY

В статье предложено решение задачи по повышению эффективности разбуривания породоразрушающего инструмента обсадной колонны. Особое внимание уделено вопросу адаптации оборудования обсадной колонны под возможность его разбуривания долотами с поликристаллическими алмазными резцами. Существующую проблему предложено решить за счет совершенствования конструкции породоразрушающего инструмента обсадной колонны. Кроме того описан ряд решений, предложенных зарубежными компаниями по вопросу разбуривания технологической оснастки и породоразрушающего инструмента обсадной колонны. Рассмотрено применение долот для разбуривания с резцами особой формы, применение долот с дополнительной твердосплавной структурой вооружения и использование технологии защитных твердосплавных чашек. Описана методика определения наилучших условий функционирования процесса разбуривания. Показан способ определения необходимых режимов разбуривания с помощью анализа и решения уравнений регрессии, полученных путем обработки данных полнофакторного эксперимента. Авторы рассматривают зависимость механической скорости процесса от таких факторов, как частота вращения, осевая нагрузка и расход промывочной жидкости. Выбраны основной уровень, интервал варьирования и экспериментальные точки для факторов. В качестве объекта исследования использованы образцы, изготовленные из алюминия Д16Т, бронзы БрАЖ 9-4 и полиамида ПА 6. Составлено уравнение регрессии с определением значимости его коэффициентов. Изучен характер протекания процесса и дана оценка износа инструмента, совершающего разбуривание. Проведен анализ поверхностей отклика для оценки влияния факторов на параметр оптимизации. Исследованы характер образования стружки, её свойства и влияние режимов на её образование. Найдены оптимальные режимы, позволяющие обеспечить максимальную скорость разбуривания и общую эффективность процесса.

The present article suggests the drilling out casing bit efficiency increase solution. Special attention should be given to the adaptation of casing accessories for the possibility of its drilling out with polycrystalline diamond compact cutters bit. The existing problem is proposed to be solved by means of improving the design of the casing bit. Therewith, a number of solutions proposed by foreign companies have been described regarding drilling out casing mounting and casing bits. The use of bits with special shaped cutters, the use of bits with additional carbide composition of cutting structure and the use of shearing cap technology were considered. The technique for determining the best operating conditions for the drilling process is described. The method is shown for determining the necessary drilling out modes by analyzing and solving the regression equations obtained by processing the data of a full-factor experiment. The authors consider the dependence of the mechanical speed of the process on factors such as the rotational speed, the axial load and the flow rate. The main variability level, the variability interval and the experimental points for the factors are chosen. As the object of research were used samples made from aluminum (Д16Т), bronze (БрАЖ 9-4) and polyamide (ПА 6). A regression equation was derived with the determination of its coefficients significance. The history was studied and dull evaluation of drilling out tool was given. The analysis of the response surfaces is performed to evaluate the influence of factors on the optimization parameter. The nature of the formation of cuttings, its properties and the influence of modes on its creation are researched. Optimal modes have been found that make it possible to provide the maximum drilling speed and overall efficiency of the process.

Технология бурения на обсадной колонне неизвлекаемой системой представляет собой современный способ строительства скважин, не подразумевающий подъем компоновки после достижения проектного забоя. В этой связи породоразрушающий инструмент, используемый системой, так же как и технологическая оснастка, при бурении следующей секции должны быть разбурены [1, 2]. В стремлении повысить эффективность работы системы операцию разбуривания стараются осуществлять стандартными долотами

с поликристаллическими алмазными резцами PDC (polycrystalline diamond compact), что позволяет в дальнейшем не прибегать к дополнительным спуско-подъемным операциям для смены компоновки. Однако процесс разбуривания в этом случае сопряжен с риском повреждения алмазных резцов долота (рисунок 1). Ухудшение состояния вооружения негативно влияет на общую эффективность бурения, выражающуюся в снижении механической скорости, уменьшении проходки на долото и сложностях при подъеме инструмента [3].

Ковалевский Е. А., Ямалиев В. У.
ООО НПП «БУРИНТЕХ»,
г. Уфа, Российская Федерация
Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

E. A. Kovalevskii, V. U. Yamaliev
«BURINTEKH» LLC, Ufa,
Russian Federation
Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Ключевые слова:
бурение на обсадной колонне,
породоразрушающий инструмент,
разбуривание, режимы
разбуривания, планирование
эксперимента, оптимизация
конструкции, уравнение регрессии.

Key words:
casing drilling, rock destruction tool,
drilling out, drilling out modes,
experimental design, design
optimization, regression equation.

Рисунок 1.

Типичный износ вооружения после разбуривания оборудования обсадной колонны, не адаптированного под PDC долото

Риск повреждения резцов при разбуривании связан с тем, что оборудование обсадных колонн зачастую содержит металлические элементы, разрушающие PDC вооружение в процессе работы. Алмазные резцы склонны выкрашиваться под действием высоких температур в зоне контакта с металлосодержащими материалами, т. к. углерод, содержащийся в алмазном слое, вступает в химическую реакцию с железом. Разрушается структура резца, и он теряет свои прочностные свойства [4, 5]. Также алмазный слой резцов PDC, имея высокую стойкость к абразивному изнашиванию, может легко скалываться от воздействия ударных нагрузок при взаимодействии с железосодержащими материалами.

Кроме того, неверно подобранные режимы разбуривания приводят к вибрациям, неравномерному резанию, срывам инструмента, что повышает риск повреждения алмазных резцов и иного оборудования, входящего в компоновку буровой колонны [6].

Поэтому в целях повышения эффективности ведения буровых работ целесообразно особое внимание уделить вопросу адаптации оборудования обсадной колонны под возможность его разбуривания долотами с поликристаллическими алмазными резцами [7]. Существующую проблему износа PDC вооружения можно решить за счет совершенствования конструкции породоразрушающего инструмента обсадной колонны.

Одним из решений вопроса разбуривания является применение на долотах PDC резцов особой формы. Разработанные конические и куполообразные резцы позволяют беспрепятственно разбуривать оборудование обсадных колонн, однако работать в горной породе подобные долота могут с заметными ограничениями по скорости и проходке ввиду отсутствия острой режущей кромки [8].

Другим решением является применение конструкции, включающей дополнительную структуру вооружения, как правило, твердосплавную,

для защиты алмазных резцов (рисунок 2). Твердосплавные элементы устанавливаются непосредственно за основным рядом вооружения либо между резцами долота PDC и позволяют осуществлять разрушение оборудования обсадной колонны, сохраняя целостность алмазных резцов. По мере осуществления операции при контакте с горной породой твердый сплав быстро изнашивается, и в работу вступают алмазные резцы, продолжающие дальнейшее бурение. Однако в ходе опытных испытаний было выявлено, что подобные модификации могут заметно снижать эффективность бурения горной породы из-за неполного разрушения твердосплавных вставок [8].

Рисунок 2.

Примеры защитных твердосплавных вставок

Известно, что для резания железосодержащих материалов хорошо подходит твердосплавное вооружение, изготовленное из кубического нитрида бора (КНБ). Его важным свойством и преимуществом является высокая твердость и температурная устойчивость — заметное окисление поверхности зерен нитрида бора начинается с 1000–1200 °С, в отличие от 600–700 °С у алмаза. Подобные температуры при работе являются мгновенными и возникают только при очень жестких режимах.

Поэтому зерна кубического нитрида бора очень мало изнашиваются от термических нагрузок.

Другим важным свойством и преимуществом КНБ является его высокая химическая стойкость. Он не реагирует с кислотами и щелочами, инертен ко многим химическим элементам, входящим в состав сталей и сплавов. Особенно следует отметить инертность нитрида бора к железу, тогда как алмаз хорошо растворяется в железе, что является причиной интенсивного износа алмазного вооружения долот при контакте с железосодержащими материалами [9].

Однако, несмотря на все преимущества, кубический нитрид бора, как и твердый сплав на основе карбида вольфрама, не эффективен для резания горной породы после разбуривания оснастки обсадных колонн, так как быстро подвергается износу.

Существует другой способ, позволяющий решать проблему разбуривания и осуществлять дальнейшее бурение — это технология режущих защитных чашек, разработанная компанией Шлюмберге (рисунок 3). Защитные чашки устанавливаются на основное вооружение стандартного долота PDC и непосредственно взаимодействуют с элементами оборудования обсадной колонны в процессе разбуривания. Могут устанавливаться на любое долото и эффективно и быстро осуществлять фрезерование, оставляя PDC вооружение в нетронутом состоянии [10].

Рисунок 3.

Защитные режущие чашки на PDC вооружении

Для изготовления режущих чашек используется сплав карбида вольфрама с высоким содержанием кобальта 14–18 %, что значительно уменьшает их абразивную стойкость. Благодаря этому при контакте с горной породой они стремительно получают износ и оголяют основное вооружение. Устанавливаются чашки на резцы методом пайки с использованием припоев, у которых температура плавления ниже, чем у припоев, применяемых для пайки резцов на корпус долота.

Недостатком данной технологии является то, что применение подобных долот ведет к вибрациям, неравномерному резанию и срывам из-за высокой агрессивности получаемого вооружения. Кроме того возможно снижение эффективности работ при дальнейшем бурении ввиду неполного

разрушения защитных чашек, вступающих в контакт с горной породой. Возможны снижения механической скорости бурения вплоть до аварийных спуско-подъемных операций.

Таким образом, с целью повышения эффективности осуществления процесса разбуривания предложен ряд решений, позволяющих облегчить процесс разбуривания технологической оснастки и породоразрушающего инструмента обсадной колонны. Большое внимание при этом уделяется вопросам адаптации под возможность разбуривания именно долотами с поликристаллическими алмазными резцами.

Однако в процессе аналитических исследований отмечено, что важным резервом повышения эффективности процесса разбуривания является применение рациональных материалов с улучшенными свойствами для изготовления внутренних разбуриваемых элементов. Одним из других направлений оптимизации может служить выбор оптимальных режимов разбуривания этих узлов.

Для решения поставленной задачи проведены исследования процесса разбуривания различных материалов для изготовления внутренних элементов долот обсадной колонны.

С целью поиска наилучших условий функционирования процесса разбуривания, проведено планирование эксперимента. Зависимость числа опытов от числа уровней факторов имеет вид [11, 12]

$$N = 3^k = 3^3 = 27,$$

где k — число факторов.

Основными параметрами процесса разбуривания, как и бурения, являются осевая нагрузка на долото, частота вращения долота на забое, а также количество промывочной жидкости. От их рационального сочетания зависит эффективность работы долота, поэтому исследование этих параметров и нахождение их оптимальных сочетаний являются важной задачей [13, 14, 15].

В этой связи рассмотрена зависимость механической скорости разбуривания от таких факторов, как частота вращения, осевая нагрузка и расход жидкости

$$V = f(x_1, x_2, x_3),$$

где x_1 — частота вращения долота, об/мин;

x_2 — осевая нагрузка, т;

x_3 — расход промывочной жидкости, л/с.

Выбраны основной уровень, интервал варьирования и экспериментальные точки (таблица 1).

Таблица 1.

Интервалы варьирования независимых переменных

Значения	x_1	x_2	x_3
Основной уровень	130	3	15
Интервал варьирования	45	2	10
Нижний уровень $x_i = -1$	85	1	5
Верхний уровень $x_i = +1$	175	5	25

Частота оборотов при разбурировании специальных технических средств в скважинных условиях, складывающаяся из оборотов ротора и забойного двигателя при литраже до 25–30 л/с, не превышает 175 об/мин. Увеличение оборотов не рекомендуется изготовителями породоразрушающего инструмента. Это зачастую приводит к преждевременному износу вооружения долота.

Увеличение осевой нагрузки свыше 5 т аналогично приводит к повышению аварийности ввиду износа элементов вооружения долота, осуществляющего разбурирование. При нагрузке ниже 1 т значительно снижается эффективность процесса разбурирования.

Расход промывочной жидкости является параметром, влияющим на работу гидравлического забойного двигателя. Технология работы забойным двигателем с углом перекося не позволяет разбуривать специальные технические средства обсадной колонны при расходе выше 25 л/с ввиду повышения частоты оборотов компоновки, негативно влияющего на ресурс инструмента.

Согласно проведенному обзору, испытания проводили на образцах, изготовленных из алюминия Д16Т и бронзы БрАЖ 9-4, как наиболее часто применяемых. В качестве третьего был взят полимерный материал полиамид ПА 6. Для поиска оптимальных значений отклика уравнения регрессии использовали программный комплекс Statistica 10.

Уравнение регрессии процесса разбурирования алюминия Д16Т представляли в виде алгебраического полинома второй степени. После определения значимости коэффициентов с помощью диаграммы «Паретто», уравнение регрессии процесса разбурирования алюминия приняло вид

$$y = -0,619 + 0,012x_1 + 0,066x_2 + 0,023x_3 - 0,00005x_1^2.$$

Обобщенный коэффициент детерминации уравнения $R^2_{\text{extend}} = 0,94$, что говорит о незначительной доле дисперсии зависимой переменной.

Полученное соотношение показывает взаимосвязь скорости разбурирования алюминия Д16Т с такими факторами, как частота вращения, осевая нагрузка и расход промывочной жидкости (рисунок 4).

В данном случае на параметр оптимизации перечисленные факторы влияют в разной степени. К примеру, изменение осевой нагрузки влияет прямо пропорционально. С её увеличением скорость разбурирования образца возрастает. Данное явление можно объяснить тем, что повышение осевого усилия вызывает большее заглубление резца в образец. Проходка за оборот увеличивается, срезаются большее количество материала, и поэтому мы получаем прирост механической скорости. Аналогично ведет себя параметр оптимизации при увеличении расхода жидкости, но в гораздо меньшей степени. В данном случае увеличение фактора не приводит к изменению сил, действующих на резец, что не вызывает изменения глубины резания, не оказывая влияния на скорость процесса. Влияние частоты вращения представляет собой нелинейную зависимость. Максимальное влияние фактор оказывает, принимая значения близкие к значениям основного уровня.

В ходе испытаний отмечено, что при приближении параметра оптимизации к оптимальным значениям характер резания алюминия становится плавным, прекращаются вибрации, и процесс резания протекает в наилучших условиях. Случаются периодические подвисания долота, предположительно, из-за высокой вязкости разбуриваемого материала.

По итогам испытаний выявлено, что наибольшее влияние на скорость разбурирования алюминия

Расход жидкости - 25 л/с

Рисунок 4.

Графическое представление поверхности отклика в зависимости от частоты оборотов и осевой нагрузки при расходе 25 л/с

Д16Т оказывает осевая нагрузка. Объяснение данного явления, по всей видимости, стоит искать в низкой по сравнению с горной породой прочности, что позволяет резцу легко заглубляться. Наименьшее влияние оказывает расход промывочной жидкости и парное взаимодействие, что особенно интересно, парное взаимодействие всех факторов друг с другом. Максимальное значение скорости разбуривания алюминия Д16Т достигнуто при частоте оборотов 116,5 об/мин, осевой нагрузке 2,8 т и расходе 24,3 л/с и равно 0,82 м/ч.

Далее находим уравнение регрессии процесса разбуривания образцов из бронзы БрАЖ 9-4

$$y = -0,182 + 0,004x_1 + 0,185x_2 + 0,019x_3^2.$$

Обобщенный коэффициент детерминации уравнения $R^2_{\text{extend}} = 0,84$.

В ходе опытов выявлено, что существует незначительное влияние частоты оборотов и нагрузки на вибрации инструмента. Увеличение нагрузки на долото уменьшает вибрации инструмента в процессе проведения исследований. При неуставившихся режимах наблюдаются скачки долота и хаотичное движение. При достижении оптимальных режимов не наблюдается никакого подвисания инструмента, резание осуществляется плавно.

Установлено, что бронзовая стружка режется сегментами и представляет собой мелкие частички металла. Её можно охарактеризовать как стружку скалывания, которая при определенных условиях может стать стружкой надлома.

Влияние на параметр оптимизации в случае с бронзой оказывает в большей степени осевое усилие. Отмечено, что сочетание высокой нагрузки и низкой частоты вращения позволяет добиться максимального значения скорости разбуривания. Объяснением этого явления по нашему мнению служат механические свойства бронзы, которые

выше по сравнению с алюминием и тем более полиамидом. Расход жидкости влияет на скорость выноса выбуренных частичек на поверхность. Установлено, что максимальное значение скорости разбуривания достигается при частоте оборотов 101,6 об/мин, осевой нагрузке 3,9 т и расходе 20,2 л/с и равно 0,52 м/ч.

Уравнение регрессии процесса разбуривания полиамида ПА 6

$$y = -0,369 + 0,009x_1 - 0,025x_2 + 0,016x_3 - 0,00003x_1^2 + 0,0179x_2^2.$$

Обобщенный коэффициент детерминации уравнения $R^2_{\text{extend}} = 0,948$.

Стоит отметить, что процесс резания полиамида отличается от резания металлов. Отличие заключается в малой теплостойкости, поэтому большие скорости вращения неприемлемы. Место контакта с резцами разогревается, и материал может начать плавиться.

Выявлено, что увеличение частоты оборотов влияет не столь значительно по сравнению с ростом осевой нагрузки (рисунок 5). Увеличение нагрузки приводит к значительному повышению параметра оптимизации. По всей видимости, это происходит ввиду низкого сопротивления резанию полиамида. Достаточно небольшого увеличения осевого усилия, чтобы повлиять на рост скорости разбуривания. Однако прочность заготовок из полиамида низкая, поэтому при разбуривании не превышаем рекомендуемое прижимное усилие, так как можно раздавить заготовку. Анализ показал, что обилие промывочной жидкости благотворно влияет на процесс резания из-за своевременно отводимой теплоты. Это не позволяет материалу плавиться, объединять отдельные стружки в образования, которые сложно подвергаются удалению с забоя.

Расход жидкости - 25 л/с

Рисунок 5.

Графическое представление скорости разбуривания полиамида ПА 6 в зависимости от режимов при расходе 25 л/с

Процесс разбуривания полиамида характеризуется плавностью и стабильностью во всех исследуемых режимах. Срывов и скачков при резании не наблюдается. Предположительно, данная особенность связана с малой плотностью материала порядка 1,15 г/см³ и низким модулем Юнга 2,2 ГПа, что ниже, чем у цветных металлов.

Установлено, что наибольшее влияние на скорость разбуривания полиамида оказывают частота вращения и осевая нагрузка. Наименьшее влияние опять же оказывает расход промывочной жидкости и парное взаимодействие перечисленных факторов друг с другом. Максимальное значение скорости разбуривания полиамида 1,02 м/ч достигнуто при частоте оборотов 154,5 об/мин, осевой нагрузке 4,5 т и расходе 24,4 л/с.

Выводы

Таким образом, в статье предложено решение задачи по повышению эффективности разбуривания долот обсадной колонны. Аналитически установлена зависимость скорости разбуривания от

осевого усилия, частоты вращения и расхода жидкости для образцов материала из алюминия Д16Т, бронзы БрАЖ 9-4 и полиамида ПА 6. Закономерности подтверждены экспериментально, и это позволило установить, что максимальная эффективность процесса достигается при использовании полиамида марки ПА 6. Скорость разбуривания полиамида при полученных оптимальных режимах составляет 1,01...1,02 м/ч. При этом скорость разбуривания алюминия оказалась ниже на 20 %, а бронзы ниже на 49 %. Кроме того, аналитически показано, что максимальное влияние на повышение скорости разбуривания оказывает осевая нагрузка.

Полученная взаимосвязь позволяет контролировать эффективность процесса разбуривания долот обсадной колонны в полевых условиях. Использование полиамида в качестве разбуриваемого материала для изготовления долот обсадной колонны защищено патентом 156923РФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Андреев Н. Л. Технология бурения обсадными трубами интервалов многолетнемерзлых горных пород // Наука и техника в газовой промышленности. 2010. № 4. С. 6–11.

2 Михайличенко А. В. Инновационная технология Tesco — бурение на обсадной колонне Casing Drilling // Нефть. Газ. Новации. 2011. № 12. С. 13–40.

3 Chung C., Hakam A., Tan M., Ugwuocha S., Twardowski E., Won K., Beattie S. Improved Performance with New Casing while Drilling Bit Design Elements — Development and Case Studies // Paper IPTC 15504 presented at the International Petroleum Technology Conference in Bangkok. Bangkok, Thailand, 2011.

4 Алешин В. Г., Андреев В. Д., Богатырева Г. П. Синтез сверхтвердых материалов / под ред. Н. В. Новикова и др. Киев: Наукова думка, 1986. 280 с.

5 Ковалевский Е. А., Ишбаев Г. Г. Проектирование породоразрушающего инструмента для бурения на обсадной колонне // Бурение и нефть. 2017. № 1. С. 32–35.

6 Ямалиев В. У., Имаева Э. Ш., Салахов Т. Р. О возможности распознавания технических состояний глубинного бурового оборудования // Нефтегазовое дело. 2005. Т. 3. С. 127–132.

7 АО «АРТ-Оснастка»: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: www.art-osnastka.ru.

8 Johnstone I., Chomley A., Cernev G., Hoq M., Atherton G., Cornel S., Jacobs M. Casing-Drilling Step Improvement: PDC Successfully Drills out Casing Bit and Finishes Hole Section at Lowest Cost // Paper SPE 105395 presented at SPE/IADC Drilling Conference in Amsterdam. Amsterdam, Netherlands, 2007.

9 Бор, его соединения и сплавы / В. Г. Самсонов, Л. Я. Марковский, А. Ф. Жигач, М. Г. Валяшко. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. 590 с.

10 King W., Leon C., Reese M., Rumbos T., Schader K. PDC Shearing Cap Technology Protects Cutters when Drilling out Casing Bits for Increased ROP and Bit Life in the Next Hole Section. Paper SPE 173086 presented at SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition in London. London, UK, 2015.

11 Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 283 с.

12 Козловский Е. А., Питерский В. П., Комаров М. А. Кибернетика в бурении. М.: Недра, 1982. 298 с.

13 Способ определения работоспособности породоразрушающего инструмента / В. У. Ямалиев, М. М. Хасанов, Р. Н. Якупов, Е. И. Ишемгузин, И. Р. Кузеев, Д. С. Солодовников: пат. 2188939 Рос. Федерация. МПК7 E21B44/06, E21B44/06. № 2001113974/03; заявл. 25.05.01; опубл. 10.09.02, бюл. 2002. № 10.

14 Способ регулирования оптимальной осевой нагрузки на долото при бурении скважин / И. Е. Ишемгузин, В. У. Ямалиев, В. В. Пашинский, Е. И. Ишемгузин, М. Н. Козлов, С. В. Назаров, Э. М. Галеев, А. В. Лягов: пат. 2124125 Рос. Федерация. МПК6 E21B045/00, E21B044. № 97103910/03; заявл. 12.03.97; опубл. 27.12.98, бюл. 1998. № 5.

15 Трушкин О. Б. Анализ силовых и энергетических параметров работы породоразрушающих инструментов на базе разработанного автономного цифрового измерительного устройства: дис. ... канд. тех. наук. Уфа, 2006. 202 с.

REFERENCE

1 Andreev N. L. Technology of casing pipes drilling with intervals of permafrost rocks. *Nauka i tekhnika v gazovoj promyshlennosti — Science and technology in the gas industry*, 2010, no. 4, pp. 6–11. [in Russian].

2 Mihajlichenko A. V. Innovative technology Tesco — drilling on casing Casing Drilling. *Neft'. Gaz. Novacii*.

— *Oil. Gaz. Novations*, 2011, no. 12, pp. 13–40. [in Russian].

3 Chung C., Hakam A., Tan M., Ugwuocha S., Twardowski E., Won K., Beattie S. Improved Performance with New Casing while Drilling Bit Design Elements — Development and Case Studies. *Paper IPTC 15504 presented at the International Petroleum Technology Conference in Bangkok*. Bangkok, Thailand, 2011.

4 Aleshin V. G., Andreev V. D., Bogatyreva G. P. *Sintez sverhtverdyh materialov* [Synthesis of superhard materials]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 280 p. [in Russian].

5 Kovalevskii E. A., Ishbaev G. G. Designing a rock drill tool for drilling on a casing string. *Burenie i nefit'-Drilling and oil*, 2017, no. 1, pp. 32–35. [in Russian].

6 Yamaliev V. U., Imaeva E. Sh., Salahov T. R. About possibility of recognition of technical conditions of deep drilling equipment. *Neftegazovoe delo — Oil and gas business*, 2005, vol. 3, pp. 127–132. [in Russian].

7 AO «ART-Osnastka»: Official Site. [Electronic Resource]. URL: www.art-osnastka.ru.

8 Johnstone I., Chomley A., Cernev G., Hoq M., Atherton G., Cornel S., Jacobs M. Casing-Drilling Step Improvement: PDC Successfully Drills out Casing Bit and Finishes Hole Section at Lowest Cost. *Paper SPE 105395 presented at SPE/IADC Drilling Conference in Amsterdam*. Amsterdam, Netherlands, 2007.

9 Samsonov V. G., Markovskij L. Ya., Zhigach A. F., Valyashko M. G. *Bor, ego soedineniya i splavy* [Boron, its compounds and alloys]. Kiev, AN USSR Publ., 1960. 590 p. [in Russian].

10 King W., Leon C., Reese M., Rumbos T., Schader K. PDC Shearing Cap Technology Protects Cutters when Drilling out Casing Bits for Increased ROP and Bit Life in the Next Hole Section. *Paper SPE 173086 presented at SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition in London*. London, UK, 2015.

11 Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskij Yu. V. *Planirovanie ehksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij* [Planning an experiment when searching for optimal

conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 283p. [in Russian].

12 Kozlovskii E. A., Piteriskii V. P., Komarov M. A. *Kibernetika v burenii* [Cybernetics in drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 298 p. [in Russian].

13 Yamaliev V. U., Hasanov M. M., Yakupov R. N., Ishemguzhin E. I., Kuzeev I. R., Solodovnikov D. S. *Sposob opredeleniya rabotosposobnosti porodorazrushayushchego instrumenta* [Method for determining the operability of a rock cutting tool]. Pat. RF no. 2188939, 2002, no. 10. [in Russian].

14 Ishemguzhin I. E., Yamaliev V. U., Pashinskij V. V., Ishemguzhin E. I., Kozlov M. N., Nazarov S. V., Galeev E. M., Lyagov A. V. *Sposob regulirovaniya optimal'noj osevoj nagruzki na doloto pri burenii skvazhin*. [The method of adjusting the optimum axial load on the bit when drilling wells]. Pat. RF no. 2124125, 1998, no. 5. [in Russian].

15 Trushkin O. B. *Analiz silovyh i ehnergeticheskikh parametrov raboty porodorazrushayushchih instrumentov na baze razrabotannogo avtonomnogo cifrovogo izmeritel'nogo ustrojstva: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.13*. [Analysis of power and energy parameters of the rock-destroying tools on the basis of the developed independent digital measuring device. Cand. techn. Sci. diss.]. Ufa, 2006. 202 p. [in Russian].

Ковалевский Е. А., инженер-конструктор, ООО НПП «БУРИНТЕХ», г. Уфа, Российская Федерация
E. A. Kovalevskii, Design-Engineer, «BURINTEKH» LLC, Ufa, Russian Federation.
e-mail: evgenii.konstr@gmail.com

Ямалиев В. У., д-р техн. наук, профессор кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация.
V. U. Yamaliev, Doctor of Engineering of Sciences, Professor of the Chair «Machinery and Equipment Gas and Oil Fields», FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation.