

УДК 622.243

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ АЛМАЗНОЙ КОРОНКИ ДЛЯ БУРЕНИЯ В ТВЕРДЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Нескоромных Вячеслав Васильевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. E-mail: sovair@bk.ru

Петенёв Павел Геннадьевич,

аспирант кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. E-mail: pavel-whait@mail.ru

Неверов Александр Леонидович,

канд. техн. наук, доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин Института нефти и газа Сибирского федерального университета, Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Пушмин Павел Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры технологий геологической разведки Института недропользования Иркутского Государственного технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: pps@istu.edu

Романов Григорий Родионович,

аспирант кафедры технологий геологической разведки Института недропользования Иркутского Государственного технического университета, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83. E-mail: grom123456@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблемы повышения эффективности бурения скважин в твердых анизотропных горных породах.

Цель работы: исследование и разработка новой модели алмазной буровой коронки для эффективного бурения твердых анизотропных горных пород.

Методы исследования: аналитические исследования и экспериментальные работы по оценке работоспособности новой алмазной коронки на буровом стенде.

Результаты. Разработана модель новой алмазной коронки, позволяющей реализовать высокопроизводительное бурение анизотропных горных пород. Представлены данные аналитического анализа и методика экспериментальных работ на буровом стенде. Проведено опытное бурение новой коронкой, которое показало особенности механики работы опытной коронки, что позволяет провести усовершенствование конструкции бурового инструмента. Установлены закономерности влияния параметров режима бурения на характер и интенсивность изнашивания коронки, механическую скорость бурения, энергоемкость процесса бурения.

Выводы. Опытная коронка, разработанная для условий бурения скважин в твердых анизотропных горных породах, в условиях экспериментального бурения показала свою высокую работоспособность. Полученные результаты экспериментальных работ подтвердили анализ и позволили уточнить механизм работы опытной коронки при различных параметрах режима бурения с применением различных очистных агентов – воды и эмульсии. Новые данные о механизме работы коронки будут использоваться для усовершенствования конструкции опытного образца коронки, что позволит получить более совершенный буровой инструмент для колонкового бурения твердых анизотропных горных пород.

Ключевые слова:

Горная порода, бурение, эксперимент, алмазная коронка, разрушение.

Для бурения скважин в твердых породах применяются различные типы алмазных коронок с кольцевой алмазосодержащей матрицей, разделенной на сектора промывочными пазами равных размеров. Указанная конструкция коронки выполняется с матрицей, которая имеет

определенную в зависимости от твердости и абразивности горных пород твердость алмазосодержащих секторов и насыщенность алмазами. Твердость секторов матрицы и насыщенность алмазами секторов матрицы выполняются одинаковыми.

Недостатком коронок с равным размером секторов является низкая эффективность как средства, снижающего искривление скважин при бурении анизотропных горных пород. Учитывая, что основная часть твердых горных пород является анизотропной, проблема сохранения проектного направления скважин, особенно глубоких, является актуальной. Причины искривления скважин при бурении анизотропных горных пород алмазным инструментом подробно изложены в работах [1–9]. Анизотропия горной породы предопределяет неравномерность разрушения забоя и стенок скважины. Вследствие влияния дестабилизирующих равномерное вращение силовых факторов – опрокидывающего момента $M_{он}$ и дестабилизирующего усилия ΔF (9. С. 66, 71. формулы 2.38, 2.40) буровая коронка в процессе разрушения анизотропных горных пород находится в состоянии перекоса и стремится реализовать вращение вокруг своей оси. Подобный вид движения бурового инструмента приводит к интенсивному искривлению скважины и отклонению ствола скважины от проектного направления.

Для устранения факторов, вызывающих искривление ствола скважины, может использоваться асимметричная форма торцевой части бурового инструмента. В качестве таковых известно применение алмазных коронок, конструкции которых защищены авторскими свидетельствами СССР № 1620590 [10], 1681598 [11] и 1752915 [12, 13]. Первая из них разработана в Томском политехническом университете В.В. Кривошеевым и получила название базированной коронки. Её разработка основывается на теории сверления глубоких отверстий Н.Д. Троицкого [1, 14].

Коронка, в соответствии с авторским свидетельством № 1681598 [11], включает цилиндрический корпус с резьбой и матрицу, насыщенную объемными и подрезными алмазами и разделенную на сектора промывочными пазами, причем один промывочный паз выполнен увеличенной ширины в сравнении с остальными, что обеспечивает наличие эксцентриситета торца матрицы. В данной коронке для компоновки бурового снаряда, в соответствии с авторским свидетельством № 2078193 [15], для сохранения ресурса коронки предложено увеличить насыщенность алмазами примыкающих к широкому пазу секторов матрицы на 25 %.

Недостатком коронки, выполненной в соответствии с авторскими свидетельствами № 1681598 [11], является нестабильность работы, так как наличие промывочного паза увеличенной ширины (90° центрального угла) приводит к перекосу коронки в направлении этого паза, что вызывает как перегрузку и неравномерный износ секторов, примыкающих к широкому промывочному пазу, так и повышенную деформацию колонковой трубы над коронкой. В результате наблюдается снижение ресурса самой коронки и возрастает вероятность искривления ствола скважины.

При этом не учтено, что повышение ресурса нагруженных секторов матрицы можно получить не только за счет насыщенности алмазами, но и, безусловно, за счет повышения твердости самой матрицы.

Одним из направлений совершенствования буровых инструментов для снижения искривления стволов скважин, буримых в анизотропных горных породах, является создание инструментов с динамическими связями породоразрушающих элементов [16, 17].

Разработана новая алмазная коронка, защищенная заявкой на полезную модель (пат. № 148333) [18], которая учитывает основные недостатки известных технических решений.

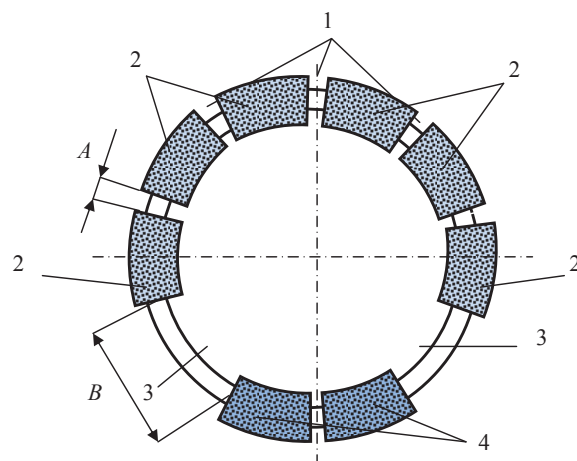


Рис. 1. Конструкция матрицы опытной алмазной коронки (КИТ) для бурения анизотропных горных пород: 1 – узкие промывочные каналы шириной A ; 2 – широкие промывочные сектора шириной B ; 3 – алмазосодержащие сектора; 4 – более твердые алмазные сектора

Fig. 1. A design of a matrix of a skilled diamond drill bit (crown) (KIT) for drilling anisotropic rocks: 1 – narrow flushing channels of width A ; 2 – wide flushing sectors of width B ; 3 – diamond-bearing sectors; 4 – firmer diamond sectors

Матрица предлагаемой опытной коронки (рис. 1) состоит из узких – 1 и широких – 2 промывочных пазов и алмазосодержащих секторов – 3, 4 равного размера. Промывочные пазы – 1 одного стандартного размера (шириной A) являются более узкими, а промывочные пазы – 2 более широкие (шириной B), чем промывочные пазы – 1. Ширина промывочных пазов – 2 может быть различна в разных моделях коронки, но неизменно больше, чем ширина промывочных пазов – 1. При этом пазы – 2 расположены в матрице коронки таким образом, что обеспечивается эксцентриситет торца матрицы относительно продольной оси буровой коронки, а это достигается тем, что число секторов – 3, 4 по обе стороны от промывочных пазов – 2 различно. Например, с одной стороны от широких промывочных пазов – 2 имеется восемь секторов – 3, а с другой в наличии всего два сектора – 4. При этом алмазосодержащие сектора – 4 имеют более высокую твердость, чем алмазосодержащие сектора – 3, причем твердость секто-

ров – 4 определяется соотношением S_6/S_m , где S_6 – площадь алмазосодержащих секторов – 3 на половине торца коронки с узкими промывочными пазми – 1, а S_m – площадь алмазосодержащих секторов – 4 на половине торца коронки с широкими промывочными пазми – 2.

Опытная коронка с измененной формой торца (КИТ) работает следующим образом.

При бурении, когда алмазная коронка воспринимает действие осевого усилия, алмазы секторов матрицы – 3, 4 внедряются в горную породу. Поскольку в матрице имеется два широких промывочных паза – 2, расположенных с одной стороны от торца матрицы, то торец матрицы коронки имеет геометрически смещенный центр тяжести поперечного сечения относительно геометрического центра поперечного сечения корпуса коронки (точка C на рис. 2), что приводит к более значительному нагружению при действии осевого усилия на коронку секторов – 4, в сравнении с секторами – 3. При этом сектора – 4 исключают перекося коронки до тех пор, пока сектора – 4 не получат опережающего, в сравнении с секторами – 3, износа. Именно с этой целью сектора – 4 следует изготавливать более твердыми. Наличие же эксцентриситета торца матрицы обеспечивает то, что при вращении коронки в процессе бурения будет задаваться вращение коронки вокруг оси скважины и исключается режим вращения с ориентированным перекося коронки, при котором может происходить максимальное искривление ствола скважины [9].

Ориентированный перекося торца коронки, вызванный изгибом колонкового снаряда и действием дестабилизирующих сил и моментов сил, исключается при бурении предлагаемой коронкой следующим образом.

Торец коронки (рис. 2) можно разделить на две части вдоль осевой линии $O-O$. Одна половина торца оснащена узкими стандартными промывочными пазми – 1, которыми разделены сектора – 3. Поскольку алмазы в секторах – 3 распределены равномерно, то при бурении, когда на коронку оказывает действие осевое усилие и коронка вращается на забое в направлении слева направо, равнодействующую F_1 единичных сил резания-скалывания породы этой частью торца можно поместить в виде вектора в центре тяжести половины кольца матрицы. Равнодействующая сил резания-скалывания породы на второй половине торца коронки F_2 также может быть направлена из центра тяжести этой половины торца. При этом очевидно, что $F_1 > F_2$, поскольку за счет наличия двух широких промывочных пазов – 2 число алмазных резов на этой половине торца коронки существенно меньше, чем на противоположной половине торца. В результате разность усилий приведет к появлению равнодействующей $F = F_1 - F_2$. Усилие F на схеме (рис. 2) будет располагаться в центре тяжести торца коронки и ориентировано в сторону большей силы – F_1 . Центр тяжести торца коронки при вращении инструмента при бурении становится

мгновенным центром вращения, что задает некоторые особенности динамики бурового инструмента, существенно влияющие на процесс формирования ствола скважины: вследствие прижатия коронки к стенке скважины возможно фрезерование стенки и керна и, соответственно, локальный износ самой коронки.

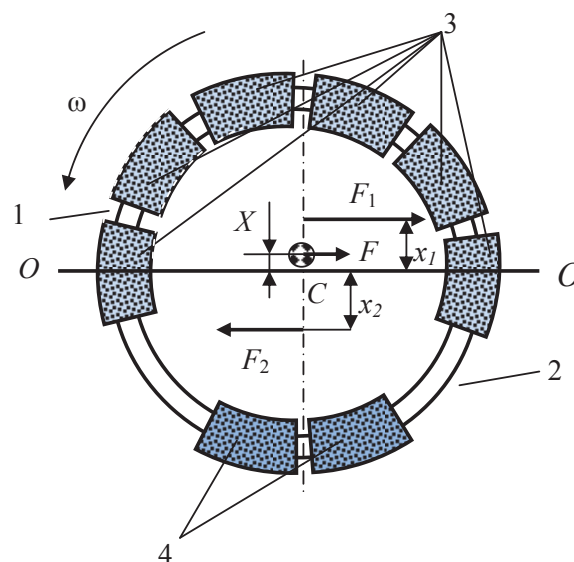


Рис. 2. Схема торца опытной коронки с распределением усилий резания-скалывания породы: X, x_1, x_2 – расстояния от центральной оси $O-O$ до центров тяжести торца матрицы и половинок торца матрицы; F, F_1, F_2 – усилия резания-скалывания породы: результирующее и соответственно для частей торца матрицы по обе стороны от центральной оси $O-O$

Fig. 2. The scheme of an end face of a test bit with distribution of efforts of rock destruction: X, x_1, x_2 are the distances from the central axis $O-O$ to the gravity centers of the matrix end face and halves of the matrix end face; F, F_1, F_2 are the efforts of rock cutting-shearing: the resultant one and respectively for the parts of the matrix end face on both sides from the central axis $O-O$

Величину усилия F можно связать с коэффициентом сопротивления породы разрушению алмазными резами μ_k [19].

Коэффициент сопротивления μ_k определяется по формуле [19]

$$\mu_k = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 n_p \sigma_{ск} + f}{2tg\gamma_{ск} P_{ос}}$$

где h – глубина внедрения в породу алмазного реза, м; d – диаметр алмазного реза, м; n_p – число активно работающих резов; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание породы, Па; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью реза, град; $P_{ос}$ – осевая нагрузка, Н; f – коэффициент трения резов коронки о забой.

Усилие резания-скалывания породы всеми резами коронки при бурении будет определяться формулой

$$F_p = \mu_k P_{ос}$$

Таким образом, усилие F , вызванное дисбалансом торца опытной коронки при условии равномерного распределения алмазных резцов во всех секторах матрицы с учетом геометрических размеров торца, может определяться зависимостью

$$F = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{\text{ск}} S_{\text{т}} \left(\frac{n_6}{S_6} - \frac{n_m}{S_m} \right) + f \frac{P_{\text{ос}}}{S_{\text{т}}} (S_6 - S_m), \quad (1)$$

где $S_{\text{т}}$ – общая площадь торца алмазной коронки, м^2 ; S_6 – площадь алмазосодержащих секторов – 3 на половине торца коронки с узкими промывочными пазами – 1 (рис. 2); S_m – площадь алмазосодержащих секторов – 4 на половине торца коронки с широкими промывочными пазами – 2 (рис. 2); n_6, n_m – число алмазных резцов на половинах торцевой части матрицы, разделенных линией $O-O$ без широких промывочных каналов и с широкими промывочными каналами соответственно (рис. 2).

Коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$ зависит от интенсивности разрушения горной породы, которая характеризуется при бурении углублением за один оборот. При углублении, равном нулю, когда разрушения практически не происходит, а режущие элементы перемещаются по поверхности забоя, не внедряясь в породу, коэффициент сопротивления снижается до минимума и становится равным коэффициенту трения f .

Таким образом, коэффициент трения характеризует взаимодействие коронки (резца) с породой при отсутствии разрушения и по известным данным [19] находится в пределах 0,02–0,13.

Коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$, по различным данным, изменяется в пределах 0,02–0,6 и при бурении алмазным инструментом соответствует интервалу величин 0,22–0,31 [19].

Коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$ пропорционален величине углубления инструмента в породу за оборот и механической скорости бурения $v_{\text{м}}$. Например, данные, приведенные в работе [19], свидетельствуют о наличии пропорциональной зависимости, которая выражается формулой

$$\mu_{\text{к}} = 0,135 + 0,0285 v_{\text{м}}. \quad (2)$$

При этом с увеличением частоты вращения коэффициент сопротивления $\mu_{\text{к}}$ может несколько снижаться вследствие снижения глубины резания-скалывания породы резцами, а с повышением осевой нагрузки при заглублении резцов возрастать. Механическая скорость бурения может определяться как произведение углубления за один оборот коронки на забое $h_{\text{об}}$ и частоты вращения инструмента ω : $v_{\text{м}} = h_{\text{об}} \omega$. Таким образом, если при повышении частоты вращения происходит снижение углубления за один оборот коронки на забое, то скорость бурения при этом, как правило, возрастает вследствие роста частоты вращения инструмента, что и приводит к росту коэффициента $\mu_{\text{к}}$ в соответствии с зависимостью (2). При этом рекомендуется с повышением частоты вращения ин-

струмента ω несколько повышать и осевую нагрузку на инструмент $P_{\text{ос}}$ для сохранения оптимального углубления резцов коронки за один оборот.

Наличие силы F приводит к тому, что коронка при бурении будет стремиться прижиматься к стенке скважины боковой стороной корпуса и матрицей по направлению действия этой силы. В результате коронка даже под влиянием дестабилизирующих её вращение сил и моментов сил, вызванных неравномерным разрушением анизотропной горной породы [9], будет стремиться вращаться вокруг оси скважины, сохраняя контакт со стенкой скважины своей боковой поверхностью матрицы.

Величина усилия F для определенной модели алмазной коронки будет зависеть от ширины промывочных пазов – 2. По мере увеличения ширины B данное усилие будет возрастать. В этом случае будет расти и способность коронки к нейтрализации дестабилизирующих работу коронки в анизотропных породах сил и моментов сил, вызванных неравномерным разрушением горной породы.

Для изучения особенностей механизма работы опытной коронки было проведено экспериментальное бурение на буровом стенде.

Экспериментальные исследования включали определение физико-механических свойств горной породы – долерита – и бурение данной породы импрегнированной коронкой типоразмера NQ (наружный диаметр 76,2 мм) с тонкой матрицей (8 мм) – без изменения торцевой части (КНТ), и той же коронкой, но уже с измененным торцом матрицы (КИТ). Компоновка для опытного бурения с коронкой КНТ показана на рис. 3.

Бурение осуществлялось на буровом стенде, который оборудован буровым станком СКБ-4 и буровым насосом НБ-3. Буровой станок установлен на эстакаде высотой около 2 м. Под станком оборудован приямок для размещения блока горной породы размером 0,7×0,7×0,7 м и средств закрепления блока породы. Буровой станок оборудован киловаттметром для измерения мощности на бурение и прибором для измерения механической скорости бурения типа ИСБ. Перед проведением эксперимента показания значений осевого усилия прибором бурового станка тарировались лабораторным динамометром системы Токаря ДОС грузоподъемностью 50 кН, что позволило на 5 % повысить точность измерения осевого усилия на буровую коронку.

Бурение горной породы осуществлено с применением в качестве промывочной жидкости воды и эмульсии (жидкое мыло концентрацией 0,12 %). В процессе бурения фиксировалось время бурения интервала с помощью секундомера и параллельно велась фиксация механической скорости проходки прибором ИСБ. Наряду с механической скоростью бурения фиксировались затраты мощности на бурение при различных параметрах режима. Опытное бурение планировалось и выполнялось в соответствии с методикой полного факторного эксперимента (ПФЭ) [20]. В результате эксперимента были получены достоверные данные о механиче-

ской скорости бурения, затратах мощности и энергоёмкости бурения, углублении за один оборот коронки на забое, диаметре получаемого керна и точки прилегания коронки к стенке скважины при различных значениях осевого усилия и частоты вращения. Количество подаваемой буровой жидкости в пределах эксперимента оставалось неизменным – 40 л/мин.

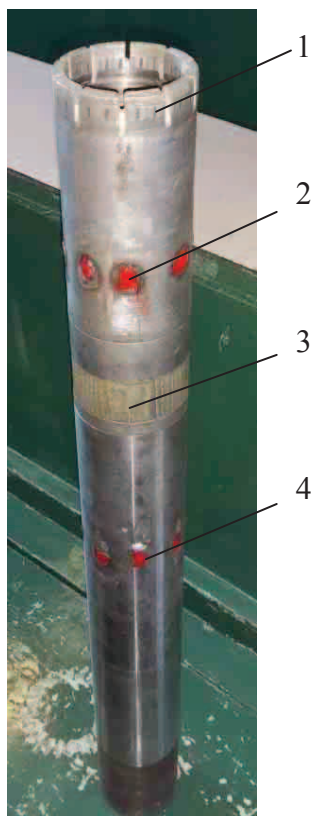


Рис. 3. Компонетка для опытного бурения: 1 – коронка; 2 – наплавки для исследования места прижатия коронки к стенке скважины; 3 – расширитель; 4 – наплавки

Fig. 3. Configuration for test drilling: 1 is the drill bit; 2 are the weldings for determining a place of a crown pressing to a well wall; 3 is the dilator; 4 are the weldings

Определение прочностных свойств горной породы

Твердость и иные свойства горных пород существенно зависят от внешней среды. Для установления влияния внешней среды на твердость горной породы проведены эксперименты на приборе УМГП-3 в соответствии со стандартной методикой (ГОСТ 12288–66) [18].

При определении механических свойств горных пород применялись цилиндрические инденторы с плоским основанием диаметром 1,8 мм. Исследуемая порода – долерит (упруго-хрупкая порода). Использовались образцы в виде кубов со стороной 40 мм. Вдавливание инденторов производилось в трёх различных средах: воздух, вода, эмульсия (жидкое мыло концентрацией 0,12 %). Методические основы данного эксперимента изложены в работе [19].

Результаты экспериментальных работ приведены в табл. 1.

Эксперимент показал, что наибольшее влияние на изменение твердости и иных свойств долерита имеет эмульсия. Под влиянием эмульсии существенно понижаются твердость $p_{ш}$, коэффициент пластичности $K_{пл}$, жесткость C , модуль упругости породы E , а также удельная контактная работа разрушения A_s , но повышается условный предел текучести p_0 .

Таблица 1. Экспериментальные зависимости свойств горных пород от воздействия среды, заданной условиями эксперимента

Table 1. Experimental dependences of rock features on the impact of the experimental medium

Среда Medium	Воздух Air	Вода Water	Эмульсия Emulsion
$p_{ш}$, МПа (MPa)	3156	2831	2438
$K_{пл}$	1,5	1,4	1,2
C , даН/мм (daN/mm)	6527,7	5373,8	4030,1
E , МПа (MPa)	36265	29855	22389
p_0 , МПа (MPa)	2117	2374	2078
A_s , Дж/м ² (J/m ²)	897	818	693

Экспериментальное исследование буримости долерита стандартной – КНТ, и опытной – КИТ, коронками выполнено в соответствии с планом полного факторного эксперимента [20] типа $N=2^k$, где N – число достаточных для получения достоверных результатов опытов; k – число учитываемых при эксперименте факторов. В качестве откликов были замерены:

- механическая скорость бурения v_m , м/ч;
- углубление за один оборот $h_{об}$, мм/об;
- энергоёмкость бурения N/v_m , кВт·ч/м;
- мощность на бурение N , кВт;
- диаметр керна d_k , мм;
- угол смещения точки контакта корпуса коронки со стенкой скважины Δ , град.

В качестве влияющих на процесс бурения факторов приняты: осевая нагрузка $P_{ос}$, которая устанавливалась равной 1000 и 1400 даН, и частота вращения ω , 435 и 710 мин⁻¹. Таким образом, число достаточных опытов N в пределах каждого эксперимента равнялось четырем. Сочетания выбранных параметров позволили устанавливать четыре режима бурения: режим 1 ($\omega=435$, мин⁻¹; $P_{ос}=1000$ даН); режим 2 ($\omega=435$, мин⁻¹; $P_{ос}=1400$ даН); режим 3 ($\omega=710$, мин⁻¹; $P_{ос}=1000$ даН); режим 4 ($\omega=710$, мин⁻¹; $P_{ос}=1400$ даН). Таким образом, в соответствии с методикой ПФЭ использованы четыре варианта сочетания параметров режима бурения, для которых получены соответствующие значения вышеуказанных откликов.

В результате обработки данных получены следующие эмпирические уравнения, отражающие основные аспекты процесса бурения долерита стандартной коронкой КНТ с применением в качестве очистного агента воды:

$$v_m = 11,08 + 1,36P_{oc} + 2,54\omega + 0,32P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,32 + 0,04P_{oc} - 0,004\omega - 0,0002P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,02 - 0,025P_{oc} - 0,13\omega - 0,01P_{oc}\omega,$$

где P_{oc} , ω – значения параметров режима бурения (факторов) в закодированном выражении (-1 – для минимальных, $+1$ – для максимальных значений параметров факторов P_{oc} и ω , в установленных плане эксперимента значениях).

При бурении коронкой КНТ с применением эмульсии получены несколько иные уравнения:

$$v_m = 11,6 + 1,99P_{oc} + 2,5\omega + 0,57P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,34 + 0,057P_{oc} - 0,009\omega - 0,0003P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,0635P_{oc} - 0,0735\omega - 0,012P_{oc}\omega.$$

Анализ полученных данных показал, что достигается очень высокая механическая скорость бурения коронкой КНТ (более 15 м/ч), которая возрастает при применении эмульсии. На формирование скорости бурения оказывает более высокое влияние частота вращения, что вполне характерно для бурения алмазным буровым инструментом. Соответственно достигается высокое углубление инструмента за один оборот, которое выше при бурении с применением эмульсии. Повышение осевой нагрузки приводит к росту углубления за один оборот, а рост частоты вращения без повышения осевой нагрузки – к снижению углубления за оборот коронки на забое. В целом процесс характеризуется объемным разрушением породы на всем интервале применяемых параметров режима бурения. Уравнение энергоёмкости разрушения показывает – с повышением параметров режима бурения достигается столь высокая механическая скорость, что энергоёмкость бурения снижается, достигая минимальных значений именно при максимальных параметрах режима бурения.

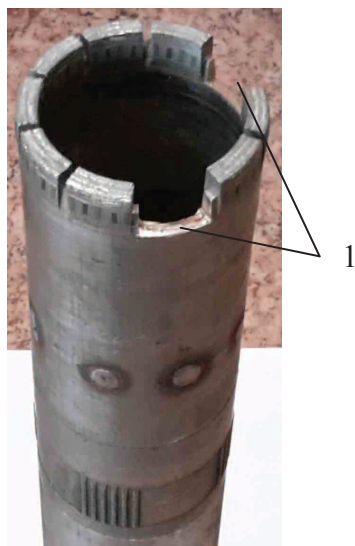


Рис. 4. Опытная коронка КИТ: 1 – широкие промывочные каналы, полученные путем удаления двух алмазосодержащих секторов

Fig. 4. Test crown: 1 are the wide flushing channels obtained by removing two diamond-bearing sectors

После проведения эксперимента с коронкой КНТ конструкция матрицы данной коронки была изменена, а именно удалено два рабочих алмазосодержащих сектора (рис. 4). Данная коронка получила условное название КИТ. Коронкой КИТ осуществлено бурение долерита при использовании тех же параметров режима бурения с целью сравнения результатов бурения коронками КНТ и КИТ. В результате получены следующие эмпирические уравнения при использовании в качестве очистного агента воды:

$$v_m = 12,08 + 2,12P_{oc} + 2,49\omega + 0,45P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,355 + 0,062P_{oc} - 0,013\omega - 0,002P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,083P_{oc} - 0,1\omega + 0,012P_{oc}\omega.$$

При бурении с применением эмульсии получены иные уравнения:

$$v_m = 12,32 + 2,48P_{oc} + 2,54\omega + 0,66P_{oc}\omega;$$

$$h_{об} = 0,36 + 0,072P_{oc} - 0,013\omega - 0,0021P_{oc}\omega;$$

$$N/v_m = 1,0 - 0,078P_{oc} - 0,103\omega + 0,003P_{oc}\omega.$$

В целом характер работы алмазной коронки после удаления секторов – 1 (рис. 4) не изменился. Механическая скорость бурения увеличилась, повысилась углубление за один оборот коронки на забое, энергоёмкость бурения изменилась незначительно, что указывает на такие условия бурения, которые не могут привести к снижению ресурса бурового инструмента. В то же время результаты эксперимента указывают на то, что затраты мощности на бурение опытной коронкой несколько увеличались. Действительно, если сравнить показания киловаттметра по измерению затрат мощности на бурение и обработать эти данные в соответствии с методикой полного факторного эксперимента, то можно получить следующие уравнения бурения долерита коронкой КИТ (неизменная форма торца) для условий бурения с водой:

$$N = 10,9 + 0,025P_{oc} + 1,125\omega - 0,025P_{oc}\omega$$

и эмульсией:

$$N = 11,15 + 1,18P_{oc} + 1,58\omega + 0,125P_{oc}\omega.$$

Для коронки с измененной формой торца (КИТ) аналогичные уравнения имеют следующий вид:

$$N = 11,73 + 1,125P_{oc} + 1,275\omega + 0,175P_{oc}\omega;$$

$$N = 12,0 + 1,5P_{oc} + 1,25\omega + 0,25P_{oc}\omega.$$

Первое из приведенных выше уравнений получено по данным бурения с применением в качестве очистного агента воды, второе – эмульсии.

Из данных уравнений в соответствии со значениями коэффициентов при факторах P_{oc} и ω следует, что при бурении коронкой КНТ с применением воды основное влияние на затраты мощности оказывает частота вращения, но при бурении с применением эмульсии различие между влиянием осевого усилия и частоты вращения сглаживается, хотя по-прежнему преобладает влияние частоты вращения. Последнее связано с тем, что применение эмульсии снижает твердость горных пород на забое скважины и роль осевого усилия при разрушении долерита возрастает. При этом энергоёмкость бурения при использовании эмульсии выше (в среднем на 2,2 %).

Бурение опытной коронкой КИТ показало рост энергоёмкости на бурение в сравнении с коронкой КНТ в среднем на 7,6 % как при бурении с водой, так и при бурении с эмульсией. Бурение с переходом с воды на эмульсию увеличило энергоёмкость на 2,3 %, что аналогично такому же показателю для коронки КНТ. При этом данные эксперимента показали, что различие в затратах мощности ΔN

на бурение стандартной и опытной коронками возрастает с повышением как осевого усилия, так и частоты вращения. По имеющимся данным получены уравнения влияния основных факторов – осевого усилия и частоты вращения на разность затрат мощности (ΔN) при бурении коронкой КИТ в сравнении с затратами мощности на бурение коронкой КНТ.

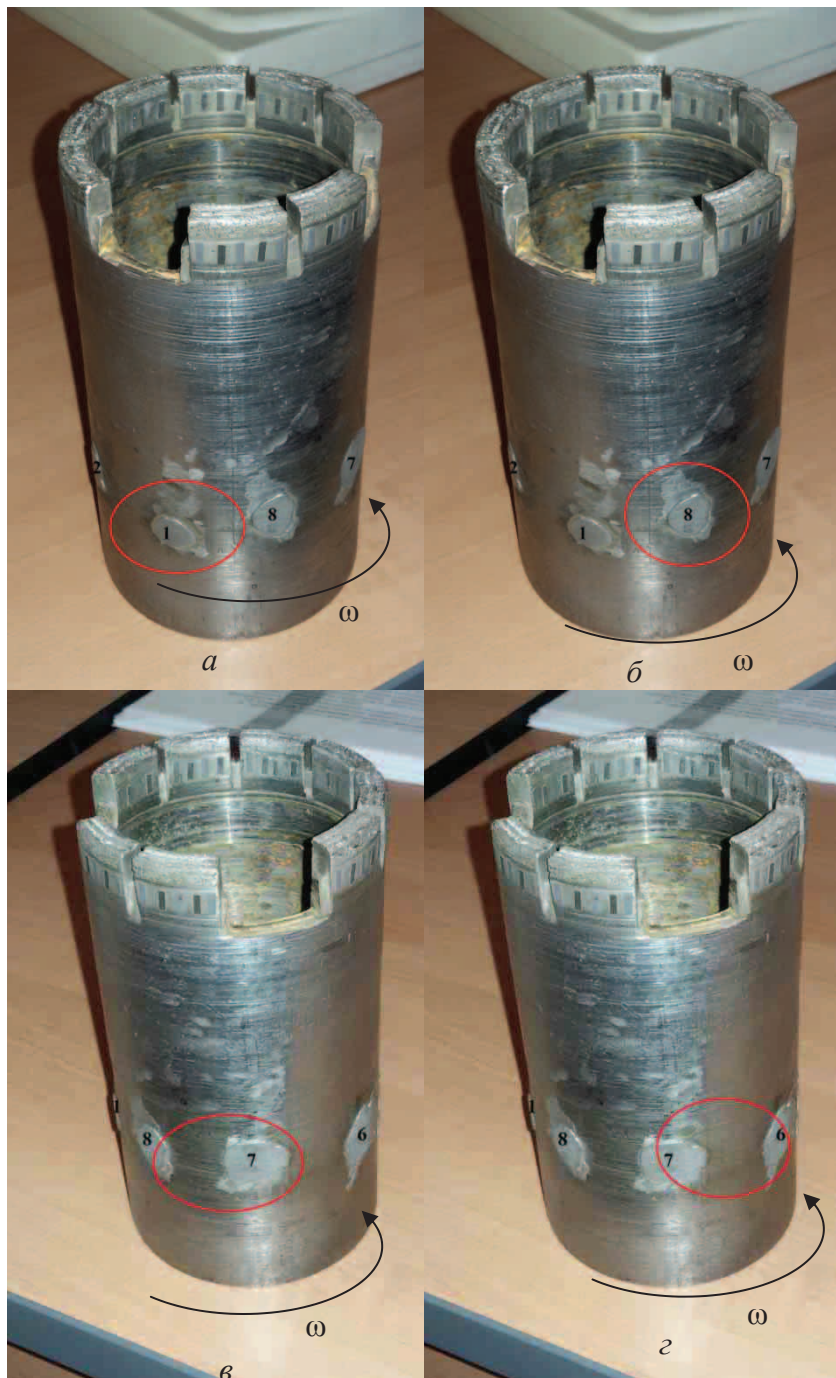


Рис. 5. Пятна контакта корпуса буровой коронки со стенкой скважины при бурении в условиях эксперимента. Режим бурения: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4 (табл. 2 и 3); стрелкой показано направление вращения коронки

Fig. 5. Spots of a drill bit case contact with a well wall when drilling in experimental conditions. Drilling mode: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4 (table 2 and 3); a drill bit rotation direction is marked with an arrow

При бурении с водой уравнение имеет следующий вид:

$$\Delta N = 0,85 + 0,1P_{oc} + 0,15\omega + 0,2P_{oc}\omega.$$

При бурении с эмульсией уравнение выглядит иначе:

$$\Delta N = 0,68 + 0,33P_{oc} - 0,325\omega + 0,125P_{oc}\omega.$$

Анализ вышеприведенных уравнений показывает, что если в первом случае разность затрат мощности при бурении коронкой КИТ в сравнении с бурением коронкой КНТ связана как с влиянием осевого усилия и частоты вращения, при опережающем влиянии именно второго фактора, то при бурении с эмульсией основной рост вызван именно влиянием осевой нагрузки, а рост частоты вращения приводит к противоположному действию – затраты мощности на бурение под влиянием растущей частоты вращения стали снижаться. Данный результат можно объяснить только снижением твердости горных пород на забое скважины и повышением глубины внедрения резцов в породу, что проявилось в повышении роли осевого усилия и в снижении сил трения коронки о забой и стенку скважины. В результате, видимо, изменился режим работы коронки и снизились силы её прижатия к стенке скважины.

Исследование износа керна, полученного при бурении коронками КНТ и КИТ, показало следующее:

- керн, полученный при бурении стандартной коронкой и при использовании в качестве очистного агента воды, имеет диаметр 61,25 мм, а при бурении с эмульсией – 61,4 мм;
- керн, полученный при бурении опытной коронкой и при использовании в качестве очистного агента воды, имеет диаметр 60,0 мм, а при бурении с эмульсией – 61,25 мм.

Таким образом, отмечено снижение диаметра керна при бурении опытной коронкой, что указывает на режим бокового фрезерования керна. Очевидно, что некоторое расширение получил и ствол скважины при бурении коронкой КИТ.

Построение эмпирического уравнения с учетом влияния факторов позволило отметить уровень влияния осевого усилия и частоты вращения коронки на диаметр керна:

$$d_k = 61,025 - 0,025P_{oc} - 0,05\omega.$$

В данном случае отмечается более существенное влияние на уменьшение диаметра керна (на фрезерующую способность коронки) частоты вращения (в 2 раза), что предопределено более значительным влиянием этого фактора на μ_k – коэффициент сопротивления резанию-скалыванию породы, и соответственно величину дисбалансной силы F (формула (1)).

С целью уточнения механизма работы алмазной коронки типа КИТ проведены наблюдения износа боковой наружной поверхности коронки. В данном случае ставилась задача определить место контакта боковой поверхности и матрицы коронки со стенкой скважины и перемещение точки

контакта при изменении параметров режима бурения. Для решения поставленной задачи на корпусе коронки были сделаны 8 наплавов методом сварки размером примерно 1,5×1,5 см (рис. 3, позиция 2; рис. 5). Наплавки выступали за пределы корпуса коронки на величину не большую, чем радиальный зазор (половина диаметров матрицы и корпуса коронки). Пятно контакта буровой коронки со стенкой скважины можно выявить по максимальному значению износа наплавов.

Результаты измерений толщины каждой наплавки прибором БВ-2027 указаны в табл. 2.

Таблица 2. Результаты измерений высоты наплавов на корпусе коронки КИТ

Table 2. Results of measuring welding height on the case of KIT bit

№ наплавки на корпусе коронки Welding on a bit case	Исходный размер, мм Original size, mm	Режим бурения/Drilling mode			
		1	2	3	4
		$\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$	$\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$	$\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$	$\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$
1	0,773	0,631	0,537	0,521	0,498
2	0,701	0,628	0,597	0,564	0,532
3	0,532	0,5	0,456	0,452	0,429
4	0,582	0,543	0,54	0,506	0,456
5	0,432	0,43	0,427	0,423	0,403
6	0,547	0,517	0,497	0,488	0,387
7	0,863	0,82	0,748	0,614	0,503
8	0,698	0,614	0,497	0,389	0,351

Таблица 3. Величины износа наплавов на корпусе коронки КИТ

Table 3. Rates of welding wear on a KIT bit case

№ наплавки на корпусе коронки Welding on a bit case	Величина износа наплавов на корпусе коронки, мм Rate of welding wear on a bit case, mm			
	Режим бурения/Drilling mode			
	1	2	3	4
	$\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$	$\omega=435 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$	$\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1000 \text{ даН}$	$\omega=710 \text{ мин}^{-1}; P_{oc}=1400 \text{ даН}$
1	0,142	0,094	0,016	0,02
2	0,073	0,031	0,033	0,003
3	0,032	0,044	0,004	0,023
4	0,039	0,003	0,105	0,025
5	0,002	0,003	0,004	0,002
6	0,03	0,02	0,009	0,101
7	0,043	0,072	0,134	0,111
8	0,084	0,117	0,108	0,038

Величины износа наплавов на буровой коронке на каждом этапе экспериментальных исследований представлены в табл. 3. Максимальные значения износа наплавов на корпусе коронки выделены жирным шрифтом. Анализ результатов экспериментов показал, что место контакта матрицы и корпуса коронки КИТ со стенкой скважины наблюдается со стороны удаленных секторов матрицы. При этом если при минимальных значениях осевого усилия и частоты вращения (режим 1) точ-

ка прилегания коронки совпадает с наплавкой (контрольная точка) № 1, то по мере повышения частоты вращения и осевого усилия точка контакта перемещается по направлению вращения коронки от наплавки № 1 к наплавке № 8 и далее к наплавкам № 7 и 6 (рис. 5, 6).

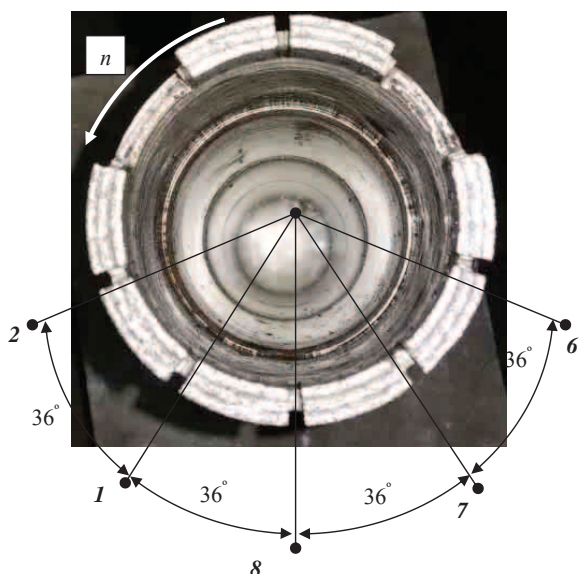


Рис. 6. Торцевая часть опытной коронки КИТ: 1, 2, 6, 7, 8 – номера наплавки на корпусе коронки, получившие максимальный износ в процессе эксперимента; n – направление вращения коронки при бурении

Fig. 6. Face part of the test bit: 1, 2, 6, 7, 8 are the weldings on the bit case which have maximum wear in the course of the experiment; n is the direction of the bit rotation when drilling

Обработка данных эксперимента по изучению влияния параметров режима бурения на миграцию точки контакта осуществлена с использованием полного факторного эксперимента, аналогичного при исследовании буримости долерита базовой и опытной коронками. В качестве отклика принят угол смещения пятна контакта Δ . За начало отсчета угла Δ принято положение наплавки № 2, которое совпадает с краем первого по направлению вращения широкого промывочного канала. Влияющими на угол Δ факторами остались действующие в условиях эксперимента осевая нагрузка P_{oc} и частота вращения ω . В результате обработки данных получено уравнение зависимости угла смещения точки контакта матрицы и корпуса коронки от параметров режима бурения:

$$\Delta = 81,5 + 13,5P_{oc} + 28,5\omega - 3,5P_{oc}\omega. \quad (3)$$

Эмпирическая модель (3) указывает на то, что влияние частоты вращения на смещение пятна контакта более чем в два раза значительнее в сравнении с влиянием осевого усилия. При этом полученный результат полностью соответствует данным о влиянии параметров режима бурения на изнашивание керна и указывает, прежде всего, на повышение дисбаланса сил сопротивления резанию-скалыванию породы резцами буровой коронки КИТ, что приводит к повышению силы прижатия матрицы и корпуса коронки к стенке скважины и к провороту коронки под действием изменяющихся внешних сил резания-скалывания породы и прижатия к стенке скважины.

Опытные работы показали, что предлагаемая коронка и без усиления алмазосодержащих секторов – 4 (рис. 1) показывает высокую работоспособность, а результаты испытаний позволяют выполнить дополнительные усовершенствования конструкции новой коронки. При этом выявлен механизм работы опытной коронки и в целом подтверждены результаты теоретического анализа.

Выводы

1. Опытная коронка, разработанная для условий бурения скважин в твердых анизотропных горных породах, в условиях экспериментального бурения показала свою высокую работоспособность.
2. Полученные результаты экспериментальных работ подтвердили ранее выполненный теоретический анализ о возможности изменения динамики буровой коронки и позволили уточнить механизм работы опытной коронки при применении различных параметров режима бурения с использованием в качестве очистного агента как воды, так и эмульсии.
3. Установлена важная зависимость изменения точки прилегания коронки к стенке скважины при варьировании параметрами режима бурения, что позволяет провести более точное усиление бокового вооружения коронки для изменения её фрезерующей способности.
4. Новые данные о механизме работы коронки будут использоваться для усовершенствования конструкции опытного образца коронки, что позволит получить более совершенный буровой инструмент для колонкового бурения твердых анизотропных горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 240 с.
2. Боярко Ю.Л. Борьба с искривлением скважин. – Томск: Изд-во ТПИ, 1969. – 110 с.
3. Калинин А.Г. Искривление скважин. – М.: Недра, 1974. – 294 с.
4. Bredley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction // Oil and gas J. – 1975. – V. 73. – № 31. – P. 77–80.
5. Морозов Ю.Т. Бурение направленных и многоствольных скважин малого диаметра. – М.: Недра, 1976. – 211 с.
6. Колесников А.Е. Механизм искривления скважин. – Орджоникидзе, 1983. – 48 с. – Деп. В ЦНИИЭИцветмет 01.11.83, № 1080 цм – Д83.
7. Боголюбский К.А., Зиненко В.П., Кирсанов А.Н. Процесс естественного искривления скважин вращательного бурения в анизотропной среде // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 110–116.
8. Зиненко В.П. Направленное бурение. – М.: Недра, 1990. – 152 с.
9. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 328 с.
10. Кривошеев В.В. Алмазная буровая коронка. Авторское свидетельство СССР № 162090, опубл. 15.01.91, Бюл. 17.
11. Карпиков А.В. Научно-методические основы управления интенсивностью естественного искривления скважин: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2002. 179 с.
12. Будюков Ю.Е., Власюк В.И., Спиринов В.И. Алмазный инструмент для бурения направленных и многоствольных скважин. – Тула: Изд-во ЗАО «Гриф и К», 2007. – 176 с.
13. Буровой инструмент / Б.В. Алешин, А.М. Никаноров, А.А. Черных и др. Авторское свидетельство СССР № 1752915. Опубл. 07.08.92. Бюл. 25.
14. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. – Л.: Машиностроение, 1971. – 135 с.
15. Алмазная коронка для компоновки бурового снаряда: пат. Рос. Федерация № 2078193; заявл. 21.07.93; опубл. 27.04.97, Бюл. № 16.
16. Буровая алмазная коронка: пат. Рос. Федерация № 2167261; заявл. 16.03.00; опубл. 20.05.01, Бюл. № 14.
17. Буровой инструмент: пат. Рос. Федерация № 2246603; заявл. 12.08.03; опубл. 20.02.05, Бюл. № 7.
18. Алмазная коронка для бурения: пат. Рос. Федерация № 148333; заявл. 05.08.14; опубл. 10.12.14, Бюл. № 46.
19. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – 328 с.
20. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

Поступила 13.01.2015 г.

UDC 622.243

DEVELOPMENT AND PILOT STUDIES OF THE FEATURES OF A DIAMOND DRILL CROWN OPERATION WHEN DRILLING IN SOLID ANISOTROPIC ROCKS

Vyacheslav V. Neskoromnykh,

Siberian Federal University, 95, Gazeta Kranoyarsky Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia. E-mail: sovair@bk.ru

Pavel G. Petenev,

Siberian Federal University, 95, Gazeta Kranoyarsky Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia. E-mail: pavel-whait@mail.ru

Alexander L. Neverov,

Siberian Federal University, 95, Gazeta Kranoyarsky Rabochii Avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia. E-mail: neveroff_man@mail.ru

Pavel S. Pushmin,

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 683074, Russia. E-mail: pps@istu.edu

Grigory R. Romanov,

Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov street, Irkutsk, 683074, Russia. E-mail: grom123456@mail.ru

Relevance of work is caused by the need to solve the problem of increasing the efficiency of drilling deep wells in solid anisotropic rocks.

The aim of the research is to study and develop a new model of a diamond drill bit for effective drilling of solid anisotropic rocks.

Research methods: analytical researches and experimental works in evaluating the productivity of a new diamond crown at the boring stand.

Results. The authors have developed the model of the new diamond crown which allows implementing the effective drilling of anisotropic rocks. The paper introduces the data of the analytical analysis and technique of experimental works at the boring stand. The authors carried out the test drilling with a new crown that demonstrated the features of mechanics of the test crown operation. This allows improving the design of the boring tool. The regularities of influence of drilling mode parameters on the character and intensity of crown wear, mechanical speed of drilling, power consumption of drilling were determined.

Conclusions. *The test crown developed for conditions of wells drilling in solid anisotropic rocks, in the conditions of experimental drilling showed its high performance. The obtained results of the experimental works confirmed the analysis and allowed specifying the mechanism of the test crown operation at various parameters of drilling mode applying different clearing agents such as water and emulsion. New data on the mechanism of a crown operation will be used for improving a crown pilot sample design that will allow obtaining more perfect boring tool for core-drilling of solid anisotropic rocks.*

Key words:

Rock, drilling, experiment, diamond crown, destruction.

REFERENCES

1. Krivocheev V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh* [Curvature of wells in anisotropic rocks]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 240 p.
2. Boyarko Ya.L. *Borba s iskrivleniem skvazhin* [Fight against a curvature of wells]. Tomsk, TPI Publ., 1969. 110 p.
3. Kalinin A.G. *Iskrivlenie skvazhin* [Curvature of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 294 p.
4. Bradley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction. *Oil and gas J.*, 1975, vol. 73, no. 31, pp. 77–80.
5. Morozov Yu.T. *Burenie napravlennykh skvazhin i mnogostvolnykh skvazhin malogo diametra* [Drilling of the directional wells and multilayer wells of small diameter]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 211 p.
6. Kolesnikov A.E. *Mekhanizm skrivleniya skvazhin* [Mechanism of a well curvature]. Ordzhonikidze, 1983. 48 p. Dep. v TSNIIEIzhvetmet 01.11.83, no. 1080 zhm – D83.
7. Bogolyubskiy K.A., Zinenko V.P., Kirsanov A.N. Protseess estestvennogo iskrivleniya skvazhin vrashchatelnogo burenia v anizotropnoy srede [Well natural curvature of rotary drilling in anisotropic environment]. *Izvestiy vuzov. Geologiya i razvedka*, 1974, no. 3, pp. 110–116.
8. Zinenko V.P. *Napravlennoe burenie* [The directed drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 152 p.
9. Neskromnykh V.V. *Napravlennoe burenie i osnovy kernometrii* [The directed drilling and bases of core orient]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 328 p.
10. Krivocheev V.V. *Almaznaya burovaya koronka* [Diamond drill bit]. The author certificate of the USSR, no. 162090, 1991.
11. Karpikov A.V. *Nauchno-metodicheskie osnovy upravleniya intensivnostiyu estestvennogo iskrivleniya skvazhin. Dis. Kand. nauk* [Scientific and methodical bases of management of a well natural curvature intensity. Cand. Diss.]. St. Petersburg, 2002. 179 p.
12. Budyukov Yu.E., Vlasjuk V.I., Spirin V.I. *Almazny instrument dlya bureniya napravlennykh i mnogostvolnykh skvazhin* [The diamond tool for drilling the directional and multilayered wells]. Tula, Publ. house of JSC Grif i C°, 2007. 176 p.
13. Aleshin B.V., Nikanorov A.M., Chernykh A.A. *Burovoy instrument* [Boring tool]. Author certificate of the USSR, no. 1752915, 1992.
14. Troitzky N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 135 p.
15. Kozlovsky E.A., Buglov N.A., Novozhilov B.A. *Almaznaya koronka dlya komponovki burovogo snaryada* [A diamond bit for configuration of a boring shell]. Patent RF, no. 2078193, 1997.
16. Neskromnykh V.V., Bolshakov V.V., Kostin Yu.S. *Almaznaya burovaya koronka* [Drill diamond bit]. Patent RF, no. 2167261, 2001.
17. Neskromnykh V.V., Purevsuren R. *Burovoy instrument* [Boring tool]. Patent RF, no. 2246603, 2005.
18. Spirin V.I., Budyukov Yu.E., Neskromnykh V.V. *Almaznaya koronka dlya burenia* [Diamond bit for drilling]. Patent RF, no. 148333, 2014.
19. Neskromnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri bureanii skvazhin* [Destruction of rocks when drilling wells]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 328 p.
20. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning the experiment by searching the optimum conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p.

Received: 13 January 2015.