Двух и трехшарошечные конструкции буровых долот.
Преимущества и недостатки

Д. Ю. СЕРИКОВ *– д.т.н., доцент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина*
Д. А. БОРЕЙКО *– к.т.н., доцент, заведующий кафедрой МОНиГП ФГБОУ ВО «УГТУ»*

История создания и освоения многочисленных типов и размеров шарошечных буровых долот самых различных конструкций началась в 1909 году, когда американский полковник-миллиардер Говард Хьюз запатентовал в США первое двухшарошечное буровое долото. Именно двухшарошечное долото стало родоначальником применяемых и в настоящее более 1500 типоразмеров шарошечных буровых долот, используемых как при бурении глубоких нефтяных и газовых скважин, так и проведении геологоразведочных работ.

Ключевые слова: бурение скважин, буровое долото, шарошка, проходка на инструмент, механическая скорость бурения.

Это долото явилось продолжением и развитием ранее достаточно успешно применявшегося в США одношарошечного долота для бурения мягких пород. В отличие от динамики работы одношарошечного долота, породоразрушающие элементы которого соскребали породу с полусферической поверхности образуемого забоя и достаточно часто истирались, динамика работы двухшарошечного долота обеспечивала создание плоского забоя. Зубья этого долота, перекатываясь по забою, разрушали породу ударным воздействием. Это обеспечивало гораздо большую стойкость зубьев от истирания и механическую скорость бурения, вполне достаточные для бурения относительно неглубоких геологоразведочных скважин, строящихся в те годы.

Рис. 1. Конструкция трехшарошечного бурового долота

В 1929 году Говард Хьюз разработал и запатентовал созданное на базе двухшарошечного трехшарошечное буровое долото, обладающее значительно большей устойчивостью к сохранению направления бурения, чем двухшарошечное, и ставшее впоследствии, на протяжении более чем 100 лет, основным породоразрушающим инструментом для бурения глубоких нефтяных и газовых скважин во всем мире (рис. 1).

Однако, двухшарошечные долота сумели сохранить свою нишу в общем объеме производимого бурового инструмента и в настоящее время продолжают успешно применяться как для бурения геологоразведочных скважин, так и при проведении других видов буровых работ. На рис. 2 представлена принципиальная конструктивная схема двухшарошечного бурового долота, содержащего лапы 1 с наклонными цапфами 2 и самоочищающиеся шарошки 3, смонтированные на цапфе 2 посредством подшипников 4. Периферийные венцы шарошек 3 оснащены призматическими зубьями 5 и 6, при этом зубья 5 одной шарошки входят в межвенцовую впадину 7 другой шарошки, у которой периферийный ряд зубьев 6 выполнен таким образом, что угол α_1 межзубцовых впадин 8 равен углу α_2 межвенцовой впадины 7.

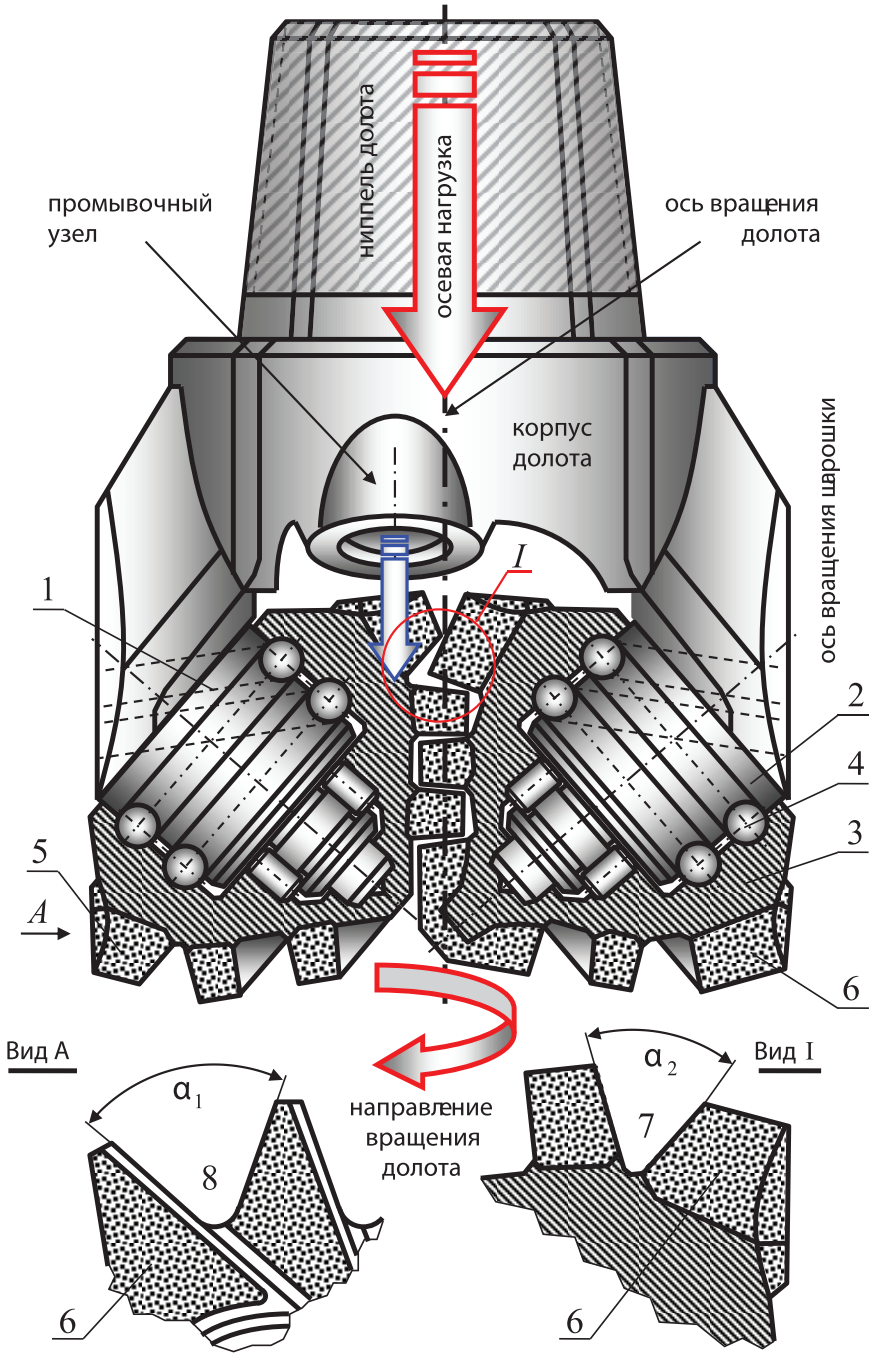

Рис. 2. Конструкция двухшарошечного бурового долота
α_1 – угол межзубцовых впадин;
α_2 – угол межвенцовой впадины;
1 – лапы;
2 – наклонные цапфы;
3 – шарошки самоочищающиеся;
4 – подшипники;
5 и 6 – зубья призматические;
7 и 8 – впадины межзубцовые.

К преимуществам двухшарошечного долота по сравнению с трехшарошечным такого же диаметра можно отнести наличие более значительных диаметров шарошек и габаритов опорных узлов. Это связано с тем, что в двухшарошечных долотах на 25…40% объем, ограниченный для шарошек, необходимо распределить только на две части, вместо трех в трехшарошечных долотах того же диаметра (рис. 3).

Этими важными обстоятельствами постепенно начали пользоваться для создания новых конструкций двухшарошечных буровых долот малого и среднего диаметров для бурения уже твердых и даже твердо-крепких пород.

Рост механической скорости бурения двухшарошечных долот по сравнению с трехшарошечными такого же диаметра, обеспечивается за счет увеличения габаритных наружных размеров шарошек и их подшипниковых узлов, большим вылетом и шагом зубьев, позволяющим увеличить динамику воздействия зубьев вооружения на породу.

Увеличенный вылет над телом шарошки и больший шаг между зубьями при перекатывании двух шарошек по забою с примерно одинаковым количеством венцов и зубьев на каждой шарошке, как и у трехшарошечных долот (от 2 до 3 венцов на шарошке), обеспечивают разное количество одновременно контактирующих с забоем зубьев. Оно составляет примерно 2…3 зубка для двухшарошечного долота, а для трехшарошечного – 4…6 зубков. Но поскольку число шарошек у тех и других долот различно, то у двухшарошечных долот общее количество одновременно контактирующих зубков составляет (2…3)×2 = (4…6) штук, а для трехшарошечных (2…3)×3 = (6…9) штук, то есть в полтора раза больше. А как известно, чем меньшее количество одновременно контактирующих с забоем зубков, тем больше создаваемое ими удельное давление на породу. Таким образом, у двухшарошечных долот удельное давление, создаваемое зубьями их вооружения на породу, примерно в 1,5 раза больше, чем у аналогичных по диаметру трехшарошечных долот при одинаковой осевой нагрузке.

При создании двухшарошечных долот с твердосплавным зубчатым вооружением увеличенная толщина стенок шарошек, кроме обеспечения увеличенных габаритов опоры, позволяет разместить и закрепить путем запрессовки или пайки твердосплавные зубки увеличенных габаритов, обладающих повышенной стойкостью по сравнению с твердосплавными зубками меньшего размера, используемых при оснащении аналогичных по диаметру трехшарошечных долот.

У двухшарошечных долот есть еще одно важное преимущество перед трехшарошечными долотами. Очень малые габариты скважины по диаметру не позволяют разместить на лапах трехшарошечных долот приливы для установки боковых промывочных узлов.

>>>

Поэтому для промывки забоя у этих долот, как правило, используется только один центральный промывочный узел, который надежно очищает от шлама лишь центральную часть бурового инструмента и значительно хуже периферийную. Струя промывочной жидкости, прежде чем достигнуть забоя, попадает на поверхностные вершинные части шарошек, и только потом, пройдя сквозь узкие щели самоочищающихся шарошек, сталкивается с поверхностью забоя. Это существенно увеличивает абразивный износ и без того менее прочных вершинных частей шарошек, снижает эффективность очистки забоя, очищая лишь центральную его часть, и, как следствие, снижает механическую скорость бурения и проходку на инструмент.

В отличие от трехшарошечных, у двухшарошечных долот условия для размещения боковых промывочных узлов значительно более выгодные.

Между внешними габаритами двух шарошек имеется достаточно большие боковые пространства, в которых свободно размещаются боковые приливы, доходящие практически до самой поверхности забоя, на конце которых размещаются сменные гидромониторные насадки (рис. 4).

Известно, что трехшарошечные долота малого диаметра, в которых возможно разместить на лапах приливы для промывочных узлов со сменными твердосплавными насадками, лишь условно называются гидромониторными. Постоянный гидромониторный эффект, дополнительно к механическому разрушению породы забоя зубьями долота, обеспечивает кроме очистки забоя еще и гидромеханическое разрушение породы, которое возникает только при условии, когда выходное отверстие из промывочной насадки находится над забоем не более чем на величину равную восьми диаметрам ее выходного отверстия.

Поскольку промывочные каналы между двумя шарошками направлены не в центр, на вершины шарошек, а непосредственно на свободную поверхность периферии забоя, занимающую по площади его значительную часть, приближение выходного отверстия гидромониторных насадок к его поверхности обеспечивает наличие эффекта дополнительного гидромеханического разрушения породы.

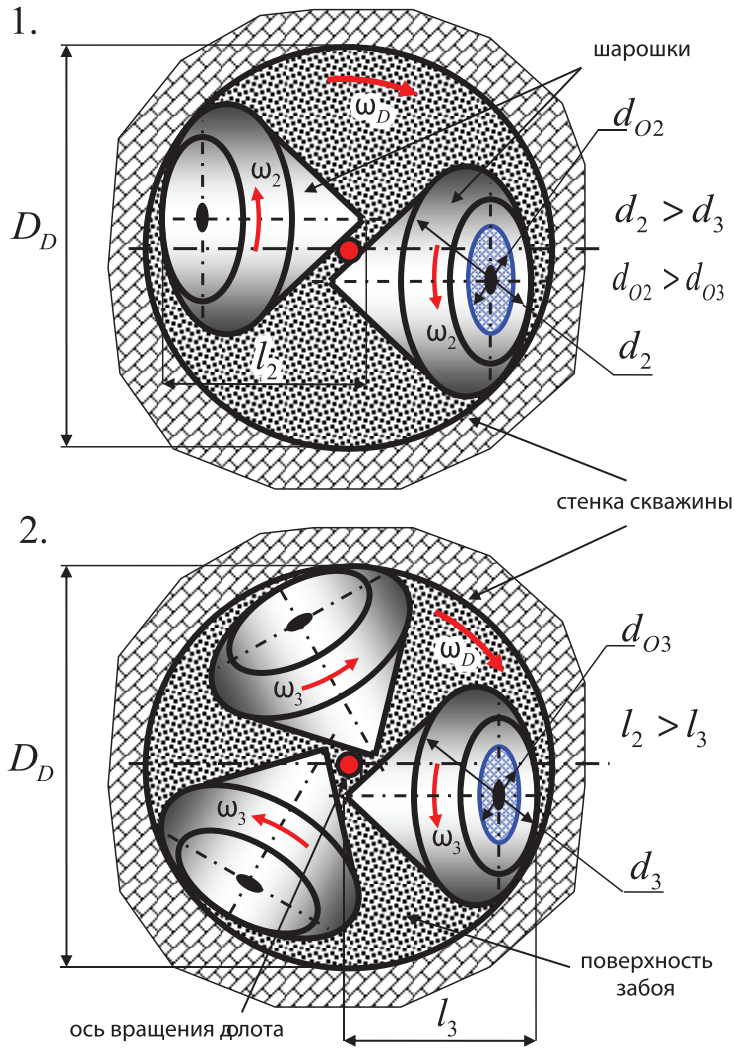

Рис. 3. Сравнение конструкций двух- и трехшарошечного бурового долота
d_2 – диаметр шарошки двухшарошечного долота;
d_3 – диаметр шарошки трехшарошечного долота;
ω_2 – угловая скорость вращения шарошки двухшарошечного долота;
ω_3 – угловая скорость вращения шарошки трехшарошечного долота;
ω_D – угловая скорость вращения долота;
d_{O2} – диаметр опорного узла двухшарошечного долота;
d_{O3} – диаметр опорного узла трехшарошечного долота;
l_2 – длина образующей шарошки двухшарошечного долота;
l_3 – длина образующей шарошки трехшарошечного долота;
D_D – диаметр долота.

Наибольшее успешное применение двухшарошечных долот характерно при бурении известняков, аргиллитов, алевролитов, плотных глин и мергелей.

Как правило, двухшарошечные долота выпускаются не в трехсекционном сварном исполнении, как трехшарошечные, а в двухсекционном, что значительно снижает трудоемкость и упрощает технологию их изготовления.

Оси цапф шарошек двухшарошечных долот обычно наклонены под углом 58÷57°30’. Шарошки оснащены самоочищающимися фрезерованными зубьями или твердосплавными зубками клиновидной формы с большим вылетом над телом и большим шагом. Рабочие поверхности фрезерованных зубьев армируются зерновым твердым сплавом, содержащим карбид вольфрама и кобальт.

Известно, что конструкции двухшарошечных буровых долот, предназначенные для бурения твердых, средних и мягких пород сильно отличаются друг от друга. Одной из основных отличительных особенностей является наличие или отсутствие проскальзывания зубьев вооружения по забою, определяемое как геометрическими параметрами шарошек, так и их пространственной ориентацией относительно оси вращения долота.

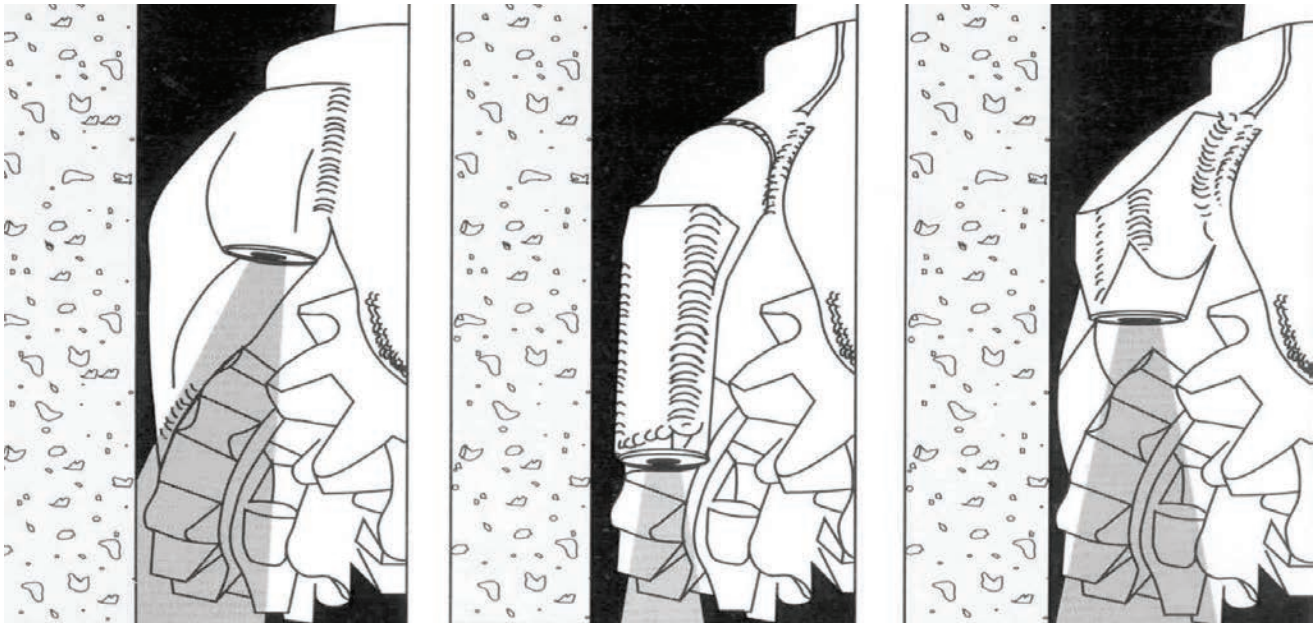

Рис. 4. Варианты размещения промывочных узлов

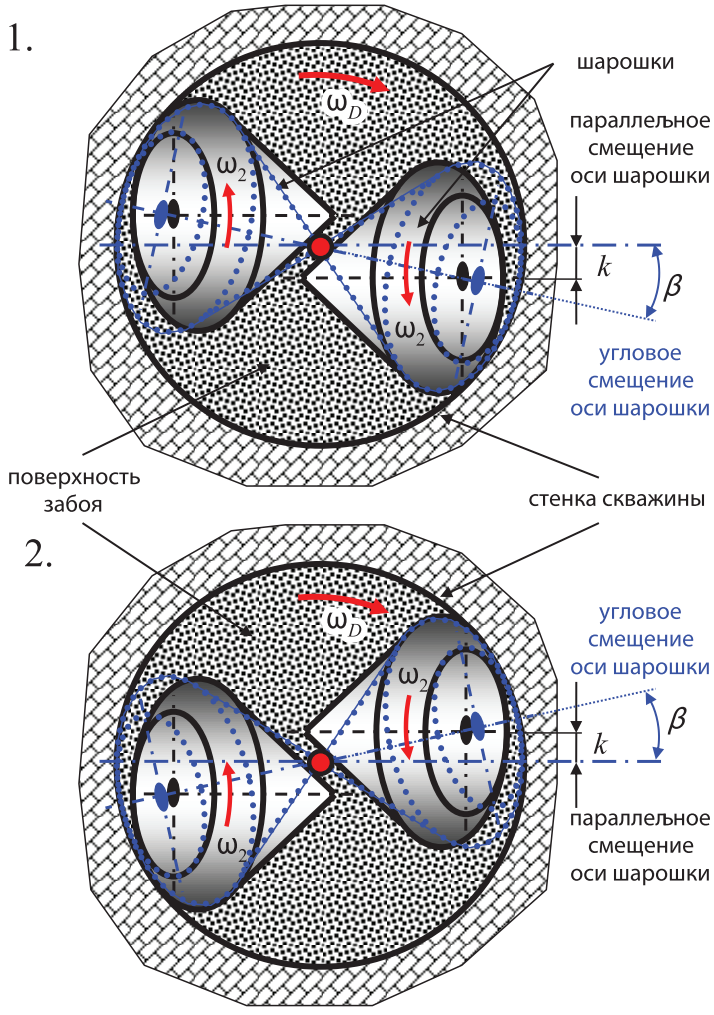

Рис. 5. Принципиальная схема вариантов пространственной ориентации шарошек двухшарошечного бурового долота
ω_2 – угловая скорость вращения шарошки;
ω_D – угловая скорость вращения долота;
k – параллельное смещение оси шарошки;
β – угловое смещение оси шарошки.

От соотношения величины качения и скольжения зубьев по забою зависит характер разрушения породы, изменяющийся от дробяще-скалывающего для твердых пород до ударно-режущего для мягких. Как правило, двухшарошечные буровые долота для мягких и средних пород проектируются так, чтобы при вращении инструмента шарошки перемещались по поверхности забоя с одновременным проскальзыванием. С целью увеличения величины проскальзывания зубьев вооружения по забою у долот данных типов оси вращения шарошек смещают или разворачивают как по направлению, так и против направления вращения долота. Принято считать, что в первом случае смещение имеет положительное значение, а во втором – отрицательное. Величина параллельного смещения ***k*** или угол разворота β задаются в зависимости от типа и размера двухшарошечного бурового долота (рис. 5).

Смещение осей шарошек относительно оси вращения долота позволяет существенно повысить срезающие усилия зубчатого вооружения при внедрении его в породу забоя, требующих на порядок меньшей энергии при разрушении мягких и средних пород. Это позволяет дополнительно повысить эффективность бурения. В зависимости от величины диаметров двухшарошечных долот, смещения осей шарошек составляет от 3 до 6 мм.

Таблица 1. Сравнительный анализ достоинств двухшарошечных буровых долот по отношению к трехшарошечным

Преимущество двухшарошечного долота	Практическая значимость
Выпускаются не в трехсекционном сварном исполнении, как трехшарошечные, а в двухсекционном, что позволяет снизить себестоимость их изготовления.	– Значительное снижение трудоемкости и упрощение технологии их изготовления. – Позволяет существенно снизить затраты на приобретение шарошечных буровых долот.
Наличие более значительных наружных диаметров шарошек и габаритов опорных узлов.	– Повышение долговечности и надежности работы шарошек за счет значительного увеличения размеров подшипников, а также толщины стенок шарошек. – Уменьшает скорости вращения шарошек, что снижает интенсивность износа подшипниковых узлов. – Возможность размещать на поверхностях увеличенных венцов большее количество породоразрушающих элементов, больших размеров фрезерованных или твердосплавных зубьев.
Увеличение габаритных наружных размеров шарошек позволяет использовать зубчатое вооружение с большим вылетом и шагом зубьев.	– Увеличение динамического воздействия зубьев вооружения на породу забоя. – Возможность увеличения осевой нагрузки на долото для создания условий для объемного разрушения породы. – Обеспечение разного количества одновременно контактирующих с забоем зубьев: удельное давление, создаваемое зубьями вооружения двухшарошечных долот на породу, примерно в 1,5 раза больше, чем у аналогичных по диаметру и одинаковой осевой нагрузке трехшарошечных долот.
Двухшарошечные долота с твердосплавным зубчатым вооружением, оснащаются зубьями большего размера, чем на трехшарошечных долотах аналогичного диаметра.	– Твердосплавные зубки увеличенных габаритов, обладают повышенной стойкостью к изнашиванию и знакопеременным динамическим нагрузкам по сравнению с твердосплавными зубками меньшего размера, используемых при оснащении аналогичных по диаметру трехшарошечных долот. – Повышение механической скорости бурения, а также проходки на долото.
Значительно более выгодные условия для размещения боковых промывочных узлов.	– Обеспечение наличия эффекта дополнительного гидромеханического разрушения породы.
Увеличенное свободное пространство между шарошками двухшарошечного долота по сравнению с трехшарошечным, позволяет задавать большие смещения шарошек.	– Обеспечивает большие скольжения зубьев по забою, а следовательно и большую механическую скорость бурение.
Двухшарошечная компоновка дает возможность более полноценно применять сфероконические шарошки.	– Использование шарошек данной формы обеспечивает не только успешное углубление скважины, но и качественное уплотнение ее стенок.

Двухшарошечные долота со вставными твердосплавными зубками имеют минимальные смещения осей, порядка 1…1,5 мм или изготавливаются вообще без их смещения.

Увеличенное свободное пространство между шарошками двухшарошечного долота по сравнению с трехшарошечным, позволяет задавать большие смещения шарошек, как параллельные, так и угловые, обеспечивающие большие скольжения зубьев по забою, а, следовательно, и большую механическую скорость бурение. Также двухшарошечная компоновка дает возможность более полноценно применять сфероконические шарошки обеспечивающих не только углубление скважины, но и качественное уплотнение ее стенок.

Результаты сравнительного анализа конструкций двух- и трехшарошечных долот сведены в табл. 1.

Таким образом, явные преимущества двухшарошечных буровых долот, обозначенные в табл. 1, предопределяют необходимость совершенствования их конструкций для повышения эффективности процесса бурения нефтяных и газовых скважин.

Все представленные преимущества двухшарошечных буровых долот перед трехшарошечными одинакового диаметра обеспечивают необходимость их применения при бурении скважин различного назначения и дальнейшего совершенствования их конструкций и технологий изготовления.

В настоящее время, в связи с тем, что основные объемы бурения осуществляются долотами Polycrystalline Diamond Bits (PDC), работы по разработке и созданию новых конструкций двухшарошечных долот заметно уменьшились. Однако с появлением новых материалов и технологий создаются условия для дальнейшего совершенствования двухшарошечных буровых долот как по вооружению, подшипниковым узлам, так и системам промывки.

Это подтверждается и тем, что основные ведущие мировые фирмы-производители бурового инструмента на постоянной основе серийно выпускают самые различные конструкции двухшарошечных долот малого и среднего диаметров, преимущественно до 244,5 мм, а буровые сервисные компании охотно их используют.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богомолов Р. М., Носов Н. В. Буровой инструмент. Энциклопедия изобретений. В 2-х частях, М.: Инновационное машиностроение, 2015. – 826 с.
2. Сериков Д. Ю. Повышение эффективности шарошечного бурового инструмента с косозубым вооружением: автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.02.13. – Ухта, 2018. – 45 с.
3. Палий П. А. Буровые долота. Справочник / П. А. Палий, К. Е. Корнеев. – М.: Недра, 1971. – 445 с.
4. Сериков Д. Ю., Гринев А. М. Исследование проскальзывания вооружения шарошечных буровых долот // Территория Нефтегаз. – 2016. – № 7–8. – С. 20–27.
5. Мокшин А. С. Шарошечные долота / А. С. Мокшин, Ю. Е. Владиславлев, Э. Л. Комм. – М.: Недра, 1971. – 216 с.
6. Сериков Д. Ю. Совершенствование геометрии вооружения шарошечных расширителей // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2014. – №10. – С. 28–33.
7. Богомолов Р. М., Носов Н. В., Крылов С. М., Кремлев В. И. Совершенствование технологии и сборки буровых шарошечных долот. М.: Машиностроение, 2014. – 228 с.