

УДК 622.24.051

## РАЗРАБОТКА АЛМАЗНОГО БУРОВОГО ДОЛОТА ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ

Нескоромных Вячеслав Васильевич<sup>1</sup>,  
sovair@bk.ru

Петенёв Павел Геннадьевич<sup>1</sup>,  
pavel-whait@mail.ru

Лысаков Дмитрий Викторович<sup>1</sup>,  
lysackovd@yandex.ru

Попова Марина Сергеевна<sup>1</sup>,  
alleniram83@mail.ru

Головченко Антон Евгеньевич<sup>1</sup>,  
antong77@yandex.ru

Лиу Баочанг<sup>2</sup>,  
liubc@jlu.edu.cn

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660095, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

<sup>2</sup> Университет Цзилинь,  
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

**Актуальность.** Многолетний опыт работ по направленному бурению позволил выявить сложные горно-геологические условия, в которых использование отклонителей приводит к снижению результативности искривления и авариям. Так, например, раскрепление отклонителей непрерывного действия в твердых, очень твердых и абразивных горных породах, когда диаметр скважины имеет минимальную разработанность по диаметру, приводит к заклиниванию породоразрушающего инструмента. В этом случае повысить эффективность работы отклонителей сложно в связи с отсутствием специальных технических средств и эффективных технологий искривления скважин, что делает проблему снижения эффективности работы отклонителей актуальной и требующей решения.

**Цель:** поиск и анализ причин заклинивания отклонителей ассиметричного и комбинированного типов при постановке и раскреплении в скважинах, пробуренных в твердых горных породах, разработка конструкции алмазного бурового долота со специальной схемой расположения бокового и торцевого вооружения и оценка влияния эксцентриситета режущей части бурового инструмента на эффективность проработки ствола скважины по диаметру.

**Объект:** эксцентриситет режущей части бурового инструмента.

**Методы:** сбор, анализ и обобщение данных из литературных источников, аналитическое исследование и экспериментальные опытные работы.

**Результаты.** Описаны причины, вызывающие заклинивание отклонителя в скважине, представлены существующие технологии, позволяющие решить проблему заклинивания долота при раскреплении отклонителя, разработана конструкция алмазного бурового долота со специальной схемой размещения торцевого и бокового вооружения и описан принцип работы, проведена оценка влияния эксцентриситета режущей части на процесс проработки скважины по диаметру, и установлен факт повышения фрезерующей способности долота.

### Ключевые слова:

Бурение, искусственное искривление скважины, отклонитель, фрезерование, эксцентриситет, долото.

### Введение

При бурении в твердых горных породах применение отклонителей непрерывного действия (ОНД) ассиметричного и комбинированного типа затруднено проблемой заклинивания породоразрушающего инструмента (ПРИ), проявляющегося в процессе раскрепления устройства.

Как правило, такое явление прежде всего связано с тем, что в твердых и очень твердых горных породах вследствие повышенного износа торцевого и бокового вооружения алмазного инструмента не соблюдается проектный диаметр скважины. В интервалах, пробуренных изношенным инструментом, скважина по-

лучает некоторое заужение, что отражается на работе снаряда на забое [1–3].

Если не проводить мер по контролю диаметра породоразрушающего инструмента, то спуск и раскрепление ОНД в зауженном интервале скважины может привести к сложной аварийной ситуации, вызванной заклиниванием породоразрушающего инструмента при его перекосе. В то же время даже при соблюдении номинального диаметра скважины при закреплении ОНД может произойти защемление долота, что связано с необходимостью перекоса породоразрушающего инструмента при постановке ОНД на забой в рабочем положении.

Передача крутящего момента на защемленное долото приводит к повышенной деформации вала отклонителя. А в случае, когда сила зацепления фрезерующего вооружения с горной породой выше, чем сила зацепления распорного устройства со стенкой скважины, происходит проворот корпуса отклонителя и нарушение ориентации снаряда. В некоторых ситуациях, когда силы зацепления долота и распорного механизма очень сильны и их величина примерно равна, может произойти поломка вала отклонителя.

Существующие типы отклонителей можно разделить на две основные группы, включающие отклонители ассиметричного и фрезерующего типа.

Интенсивность набора кривизны отклонителей ассиметричного типа можно представить в виде выражения [4–6]:

$$i_a = \frac{57,3(D_c - d_k)}{l^2},$$

где  $D_c$  – диаметр скважины, м;  $d_k$  – диаметр корпуса ОНД в месте контакта со стенкой скважины при перекосе, м;  $l$  – расстояние от забоя до точки контакта корпуса ОНД со стенкой скважины при перекосе нижней части отклонителя, м.

Интенсивность набора кривизны отклонителей ассиметричного типа напрямую зависит от величины наклона породоразрушающего инструмента относительно оси скважины (обычно угол наклона не превышает 1–2 град).

Для определения интенсивности набора кривизны отклонителем непрерывного действия фрезерующего типа может быть использована следующая зависимость [7–9]:

$$i_\phi = \frac{57,3 \cdot v_\phi}{v_b \cdot L_{ж}},$$

где  $v_\phi$ ,  $v_b$  – скорости фрезерования стенки скважины под действием отклоняющего усилия и углубки забоя, м/ч;  $L_{ж}$  – длина жесткой базы отклонителя, м.

Отклонители фрезерующего типа имеют иной принцип работы. Считается, что для этих отклонителей характерно отсутствие перекоса породоразрушающего инструмента на забое в связи с тем, что набор кривизны осуществляется за счет создания отклоняющего усилия, под действием которого долото прижимается к стенке скважины и осуществляет ее фрезерование боковым вооружением. Это суждение не совсем верно, в первую очередь, в связи с тем, что существуют конструкции отклонителей, например, конструкция ТЗ-3, которые способны выполнять набор кривизны за счет одновременного фрезерования стенки скважины и ассиметричного разрушения забоя. При создании отклоняющего усилия, после прижатия бокового вооружения долота к стенке скважины происходит некоторый прогиб вала отклонителя, что приводит к наклону долота на забой.

Проведенное графо-аналитическое исследование позволило установить, что при наклоне долота на 1, 2 и 3 градуса диаметр его матрицы в плоскости, перпендикулярной оси скважины, увеличивается с 76 до 76,43; 76,71 и 77,06 мм соответственно, что в услови-

ях зауженного ствола скважины, когда зазор между боковым вооружением долота и стенкой скважины минимален, приводит к тому, что размер сечения долота при наклоне начинает превышать диаметр скважины и происходит заклинивание.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что для работы и тех и других видов отклонителей требуется наличие наклона породоразрушающего инструмента. Таким образом, проблема заклинивания породоразрушающего инструмента в зауженном интервале скважины характерна для всех конструкций отклонителей непрерывного действия ассиметричного типа и некоторых конструкций отклонителей фрезерующего типа.

#### **Разработка алмазного бурового инструмента для проработки скважины по диаметру в твердых и очень твердых горных породах**

Самым простым и доступным способом решения проблемы заклинивания отклонителя в стволе скважины является контроль диаметра породоразрушающего инструмента и своевременная его замена в процессе бурения [10].

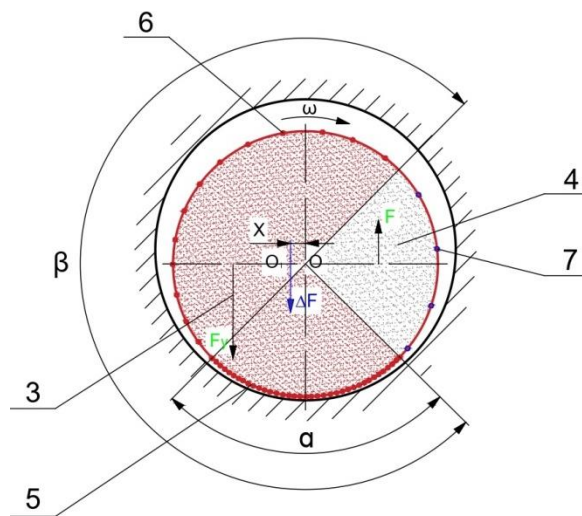
В условиях очень твердых горных пород, когда даже при бурении новым породоразрушающим инструментом стенки скважины минимально разработаны по диаметру, для успешного раскрепления ОНД выполняют подготовку ствола таким образом, чтобы оно имело возможность свободного перекоса. С этой целью производят расширение диаметра скважины на высоту 5–10 см над забоем.

Следует отметить, что подготовка скважины должна осуществляться породоразрушающим инструментом, форма торцевой части которого аналогична инструменту, который планируется использовать в составе отклонителя при искривлении. При этом идеальным условием подготовки является использование одного и того же инструмента для проработки и искривления скважины.

Проведенные в Иркутском политехническом институте исследования позволили установить, что для расширения ствола скважины может использоваться долото двухшарошечное ассиметричное (ДДА). Конструктивной особенностью ДДА является ассиметрия размеров шарошек. Такая геометрическая специфика обеспечивает неравную площадь опоры вооружения долота на забой. Это значит, что долото в процессе работы находится в состоянии некоторого перекоса и под действием изгибающего момента прижимается к стенке скважины лапой шарошки, имеющей больший размер. В результате реализуется возможность на малом интервале бурения при приложении повышенной осевой нагрузки разработать диаметр скважины на 1–2 мм. [11].

Несмотря на способность вести достаточно эффективную проработку ствола скважины, использование ДДА в твердых и очень твердых горных породах приводит к снижению ресурса до 1–3 м и со временем к потере фрезерующей функции [12]. К тому же, работа долота в наклоненном относительно оси скважины состоянии приводит к тому, что буровая компоновка всегда деформирована. Такое рабочее положение

снаряда увеличивает нагрузки на резьбовые соединения, что может привести к их усталостному разрушению [13, 14].



**Рис. 1.** Торцевая часть алмазосодержащей матрицы долота со специальной схемой размещения вооружения: 3 – участок долота, имеющий стандартное насыщение алмазными резцами; 4 – участок долота, имеющий насыщение алмазными резцами меньше стандартного; 5 – фрезерующее вооружение, имеющее повышенное насыщение алмазными резцами; 6 – фрезерующее вооружение, имеющее стандартное насыщение резцами; 7 – фрезерующее вооружение, имеющее насыщение меньше стандартного;  $\alpha$  – угол, обозначающий зону усиленного фрезерующего вооружения;  $\beta$  – угол, обозначающий зону фрезерующего вооружения со стандартной насыщенностью

**Fig. 1.** End part of a diamond-containing matrix of a bit with a special arrangement of the cutting structure: 3 – section of a bit with a standard saturation with diamond cutters; 4 – section of a bit with a saturation of diamond cutters less than the standard one; 5 – milling cutter with an increased saturation with diamond cutters; 6 – milling cutter having a standard saturation with cutters; 7 – milling cutters with a saturation less than standard;  $\alpha$  – angle denoting the zone of a reinforced milling cutter;  $\beta$  – angle denoting a zone of a milling cutter with a standard saturation

В связи с этим актуальным является вопрос создания такого бурового инструмента, которое при бурении не будет иметь недостатков, характерных для ДДА, при этом позволит также эффективно выполнять проработку зауженного ствола скважины.

В результате научных исследований была разработана и впоследствии запатентована конструкция алмазного долота, матрица которого условно разделена на основную – 3 и дополнительную части – 4 (рис. 1). При этом основная часть – 3 алмазной матрицы имеет стандартное насыщение алмазами и ограничена углом  $\beta$ , а дополнительная часть – 4 имеет меньшее насыщение алмазами.

Матрица долота по периметру имеет боковое фрезерующее вооружение, которое также обладает неравномерным насыщением алмазами и может быть разделено на три части: часть стандартного вооружения – 6, усиленного – 5, обладающего большей насыщенностью алмазными резцами, и часть, имеющая меньшую насыщенность алмазами – 7. При этом усиленная (наиболее насыщенная алмазами) часть бокового вооружения ограничена углом  $\alpha$ .

Для расчетов насыщенности алмазами участков долота используется следующая зависимость [15]:

$$N = \frac{V_a}{V_m} \cdot 100 \%,$$

где  $N$  – насыщенность алмазами матрицы;  $V_a$  – объем алмазов в матрице,  $\text{см}^3$ ;  $V_m$  – объем матрицы,  $\text{см}^2$ .

Как известно, насыщенность матрицы в основном зависит от зернистости алмазов. В современных однослойных и импрегнированных матрицах этот показатель варьируется в пределах от 10 до 1200 шт/карат. При изготовлении бурового инструмента на выбор степени зернистости и насыщенности матрицы, как правило, оказывает влияние твердость планируемых к разрушению горных пород.

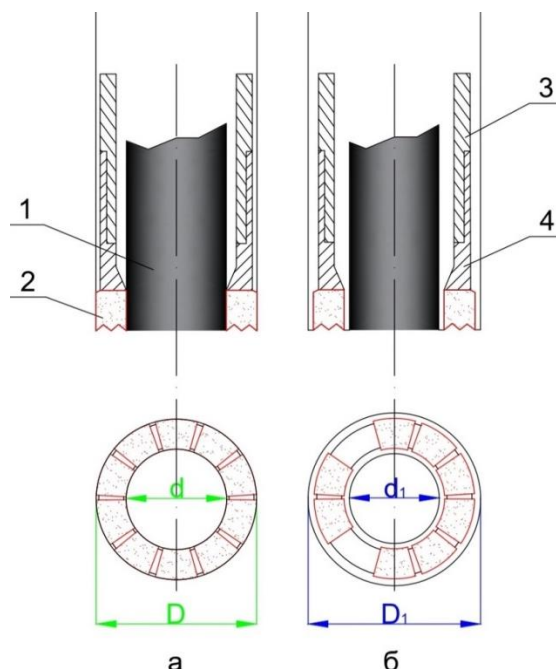
Разрушение горных пород долотом осуществляется за счет приложения осевого усилия и крутящего момента, которое воспримается от вышенаходящейся буровой колонны (рис. 1). В связи с тем, что торец матрицы разделен на участки с различной насыщенностью алмазными резцами, в процессе работы возникает неуравновешенность реакций сил резания – скалывания породы резцами  $F$  и  $F_y$ , вследствие чего появляется равнодействующая сил резания – скалывания  $\Delta F$ , которая смещена от геометрической оси торца долота  $O$  на некоторое расстояние  $X$ . В этом случае точка  $O_1$  становится центром мгновенного вращения долота. В результате такого распределения сил долото начинает вращаться, прижавшись к стенке скважины основным фрезерующим вооружением, активно прорабатывая стенку скважины [16].

Таким образом, за счет наличия эксцентриситета режущей части торца алмазосодержащей матрицы осуществляется расширение и проработка ствола скважины алмазным долотом полученной конструкции.

#### Оценка влияния эксцентриситета режущей части алмазного бурового долота на способность прорабатывать зауженный ствол скважины

Влияние эксцентриситета режущей части торца матрицы алмазного долота на фрезерующую способность может быть оценено через потерю диаметра керна при бурении породоразрушающим инструментом с неравномерным насыщением алмазами режущей части торца матрицы. В этом случае разность величины диаметра керна, полученного породоразрушающим инструментом с эксцентриситетом  $d_1$ , и диаметра керна, полученного при бурении стандартным породоразрушающим инструментом  $d$ , будет свидетельствовать о степени фрезеровании стенки скважины (рис. 2).

Для определения фрезерующей способности алмазного породоразрушающего инструмента были проведены исследования на буровом стенде. В состав сконструированного под эту задачу стенда входил станок СКБ-4, буровой насос НБ-3, зумпф и средства для установки и фиксирования блока горной породы [17, 18].



**Рис. 2.** Процесс бурения скважины стандартным породоразрушающим инструментом (а) и специальным инструментом с удаленными секторами матрицы (б): 1 – керн; 2 – алмазосодержащая матрица; 3 – расширитель; 4 – корпус алмазной коронки;  $d$  и  $d_1$  – диаметры керна, пробуренные стандартным инструментом и инструментом, имеющим эксцентриситет;  $D$  и  $D_1$  – диаметры скважины, пробуренные стандартным инструментом и инструментом с эксцентриситетом

**Fig. 2.** Drilling a well with a standard rock cutting tool (a) and a special tool with remote matrix sectors (b): 1 – core; 2 – diamond matrix; 3 – expander; 4 – diamond core bit body;  $d$  and  $d_1$  – core diameters drilled with a standard tool and an eccentric tool;  $D$  and  $D_1$  – borehole diameters drilled with standard and eccentric tools

Станок был размещен на эстакаде высотой 2 м. Под вращателем бурового станка располагался закрепленный блок долерита. Буровой стенд оборудован прибором для измерения механической скорости бурения и киловатт метром для измерения мощности, затрачиваемой на бурение, а также динамометром ДОСМ-3-3 для тарировки показателей штатного дриллометра станка СКБ-4 [19].

Экспериментальные исследования проводились двумя типами алмазных импрегнированных коронок: со стандартной формой торца матрицы и с эксцентриситетом режущей части торца матрицы.

Далее полученные данные обрабатывались с помощью методики полного факторного эксперимента

[20]. В качестве откликов были приняты некоторые параметры, характеризующие процесс бурения, такие как механическая скорость бурения  $v_m$ , м/ч; углубление за один оборот  $h_{об}$ , мм/об; энергоёмкость  $N/v_m$ , кВт ч/м; диаметр керна  $d_k$ , мм; мощность  $N$ , кВт; угол, характеризующий смещение точки контакта корпуса коронки со стенкой скважины,  $\Delta$ , град.

В качестве факторов, оказывающих влияние на процесс бурения, приняты: осевое усилие  $P_{ос}$ , даН, которое устанавливалось равным 1000 и 1400 даН, и частота вращения  $\omega$ ,  $\text{мин}^{-1}$  – 435 и 710  $\text{мин}^{-1}$ .

Выбранное как достаточное число опытов  $N$  составило 4. Сочетания данных параметров позволили реализовать четыре режима бурения: режим № 1 ( $\omega=435 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_{ос}=1000 \text{ даН}$ ); режим № 2 ( $\omega=435 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_{ос}=1400 \text{ даН}$ ); режим № 3 ( $\omega=710 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_{ос}=1000 \text{ даН}$ ); режим № 4 ( $\omega=710 \text{ мин}^{-1}$ ;  $P_{ос}=1400 \text{ даН}$ ). В процессе лабораторного бурения, в соответствии с методикой полного факторного эксперимента, были использованы четыре варианта сочетания параметров режима, для которых получены соответствующие значения вышеуказанных параметров [8]. Далее, следуя методике полного факторного эксперимента, было установлено четыре сочетания режимных параметров бурения, при которых производилось бурение и получены значения соответствующих откликов.

Для исследования работы инструмента, обладающего поверхностью с эксцентриситетом, и соблюдения однородных условий после бурения стандартной алмазной коронкой у данного породоразрушающего инструмента было удалено два алмазосодержащих сектора (рис. 2, б) и произведено повторное бурение по той же породе на аналогичных параметрах режима.

Результаты проведенного эксперимента представлены в табл. 1. Замеры диаметров керна были выполнены штангенциркулем, имеющим точность измерения до 0,05 мм.

**Таблица 1.** Зависимость диаметра керна при бурении стандартной коронкой и коронкой, имеющей эксцентриситет

**Table 1.** Core diameter versus drilling with standard and eccentric drill bit faces

| Буровой раствор<br>Drilling fluid  | Торец алмазной коронки<br>End face of diamond crown | Диаметр керна,<br>мм<br>Core diameter, mm |
|------------------------------------|---|---|
| Тех. вода<br>Technical water       | Стандартный<br>Standard                             | 61,25                                     |
| Раствор ПАВ<br>Surfactant solution | Стандартный<br>Standard                             | 61,40                                     |
| Тех. вода<br>Technical water       | Эксцентричный<br>Eccentric                          | 61,00                                     |
| Раствор ПАВ<br>Surfactant solution | Эксцентричный<br>Eccentric                          | 61,25                                     |

Из табл. 1 следует, что уменьшение диаметра керна при бурении коронкой с эксцентриситетом режущей части торца матрицы приводит к боковому фрезерованию керна, при этом очевидно, что аналогичное расширение по диаметру получит и ствол скважины, что в дальнейшем может быть использовано





$$F = \frac{\pi(h + 0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{\text{ск}} S_d}{2 \operatorname{tg} \gamma_{\text{ск}} P_{\text{oc}}} \left( \frac{n_6}{2,35 R_d^2 K_n} - \frac{n_m}{0,785 R_d^2 K_n} \right) \times \\ \times f \frac{P_{\text{oc}}}{S_d} (2,35 R_d^2 K_n - 0,785 R_d^2 K_n),$$

где  $R_d$  – радиус торца долота;  $S_d$  – площадь алмазосодержащей матрицы долота.

По имеющимся данным, согласно представленным теоретическим зависимостям, были произведены расчеты величины дисбалансной силы для алмазных коронок и долот с эксцентриситетом режущей части торца при бурении в сланцах. Полученные данные представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчетов дисбалансной силы

**Table 2.** Results of unbalanced force calculations

| Диаметр, мм/Diameter, mm  |            |       |       |
|---|------------|-------|-------|
| Тип породоразрушающего инструмента<br>Type of rock cutting tool | 59         | 76    | 96    |
|   | F, даН/daN |       |       |
| Коронка/Diamond crown   | 42,48      | 42,52 | 42,56 |
| Долото/Bit  | 42,4       | 42,49 | 42,62 |

Исходя из имеющихся результатов, представленных в табл. 2, следует, что величина дисбалансной силы практически не зависит от диаметра породоразрушающего инструмента при их идентичной конструкции. При этом большая часть результирующей силы формируется за счет разности площадей торца долота с большей насыщенностью алмазами и торца долота с меньшей насыщенностью, что подтверждают расчеты, представленные в табл. 3.

**Таблица 3.** Расчеты дисбалансной силы долота для различных диаметров при различных площадях участков матрицы с меньшей насыщенностью алмазными резцами

**Table 3.** Calculations of the unbalanced bit force for different diameters at different areas of the matrix sections with a lower saturation with diamond cutters

| Диаметр, мм/Diameter, mm   |  |       |       |
|--|--|-------|-------|
| Угол распространения участка матрицы долота, имеющего пониженную насыщенность алмазными резцами, град.<br>Angle of propagation section of the bit matrix having a reduced saturation with diamond cutters, deg | 59   | 76    | 96    |
|  | Значения дисбалансной силы F, даН<br>Values of unbalanced force F, daN |       |       |
| 90   | 42,46  | 42,49 | 42,62 |
| 108  | 50,99  | 51,02 | 51,05 |
| 126  | 59,49  | 59,62 | 59,66 |
| 144  | 67,98  | 68,01 | 68,04 |
| 162  | 76,48  | 76,48 | 76,54 |
| 180  | 82,80  | 82,84 | 82,89 |

Для улучшения конструкции долота с эксцентриситетом режущей части торца матрицы необходимо определить характер работы долота и места повышенного износа инструмента в процессе бурения и фрезерования интервала установки отклонителя.

Для определения точек максимального контакта наружной поверхности корпуса алмазной коронки были проведены стендовые испытания, в ходе которых наблюдался износ боковой наружной поверхно-

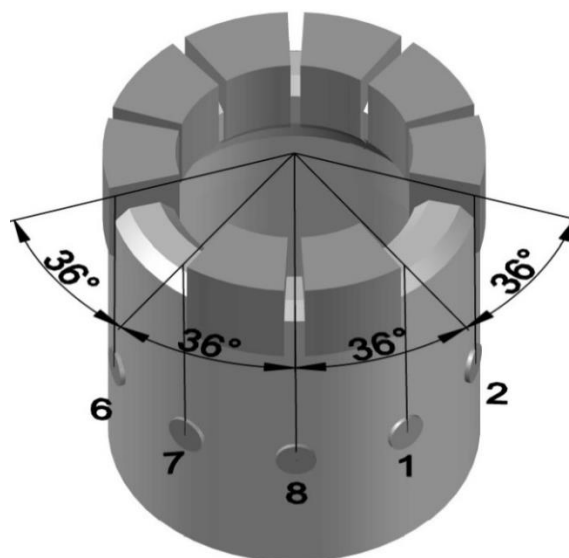
сти. Для решения поставленной задачи на корпус коронки методом сварки были выполнены восемь наплавов размером 1,5×1,5 см (рис. 5). При этом высота наплавов не превышала величину радиального зазора. Пятно контакта буровой коронки со стенкой скважины определялось по величине износа наплавов.

Уровень износа наплавов на буровом инструменте на каждом этапе экспериментальных исследований представлен в виде высоты износа и приведен в табл. 4.

**Таблица 4.** Величины износа наплавов на корпусе алмазной коронки КИТ (коронка с измененным торцом матрицы)

**Table 4.** Values of wear of surfacing on the MDC (modified diamond crown) bit body

| № наплавки на корпусе коронки<br>No. of surfacing on the body of the bit | Исходная высота наплавки, мм<br>Initial surfacing height, mm | Величина износа наплавов на корпусе коронки, мм<br>Value of wear of surfacing on the body of the crown, mm |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|
|  |  | Режим/Mode   |  |  |  |
|  |  | 1<br>$\omega=435$<br>мин <sup>-1</sup> ;<br>(min <sup>-1</sup> );<br>$P_{\text{oc}}=1000$<br>даН (daN)     | 2<br>$\omega=435$<br>мин <sup>-1</sup> ;<br>(min <sup>-1</sup> );<br>$P_{\text{oc}}=1400$<br>даН (daN) | 3<br>$\omega=710$<br>мин <sup>-1</sup> ;<br>(min <sup>-1</sup> );<br>$P_{\text{oc}}=1000$<br>даН (daN) | 4<br>$\omega=710$<br>мин <sup>-1</sup> ;<br>(min <sup>-1</sup> );<br>$P_{\text{oc}}=1400$<br>даН (daN) |
| 1  | 0,773  | 0,142  | 0,094  | 0,016  | 0,02   |
| 2  | 0,701  | 0,073  | 0,031  | 0,033  | 0,003  |
| 3  | 0,532  | 0,032  | 0,044  | 0,004  | 0,023  |
| 4  | 0,582  | 0,039  | 0,003  | 0,105  | 0,025  |
| 5  | 0,432  | 0,002  | 0,003  | 0,004  | 0,002  |
| 6  | 0,547  | 0,03   | 0,02   | 0,009  | 0,101  |
| 7  | 0,863  | 0,043  | 0,072  | 0,134  | 0,111  |
| 8  | 0,698  | 0,084  | 0,117  | 0,108  | 0,038  |



**Рис. 5.** Схема расположения наплавов на корпусе опытной коронки КИТ: 1, 2, 6, 7, 8 – наплавки

**Fig. 5.** Layout of surfacing on the body of the MDC experimental bit: 1, 2, 6, 7, 8 – surfacings

Анализ результатов экспериментов показал, что зона контакта матрицы и корпуса опытной коронки со стенкой скважины наблюдается со стороны половины торца матрицы с меньшей площадью алмазосо-

державших секторов. При режимных параметрах бурения 1 точка прилегания коронки совпадает с наплавкой № 1. По мере повышения осевой нагрузки и частоты вращения зона контакта смещается от наплавки № 1 к наплавке № 8, 7 и 6 (рис. 5) [16].

Экспериментальные данные по анализу влияния режимных параметров бурения на смещение точки контакта обрабатывались по методике ПФЭ при бурении долерита стандартной и экспериментальной коронками. В качестве отклика принят угол смещения пятна контакта  $\Delta$ . За начальную точку отсчета смещения угла  $\Delta$  было принята наплавка № 2, расположению которой совпадает с краем первого по направлению вращения коронки широкого промывочного паза. Другой крайней точкой угла  $\Delta$  принята наплавка № 6. Влияющими на угол  $\Delta$  факторами являются осевая нагрузка  $P_{oc}$  и частота вращения  $\omega$ . При обработке данных эксперимента с опытной коронкой была получена математическая модель зависимости угла смещения  $\Delta$  контакта матрицы и корпуса коронки от параметров режима бурения.

Полученная модель имеет вид:

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

Модель показывает, что осевое усилие оказывает меньшее влияние на смещение пятна контакта, чем частота вращения. Также полученная модель не противоречит представленным ранее данным о влиянии режимных параметров бурения на износ керна под действием результирующей силы  $F$ . Кроме того, установлено, что несбалансированная сила сопротивления резанию–скалыванию породы резцами экспериментальной буровой коронки приводит к повышению силы прижатия коронки к стенке скважины, а также влияет на проворот коронки под действием изменяющихся внешних сил резания–скалывания породы и прижатия ее к стенке скважины.

Основываясь на полученной информации о местоположении контакта корпуса алмазной коронки со

стенкой скважины, а также учитывая аналогичный характер формирования результирующих сил, реализуемых алмазной коронкой и долотом, следует отметить необходимость усиления бокового вооружения долота именно в местах действия дисбалансной силы  $F$ , которая концентрируется в пределах выделенного угла  $\alpha$ . Полученный научный результат учтен при разработке конструкции долота, показанной на рис. 1.

### Выводы

Проведенное научное исследование способствовало разработке конструкции алмазной коронки, обладающей эксцентриситетом центра тяжести, и позволяет сделать следующие выводы:

1. Для проработки интервала постановки отклонителя большего эффекта можно достичь, применяя породоразрушающий инструмент, обладающий эксцентриситетом центра тяжести торца матрицы.
2. Эксцентриситета работы алмазного породоразрушающего инструмента можно добиться за счет неравномерного насыщения его режущей поверхности алмазами.
3. Для достижения максимальной скорости фрезерования необходимо соблюдение условия наибольшей разности площадей участков большей и меньшей насыщенности алмазами, а также бурение с максимально возможной частотой вращения.
4. Использование для проработки ствола скважины алмазного инструмента с эксцентриситетом режущей части торца матрицы способствует созданию геометрии забоя, при которой будет исключаться заклинивание долота при постановке отклонителей непрерывного действия.
5. Для повышения ресурса коронок с эксцентриситетом режущей части торца матрицы усиление бокового вооружения долота необходимо производить в местах действия дисбалансной силы, т. е. в пределах выделенного угла  $\alpha$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision / G. Peng, Z. Chuanmin, Y. Yiqing, W. Yinyue // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – V. 114 (11). – P. 2055–2074.
2. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
3. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // *Measurement*. – 2018. – № 121. – P. 344–354.
4. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system / W. Wang, Y. Geng, N. Wang, X. Pu, J. de Oliveira Fiaux // *Energies*. – 2019. – № 12. – P. 1–20.
5. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system / Y. Li, W. Niu, H. Li, Z. Luo, L. Wang // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2014. – V. 697–698. – P. 1–20.
6. Chi Z., Wei Z. Overview of rotary steerable system and its control methods // *International Conference on Mechatronics and Automation*. – 2016. – V. 1. – P. 1559–1565.
7. Шпаго Л.Г., И.М. Юдборовский. Искривление скважин под действием постоянной по величине отклоняющей силы // *Методика и техника разведки*. – 1964. – Вып. 49. – С. 47–51.
8. Epikhin A., Zhironkin V. Method for determining the loads on the deflection module of the push-the-bit rotary steerable system // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2021. – № 1. – P. 1–7.
9. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system / M. Wang, X. Li, G. Wang, W. Huang, Y. Fan, W. Luo, J. Zhang, X. Shi // *Mathematical problems in engineering*. – 2020. – V. 2020. – P. 1–9.
10. Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин / А.Б. Жабин, А.В. Поляков, Е.А. Аверин, Ю.Н. Линник, В.Ю. Линник // *Записки горного института*. – 2019. – Т. 240. – С. 621–627.
11. Нескоромных В.В. Проходка направленных скважин в сложных геологических условиях с применением растворов на основе отходов химпредприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 1985. – 69 с.
12. Шигин А.О., Шигина А.А. Прогнозируемый ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных горных массивов // *Вестник ИрГТУ*. – 2014. – Т. 84. – № 1. – С. 29–33.
13. Фомин О. ССК: Усталостное разрушение буровых труб, его прогнозирование и профилактика // *Rogtec. Бурение*. – 2016. – № 52. – С. 62–79.
14. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во «Высшая школа», 2003. – 560 с.
15. Алмазная коронка для компоновки бурового снаряда: пат. Рос. Федерации, № 2078193, заявл. 21.07.1993; опубл. 27.04.1997. Бюл. № 33. – 5 с.

16. Алмазное долото: пат. Рос. Федерация, № 190484, заявл. 06.03.2019; опубл. 02.07.2019. Бюл. № 19. – 4 с.
17. Головченко А.Е. Разработка новых технических средств и технологии ударно-вращательного бурения на основе использования внецентренных ударных импульсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 118 с.
18. Бухаров А.А. Опыт применения КНБК в условиях Северной Карелии // Научно-технический сборник ВИЭМС. – 1991. – № 2. – С. 141–146.
19. Петенев П.Г. Исследование и совершенствование компоновки бурильной колонны для повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 179 с.
20. Сулакшин С.С., Кривошеев В.В., Рязанов В.И. Методическое руководство по направленному бурению геологоразведочных скважин. – М.: Изд-во «Недра», 1978. – 186 с.

Поступила 15.04.2022 г.

#### Информация об авторах

**Нескоромных В.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Петенёв П.Г.**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Лысаков Д.В.**, аспирант, ведущий инженер кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Попова М.С.**, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Головченко А.Е.**, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

**Баочанг Л.**, профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.



UDC 622.24.051

## DEVELOPMENT OF DIAMOND DRILLING BIT FOR DIRECTIONAL DRILLING

Vyacheslav V. Neskoromnykh<sup>1</sup>,  
sovair@bk.ru

Pavel G. Petenev<sup>1</sup>,  
pavel-whait@mail.ru

Dmitry V. Lysakov<sup>1</sup>,  
lysackovd@yandex.ru

Marina S. Popova<sup>1</sup>,  
alleniram83@mail.ru

Anton E. Golovchenko<sup>1</sup>,  
antong77@yandex.ru

Liu Baochang<sup>2</sup>,  
liubc@jlu.edu.cn

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
95, Krasnoyarskiy rabochiy newspaper avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

<sup>2</sup> Jilin University,  
938, Ximinzhong street, Changchun, 130026, China.

**The relevance.** Many years of experience in directional drilling has made it possible to identify complex mining and geological conditions in which the use of defectors leads to decrease in the effectiveness of the curvature and accidents. So, for example, the fastening of continuous defectors in hard, very hard and abrasive rocks, when the borehole diameter has minimum development along the borehole diameter, leads to jamming of the rock cutting tool. In this case, it is difficult to improve the efficiency of diverters due to the lack of special technical means and effective technologies for deviating wells, which makes the problem of reducing the efficiency of diverters relevant and needs to be addressed.

**The main aim:** search for the causes of jamming of asymmetric and combined diverters when setting and breaking out in wells drilled in hard rocks; development of a diamond drill bit design with a special layout of lateral and end cutting structure; assessment of the effect of eccentricity of the cutting part of a drilling tool on the efficiency of drilling a wellbore according to diameter.

**Object:** eccentricity of the cutting part of the drilling tool.

**Methods:** collection, analysis and generalization of the data in literary sources, analytical research and experimental work.

**Results.** The paper describes the causes of the whipstock jamming in the well and introduces the existing technologies that allow solving the given problem. The authors developed a diamond drill bit of special design and described the principle of its operation. The influence of the cutting part eccentricity on drilling the hole in diameter is assessed and the fact of increasing the milling ability is established.

#### Key words:

Drilling, artificial well deviation, diverter, milling, eccentricity, bit.

#### REFERENCES

- Peng G., Chuanmin Z., Yiqing Y., Yinyue W. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 114 (11), pp. 2055–2074.
- Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
- Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, no. 121, pp. 344–354.
- Wang W., Geng Y., Wang N., Pu X., De Oliveira Fiaux J. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 1–20.
- Li Y., Niu W., Li H., Luo Z., Wang L. Study on a new steering mechanism for point-the-bit rotary steerable system. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, vol. 697–698, pp. 1–20.
- Chi Z., Wei Z. Overview of steerable system and its rotary control methods. *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2016, vol. 1, pp. 1559–1565.
- Shrago L.G., Yudborovsky I.M. Iskrivlenie skvazhin pod deystviem postoyannoy po velichine otklonyayushey sily [Curvature of wells under the action of a constant deflecting force]. *Technique and technique of reconnaissance*, 1964, Iss. 48, pp. 47–51.
- Epikhin A., Zhironkin V. Method for determining the loads on the deflection module of the push-the-bit rotary steerable system. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2021, no. 1, pp. 1–7.
- Wang M., Li X., Wang G., Huang W., Fan Y., Luo W., Zhang J., Shi X. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system. *Mathematical problems in engineering*, 2020, vol. 2020, pp. 1–9.
- Zhabin A.B., Polyakov A.V., Averin E.A., Linnik Y.N., Linnik V.Y. Estimation of abrasiveness impact on the parameters of rock-cutting equipment. *Journal of Mining Institute*, 2019, no. 240, pp. 621–627. In Rus.
- Neskoromnykh V.V. *Prokhodka napravlennykh skvazhin v slozhnykh geologicheskikh usloviyakh s primeneniem rastvorov na osnove otkhodov khimpredpriyatii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Sinking of directional wells in difficult geological conditions using solutions based on waste from chemical enterprises. Cand. Diss. Abstract]. Irkutsk, 1985. 69 p.
- Shigin A.O., Shigina A.A. Predictable resource of cone bits when drilling complex rock massifs. *Bulletin of ISTU*, 2014, vol. 84, no. 1, pp. 29–33. In Rus.

13. Fomin O. CCK: fatigue failure of drill pipes, its prediction and prevention. *Rogtec. Drilling*, 2016, no. 52, pp. 62–79. In Rus.
14. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003. 560 p.
15. Kozlovsky E.A., Buglov N.A., Novozhilov B.A., Karpikov A.V., Poluyanov A.A. *Almaznaya koronka dlya komponovki burovogo snaryada* [Diamond bit for the assembly of a drilling tool]. Patent RF, no. 2078193, 1997.
16. Neskoromnykh V.V., Petenev P.G., Lysakov D.V. *Doloto dlya bureniya* [Diamond chisel]. Patent RF, no. 190484, 2019.
17. Golovchenko A.E. *Razrabotka novykh tekhnicheskikh sredstv i tekhnologiy udarno-vrashchatelnogo bureniya na osnove ispolzovaniya vnetsentrennykh udarnykh impulsov*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Development of new technical means and technology of percussive-rotary drilling based on the use of eccentric shock pulses. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2021. 118 p.
18. Bukharov A.A. Opyt primeneniya KNBK v usloviyakh severnoy Karelii [Experience of using BHA in the conditions of North Karelia]. *Scientific and technical collection of VIEMS*, 1991, no. 2, pp. 141–146.
19. Petenev P.G. *Issledovanie i sovershenstvovanie komponovki burilnoy kolonny dlya povysheniya effektivnosti bureniya geologorazvedochnykh skvazhin*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Research and improvement of the layout of the drill string to improve the efficiency of drilling exploration wells. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2016. 179 p.
20. Sulakshin S.S., Krivosheev V.V., Ryazanov V.I. *Metodicheskoe rukovodstvo po napravlenному bureniyu geologorazvedochnykh skvazhin* [Guidelines for directional drilling of exploration wells]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 186 p.

Received: 15 April 2022.

#### Information about the authors

**Vyacheslav V. Neskoromnykh**, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and exploration techniques, Siberian Federal University.

**Pavel G. Petenev**, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

**Dmitry V. Lysakov**, postgraduate student, leading engineer, Siberian Federal University.

**Marina S. Popova**, associate professor, Siberian Federal University.

**Anton E. Golovchenko**, associate professor, Siberian Federal University.

**Liu Baochang**, professor, Jilin University.