

РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

УДК 622.243.2

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-424-435>Разработка долот для направленного бурения
в сложных горно-геологических условияхДмитрий Викторович Лысаков^a^aСибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме. Целью представленного исследования стало повышение эффективности ведения работ по направленному бурению с применением отклонителей непрерывного действия в сложных горно-геологических условиях. В ходе исследования были описаны горно-геологические условия, в которых происходит снижение эффективности работы отклонителей непрерывного действия, а также причины, по которым данное снижение наблюдается. Можно отметить, что значительные проблемы возникают при использовании отклонителей непрерывного действия фрезерующего типа для забуривания дополнительных стволов скважин в твердых горных породах с искусственных забоев из цементных смесей и искривлении скважин в интервалах ослабленных горных пород естественного забоя. В этом случае наблюдается снижение точности искривления вследствие препятствующей набору кривизны повышенной скорости углубки, которую сложно регулировать параметрами режима бурения. Другой проблемой, вызывающей снижение точности искривления скважин при использовании отклонителей фрезерующего типа в породах, имеющих высокую твердость, является отклонение плоскости набора кривизны вследствие возникающего при фрезеровании стенки скважины дезориентирующего усилия. В исследовании кратко представлены существующие технологии и технические средства, применение которых направлено на повышение работы отклонителей в сложных горно-геологических условиях, в том числе за счет использования долот со специальной конструкцией. Автор предложил и запатентовал серию новых технических средств (к коим относятся долота) и технологических решений, позволяющих эффективно бороться с падением результативности работы отклонителей непрерывного действия при искривлении скважины в горных породах, имеющих высокую твердость, при этом в разработанных средствах были учтены недостатки уже существующих технических средств.

Ключевые слова: искривление скважины, искусственный забой, отклонитель, горная порода, долото

Для цитирования: Лысаков Д. В. Разработка долот для направленного бурения в сложных горно-геологических условиях // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 424–435. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-424-435>.

EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS

Original article

Development of bits for directional drilling
in complex mining and geological conditionsDmitry V. Lysakov^a^aSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The purpose of the study is to improve the efficiency of directional drilling using continuous whipstocks in difficult mining and geological conditions. The research involves the description of mining and geological conditions featuring decreased efficiency of continuous whipstock operation as well as the reasons why the decrease is observed. It should be noted that significant problems arise when using the milling-type continuous whipstocks for sidetracking in hard rocks from the plug back total depths of cement mixtures and well deviations in the intervals of normal face weakened rocks. In this case, there is a decrease in deviation accuracy, due to the increased sinking speed that prevents curvature accumulation and which is difficult to control by the drilling mode parameters. Another problem that decreases the well deviation accuracy when using milling-type whipstocks in hard rocks is the deviation of the drift angle build up plane due to the disorienting



force that occurs during milling of the borehole wall. The study briefly dwells upon the existing technologies and engineering means, the use of which is aimed at improving the whipstock performance in complex mining and geological conditions, including through the use of bits with a special design. The author has proposed and patented a series of new technical means (bits) and technological solutions that effectively deal with the drop in the performance of continuous whipstocks in the well deviated in hard rocks. Moreover, the developed means took into account the shortcomings of current technical equipment.

Keywords: wellbore deviation, plug back total depth, whipstock, rock, bit

For citation: Lysakov D. V. Development of bits for directional drilling in difficult mining and geological conditions. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(4):424-435. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-4-424-435>.

Введение

На основе опыта разведки месторождений полезных ископаемых было установлено, что метод направленного бурения позволяет существенно повысить качество и снизить стоимость геолого-разведочных работ, увеличить эффективность эксплуатации углеводородных залежей, решить многие сложнейшие задачи при реализации геотехнологий и прокладке коммуникаций. Основным техническим средством при направленном бурении скважин, позволяющим производить оперативное, точное и качественное искривление скважин, являются отклонители непрерывного действия [1–3].

В то же время 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, при использовании отклонителей фрезерующего типа в породах, имеющих высокую твердость, наблюдается снижение точности искривления вследствие возникающего при фрезеровании стенки скважины дезориентирующего усилия. Раскрепление отклонителей непрерывного действия в твердых, очень твердых и абразивных горных породах, когда радиальные зазоры между стенкой скважины и вооружением долота минимальны, приводит к заклиниванию породоразрушающего инструмента.

Скважины, пробуренные в твердых и очень твердых горных породах, как правило, имеют минимальные радиальные зазоры между вооружением алмазного инструмента и стенкой скважины. При этом нередко случаи, когда вследствие повышенного износа вооружения алмазного инструмента диаметр скважины может несколько заужаться [4–7]. Использование отклонителей непрерывного

действия в таких скважинах ограничено в связи с большим риском заклинивания породоразрушающего инструмента при раскреплении.

Работоспособность отклонителей, реализующих искривление за счет асимметричного разрушения забоя, в отличие от работоспособности отклонителей фрезерующего типа напрямую зависит от величины угла наклона породоразрушающего инструмента относительно оси скважины (обычно угол наклона составляет 1–2°) [8–11]. В отклонителях фрезерующего типа интенсивность набора кривизны не зависит от наклона породоразрушающего инструмента, однако наклон может быть вызван прогибом вала-ротора отклонителя [13–15].

Проведенное графоаналитическое исследование позволило установить, что при наклоне долота на 1–3° диаметр матрицы в плоскости, перпендикулярной оси скважины, увеличивается с 76 до 77,06 мм соответственно. В условиях зауженного ствола скважины это приводит к тому, что при перекосе долота его диаметр в сечении, перпендикулярном оси скважины, начинает превышать диаметр скважины и происходит заклинивание. Если сила сцепления распорного механизма с горной породой окажется меньше, чем у вооружения долота, то при передаче на него крутящего момента произойдет проворот корпуса отклонителя в скважине и потеря ориентации снаряда. В более редких случаях, когда силы сцепления вооружения долота и распорного механизма с горной породой велики, происходит поломка вала отклонителя, которая приводит к авариям.

Обеспечить возможность свободного перекоса породоразрушающего инструмента при раскреплении отклонителя можно за счет увеличения радиального зазора между воору-



жением долота и стенкой скважины. Для этого производится проработка диаметра скважины методом локального расширения диаметра на высоте 5–10 см от забоя. Проведенные ранее исследования, позволили установить, что для проработки диаметра ствола скважины могут использоваться долота типа ДДА. Износ 38 долот различного диаметра показал, что лапа долот со стороны большей шарошки изнашивается более интенсивно, а разность высот лап после отработки составила 1–3 мм. Причина неравномерного износа лап заключается в различном размере шарошек долота. В процессе бурения шарошка, имеющая меньший размер и, следовательно, меньшую площадь контакта с горной породой, разрушает забой более активно¹.

Таким образом, данная конструктивная особенность приводит к тому, что долото прижимается к стенке скважины большей шарошкой и активно ее фрезерует (например, из опытных данных видно, что при бурении скважины долотом диаметром 59 мм диаметр скважины получает разработку до 61 мм). С другой стороны, применение долот ДДА приводит к изгибу буровой компоновки, ее износу и потере фрезерующей способности² [14–17].

На этой основе была разработана конструкция алмазного бурового долота со специальной схемой размещения бокового и торцевого вооружения, которое при работе не имеет недостатков, характерных для долот типа ДДА, и при этом позволяет вести эффективную проработку диаметра скважины.

При использовании отклонителей фрезерующего типа в твердых горных породах в процессе фрезерования стенки скважины возникает дезориентирующее усилие P_d , в результате чего наблюдается смещение плоскости набора кривизны в сторону, противоположную вращению долота. В связи с этим при ориентации отклонителя возникает необходимость учитывать угол отклонения плоскости набора кривизны φ , задавая некоторое упреждение этого отклонения смещением вправо от требуемой плоскости набора кривизны. Угол возможного отклонения φ определяется

исходя из опыта использования отклонителя в схожих горно-геологических условиях.

На рис. 1 представлена схема, поясняющая процесс смещения плоскости набора кривизны в твердых горных породах. Под действием осевой нагрузки распорный механизм с роликами-катками 3 срабатывает и выдвигается до упора в стенку скважины с усилием P_p . В результате взаимодействия распорного механизма со стенкой скважины на породоразрушающем инструменте 2 возникает отклоняющее усилие $P_{откл}$ и под действием крутящего момента осуществляется фрезерование стенки скважины боковым вооружением долота 1 в заданном оператором направлении I.

В процессе работы боковых резцов возникает дезориентирующее усилие P_d , Н, которое вызвано сопротивлением резанию-скалыванию горной породы резцами, прижатыми к стенке скважины. При этом дезориентирующее усилие имеет прямую зависимость с отклоняющим усилием $P_{откл}$, даН:

$$P_d = \frac{P_{откл}}{R_d},$$

где R_d – радиус торца долота, м.

Одновременное действие на долото отклоняющего и дезориентирующего усилия приводит к появлению результирующего усилия P . В результате того, что на породоразрушающий инструмент оказывают влияние силы, не совпадающие по направлению, в процессе искривления происходит смещение плоскости набора кривизны от направления I, заданного оператором при постановке задачи, в направлении искривления II на некоторый угол φ .

Повысить точность искривления скважин в сложных горно-геологических условиях достаточно трудно в связи с отсутствием специальных технических средств и эффективных технологий, что делает проблему снижения точности искривления при использовании отклонителей фрезерующего типа актуальной и требующей решения, поскольку технологии искусственного искривления являются основой прогрессивных методов геолого-разведочных работ.

¹ Нескоромных В. В. Проходка направленных скважин в сложных геологических условиях с применением растворов на основе отходов химпредприятий: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Иркутск: Изд-во ИГИ, 1985. 69 с.

² Там же.

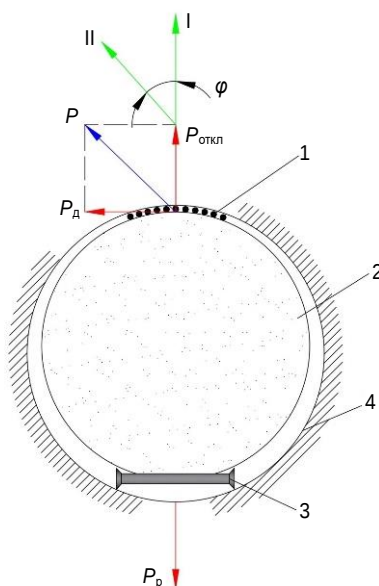


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процесс отклонения плоскости искривления:

1 – боковое вооружение долота; 2 – долото; 3 – ролики-катки распорного устройства; 4 – стенка скважины
 φ – угол возможного отклонения, град.; P – результирующее усилие, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН;
 P_{δ} – дезориентирующее усилие, Н; P_p – распорное усилие, даН
 I, II – заданные направления

Fig. 1. Diagram demonstrating the curvature plane deviation:

1 – lateral drill bit cutting structure; 2 – bit; 3 – track rollers of the anchoring system; 4 – borehole wall
 φ – angle of possible deviation, degrees; P – resulting force, daN; $P_{откл}$ – deviation force, daN;
 P_{δ} – disorienting force, N; P_p – thrust force, daN
 I, II – given directions

Материалы и методы исследования

В связи с тем, что уже существующие технологии и технические средства не обладают достаточной эффективностью, целью данного исследования стало повышение эффективности ведения работ по направленному бурению с применением отклонителей непрерывного действия в сложных горно-геологических условиях. Для реализации поставленной цели автором был разработан ряд технических средств, таких как долото с шарниром и долота со специальной схемой размещения вооружения как на боковом, так и на торцевом участках.

Результаты исследования

Конструкция долота для локального расширения диаметра ствола скважины (рис. 2) включает алмазосодержащую матрицу, торец которой разделен на основную 3 и дополнительную 4 части. Основная часть ограничена углом β и имеет стандартное насыщение алмазными резцами, при этом дополнительная часть имеет меньшее насыщение алмазными

резцами. Боковое вооружение разделено на зоны с пониженной, стандартной и повышенной насыщенностью. Зона со стандартной насыщенностью 6 с одной стороны ограничена углом α с фрезерующим вооружением, имеющим повышенную насыщенность 5, а с другой – боковым вооружением 7 на дополнительной части, имеющим пониженное насыщение резцами [18].

Под действием осевого усилия и крутящего момента долото разрушает горную породу на забое, при этом разделение торцевой части долота на зоны с различной насыщенностью алмазными резцами приводит к неустойчивости реакций сил резания-скалывания породы резцами F и F_y , что, в свою очередь, приводит к появлению результирующей сил резания-скалывания ΔF , которая смещена от геометрической оси торца долота O на некоторое расстояние X . При этом точка O_1 становится центром мгновенного вращения долота. В результате долото вращается, прижимаясь к стенке скважины участком с основным фрезерующим вооружением, активно прорабатывая ее.

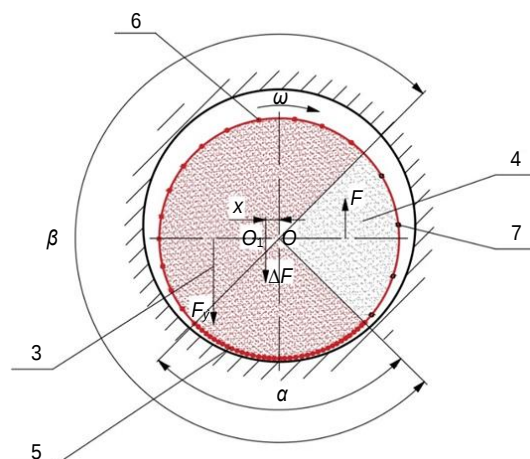


Рис. 2. Торцевая часть алмазосодержащей матрицы долота со специальной схемой размещения вооружения:

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 алмазными резцами; 7 – фрезерующее вооружение, имеющее насыщение алмазными резцами меньше стандартного
 α – угол, обозначающий зону усиленного фрезерующего вооружения, град.; β – угол, обозначающий зону фрезерующего вооружения со стандартной насыщенностью, град.; ω – направление вращения долота; X – расстояние, м; O – геометрическая ось торца долота; F – сила резания, Н; F_y – сила скалывания, Н; ΔF – результирующая сил резания-скалывания

Fig. 2. The face of the diamond-containing matrix of the bit with a special layout of the drill bit cutting structure:

3 – standard diamond coated bit section; 4 – less than standard diamond coated bit section; 5 – milling cutting structure of the increasingly diamond coated drill bit; 6 – milling cutting structure of the standard diamond coated drill bit; 7 – milling cutting structure of the less than standard diamond coated drill bit
 α – angle denoting the zone of the milling structure with reinforced coating, degrees; β – angle denoting the zone of the milling structure with standard coating, degrees; ω – bit rotation direction; X – distance, m; O – geometric axis of the bit face; F – cutting force, N; F_y – shearing force, N; ΔF – the resultant of cutting-shearing forces

Для оценки величины результирующей сил резания-скалывания ΔF при бурении долотом с эксцентриситетом режущей части использовалось следующее выражение

$$\Delta F = \frac{\pi(h+0,25\sqrt{dh})^2 \sigma_{ск} S_d}{2 \operatorname{tg} \gamma_{ск} P_{ос}} \left(\frac{n_b}{S_{ст}} - \frac{n_m}{S_m} \right) f \frac{P_{ос}}{S_d} (S_{ст} - S_m),$$

где h – глубина внедрения алмазного резца в породу, м; d – диаметр алмазного резца, м; $\sigma_{ск}$ – предел прочности на скалывание породы, Па; S_d – площадь алмазосодержащей матрицы долота, м²; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца, град; $P_{ос}$ – осевая нагрузка, даН; n_b – количество прижатых к стенке скважины боковых алмазных резцов; n_m – число алмазных резцов на участке торца долота, имеющего насыщение алмазными резцами ниже стандартного; $S_{ст}$ – площадь алмазосодержащей матрицы долота, имеющая стандартное насыщение резцами, м²; S_m – площадь алмазосодержащей матрицы долота, имеющая насыщение резцами ниже стандартного, м².

Отсюда $S_{ст}$ и S_m определяются из формулы:

$$S = \frac{3,14 R_d^2}{360} \alpha K_{п},$$

где R_d – радиус торца долота, м; α – центральный угол сектора матрицы с насыщением алмазными резцами ниже стандартного и стандартным, град.; $K_{п}$ – коэффициент, учитывающий площадь промывочных каналов.

Так как геометрически торец алмазного долота представляет собой окружность, формула площади торцевой части долота S_d , м², будет иметь вид:

$$S_d = 3,14 R_d^2 K_{п},$$

где R_d – радиус торца долота, м; $K_{п}$ – коэффициент, учитывающий площадь промывочных каналов.

При помощи представленных зависимостей была рассчитана величина дисбалансной силы долота с эксцентриситетом резания торцевой части. Полученные в ходе расчетов данные представлены в табл. 1.



Таблица 1. Расчеты дисбалансной силы долота для различных диаметров долота при различных площадях участков матрицы с меньшей насыщенностью алмазными резцами
Table 1. Calculations of the bit unbalance force for various bit diameters at different areas of the matrix sections with lower saturation with diamond cutters

Угол распространения участка матрицы долота, имеющего пониженную насыщенность алмазными резцами, град.	Диаметр долота, мм		
	59	76	96
	Значение дисбалансной силы долота, даН		
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	82,8	82,84	82,89

Из данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что дисбаланс сил резания имеет минимальную зависимость от диаметра породоразрушающего инструмента при их идентичной конструкции. При этом величина результирующей силы в основном зависит от разности площадей торца долота с большей и меньшей насыщенностью алмазами.

С другой стороны, предотвратить заклинивание породоразрушающего инструмента при использовании отклонителей фрезерующего типа можно за счет внедрения «гибкого» соединения между валом-ротором отклонителя и корпусом долота. Такое техническое решение позволит устранить перекося породоразрушающего инструмента, вызванного прогибом вала-ротора.

Для реализации поставленной цели разработана и запатентована конструкция алмазного породоразрушающего инструмента, в которой «гибкое» соединение с валом отклони-

теля реализуется за счет шарнира, выполненного в корпусе долота. Долото (рис. 3) состоит из матрицы 2 и корпуса 3, который при помощи шлицевого соединения 4 взаимодействует с шарниром 5. Шарнир, в свою очередь, в нижней части опирается на сферическую проточку 6, а в верхней при помощи резьбы 7 навинчен на вал отклонителя. Гайка 8 и резиновый элемент 9 служат для закрепления шарнира в корпусе долота. Резиновый элемент служит также для герметизации внутренней полости корпуса.

При создании отклоняющего усилия долото своим боковым вооружением прижимается к стенке скважины. Одновременно с этим сила сопротивления горной породы, направленная в сторону, противоположную отклоняющему усилию, вызывает некоторый прогиб вала отклонителя. При этом шарнир, закрепленный на валу отклонителя, также получает некоторый наклон, но за счет сферической проточки в матрице и наличия зазоров с шайбой

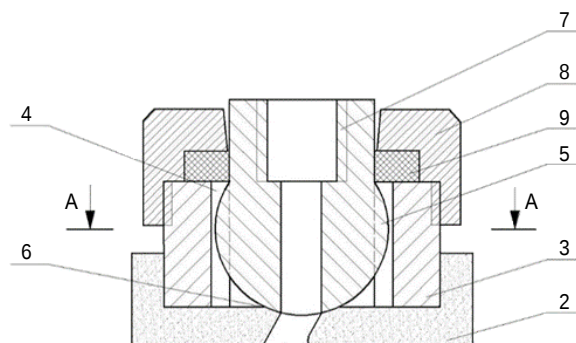


Рис. 3. Долото:

2 – матрица; 3 – корпус; 4 – шлицевое соединение; 5 – шарнир; 6 – проточка; 7 – резьба; 8 – гайка; 9 – резиновый элемент

Fig. 3. Bit:

2 – matrix; 3 – housing; 4 – spline joint; 5 – hinge joint; 6 – groove; 7 – thread; 8 – nut; 9 – rubber element



не передает наклон на корпус долота. Крутящий момент с шарнира на корпус передается за счет шлицевого соединения.

Объединение корпуса долота с гайкой при помощи резьбового соединения обеспечивает возможность замены изношенной алмазосодержащей матрицы с корпусом на новую без замены шарнира [19].

Для определения прочности и слабых элементов конструкции долота было произведено компьютерное 3D-моделирование в среде ANSYS при условии использования в нем различных по твердости материалов. Анализ проводился с помощью модуля Static Structural – были рассмотрены деформации и основные напряжения, возникающие в шарнирах из титана, легированной стали и холодной нормализованной стали под действием осевой нагрузки и крутящего момента (рис. 4).

По итогам компьютерного моделирования было установлено, что в процессе бурения действие ударных нагрузок может вызвать частичное или полное разрушение сферической проточки в зоне контакта с шарниром. Под частичным разрушением понимается образование сколов на поверхности проточки, что вызовет повышенный износ нижней части шарнира. Полное разрушение матрицы приведет к аварии.

Учитывая данные факторы, конструкция долота была доработана путем переноса сферической проточки из матрицы в корпус долота. В этом случае осевая нагрузка от

шарнира к матрице будет передаваться по большей площади.

Для уменьшения величины отклонения плоскости набора кривизны при искривлении скважин отконителем фрезерующего типа в горных породах, имеющих высокую твердость, разработана конструкция долота, схема расположения бокового вооружения которого способна снизить влияние дезориентирующего усилия на плоскость искривления (рис. 5).

Корпус 2 долота включает резьбу 1 и матрицу 3, на боковой поверхности которой алмазосодержащие сектора и промывочные каналы располагаются под некоторым наклоном относительно оси долота. Угол наклона боковых секторов матрицы, который позволяет наиболее эффективно компенсировать дезориентирующее усилие, определяется в основном из сил, действующих на долото в процессе фрезерования стенки скважины и глубины внедрения алмазных резцов в породу [20].

Используя разработанную методику, можно определить оптимальный угол наклона в различных горных породах и при различных параметрах режима бурения. Для начала следует оценить угол отклонения плоскости набора кривизны φ , град., при помощи выражения

$$\varphi = \arctg \frac{P_D}{P_{\text{откл}}},$$

где P_D – дезориентирующее усилие, Н; $P_{\text{откл}}$ – отклоняющее усилие, даН.

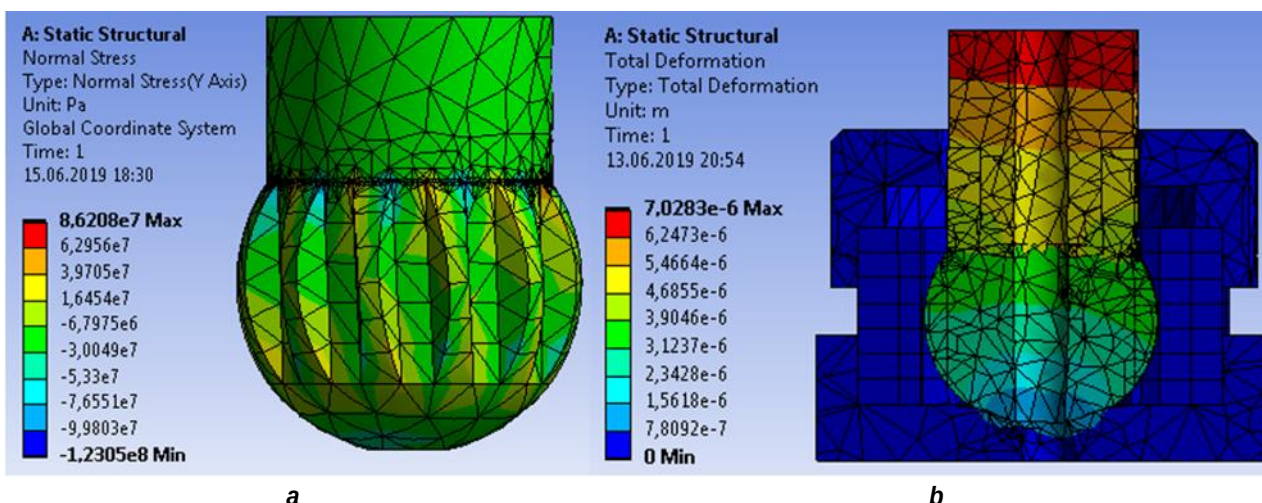


Рис. 4. Модель распределения напряжений в шарнире из холодной нормализованной стали (a) и модель деформации шарнира (b)

Fig. 4. A stress distribution model in a cold normalized steel hinge (a) and a hinge deformation model (b)

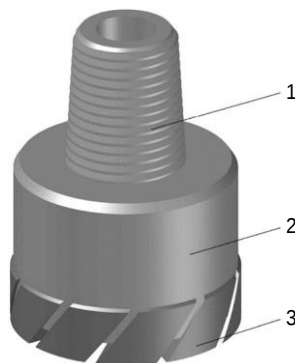


Рис. 5. Алмазное долото с наклонным боковым вооружением:

1 – резьба; 2 – корпус; 3 – матрица

Fig. 5. Diamond bit with inclined lateral cutting structure:

1 – thread; 2 – housing; 3 – matrix

Поскольку появление дезориентирующего усилия P_d , Н, обусловлено сопротивлением резанию-скалыванию горной породы резцами, располагающимися на боковой поверхности алмазосодержащих штабиков, формула для определения его величины принимает вид:

$$P_d = \frac{\pi \cdot (h + 0.25\sqrt{d \cdot h})^2 \cdot n_b}{2\text{tg}\gamma_{\text{СК}}} \cdot \sigma_{\text{СК}} + P_{\text{откл}} \cdot \mu = P_a + P_{\text{откл}} \cdot \mu,$$

где h – глубина внедрения алмазного резца в породу, мм; d – диаметр алмазного резца, мм; n_b – количество прижатых к стенке скважины боковых алмазных резцов; $\gamma_{\text{СК}}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца, град.; $\sigma_{\text{СК}}$ – предел прочности горной породы на скалывание, даН/мм²; $P_{\text{откл}}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; P_a – усилие резания-скалывания горной породы алмазным резцом, даН.

Отсюда глубина внедрения алмазного резца в породу h , м, вычисляется следующим образом:

$$h = 0,5d - \sqrt{0,25d^2 - \frac{P}{\pi \cdot p_{\text{ш}} \cdot (1 + \text{tg}\varphi_{\text{п}})}},$$

где d – диаметр алмазного резца, мм; P – результирующее усилие, даН; $p_{\text{ш}}$ – твердость горной породы, даН/мм²; $\varphi_{\text{п}}$ – угол внутреннего трения горной породы, град.

Принцип работы долота основан на механизме силового взаимодействия торцевых и боковых алмазных резцов с горной породой под действием осевого и отклоняющего усилий. Учитывая, что при наклоне алмазосодержащих штабиков часть осевого усилия ком-

пенсируется прижатием резцов, формула для определения действующего на каждый из резцов усилия P_i , даН, принимает вид:

$$P_i = \frac{P_{\text{ос}} + P_{\text{откл}} \cdot \mu}{n_{\text{т}} + n_{\text{б}}},$$

где $P_{\text{ос}}$ – осевое усилие, даН; $P_{\text{откл}}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; $n_{\text{т}}$ – количество торцевых алмазных резцов; $n_{\text{б}}$ – количество боковых алмазных резцов.

Одновременно с этим внедрению боковых резцов препятствует реакция со стороны горной породы P_c . Учитывая, что сопротивление со стороны породы P_c , даН, вызвано в основном упругими реакциями, которые могут быть определены через коэффициент внутреннего трения, сопротивление, действующее на боковые резцы, может быть рассчитано через выражение:

$$P_c = n_b \cdot P_i (1 - \text{tg}\varphi),$$

где n_b – количество боковых алмазных резцов; P_i – действующее на каждый из резцов усилие, даН; $\text{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения.

Боковые резцы сектора матрицы расположены под наклоном, часть осевого усилия трансформируется в горизонтальную силу P_r , Н, величина которой с учетом угла наклона определяется следующим образом:

$$P_r = P_c \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma = n_b \cdot P_i (1 - \text{tg}\varphi) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma = \frac{n_b \cdot (P_{\text{ос}} - P_{\text{откл}} \cdot \mu) \cdot (1 - \text{tg}\varphi) \cdot \sin 2\gamma}{2(n_{\text{т}} + n_{\text{б}})},$$

где P_c – сопротивление, действующее на боковые резцы со стороны горной породы, даН; γ – угол наклона, град.; n_b – количество боковых алмазных резцов; P_i – действующее на каждый из резцов усилие, даН; $\text{tg}\varphi$ – коэффи-



коэффициент внутреннего трения; $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; n_T – количество торцевых алмазных резцов.

Таким образом, для того, чтобы предотвратить смещение плоскости набора кривизны и повысить точность искривления, необходимо добиться такого угла наклона боковых секторов матрицы (рис. 6), при которых величина горизонтальной силы полностью компенсировала бы действие дезориентирующего усилия:

$$P_a + P_{откл} \cdot \mu = \frac{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi) \cdot \sin 2\gamma}{2(n_T + n_6)},$$

где P_a – усилие резания-скалывания горной породы алмазным резцом, даН; $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; γ – угол наклона боковых секторов матрицы, град.; n_T – количество торце-

вых алмазных резцов; n_6 – количество боковых алмазных резцов.

Отсюда величина угла наклона алмазосодержащего штабика γ , град., вычисляется следующим образом:

$$\gamma = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(n_T + n_6) \cdot (P_a + P_{откл} \cdot \mu)}{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi)},$$

где n_T – количество торцевых алмазных резцов; n_6 – количество боковых алмазных резцов; P_a – усилие резания-скалывания горной породы алмазным резцом, даН; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, даН; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу; $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; $\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения.

Таким образом, на основе разработанной методики был рассчитан оптимальный угол наклона боковой поверхности алмазосодержащих секторов в различных горно-геологических условиях при разных параметрах режима бурения. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

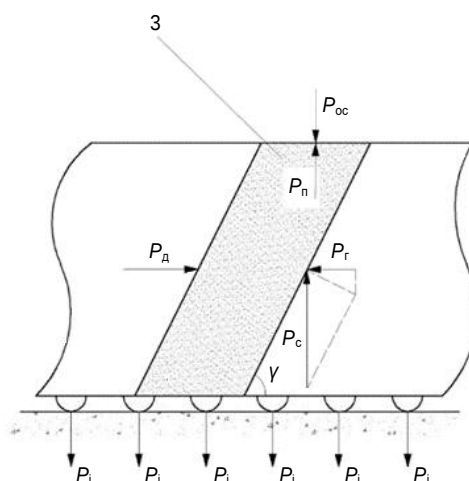


Рис. 6. Схема силового воздействия на наклонный алмазосодержащий штабик в процессе работы:

3 – боковой сектор матрицы

$P_{ос}$ – осевое усилие, даН; P_n – сила прижатия резцов, Н; $P_д$ – дезориентирующее усилие, Н; $P_г$ – горизонтальная сила, Н; $P_с$ – сопротивление, действующее на боковые резцы со стороны горной породы, даН; γ – угол наклона боковых секторов матрицы, град.; P_i – действующее на каждый из резцов усилие, даН

Fig. 6. Diagram of force impact on the inclined diamond-containing rod in operation:

3 – matrix lateral sector

$P_{ос}$ – axial force, daN; P_n – cutter pressing force, N; $P_д$ – disorienting force, N; $P_г$ – horizontal force, N; $P_с$ – rock resistance acting on the side cutters, daN; γ – inclination angle of the side sectors of the matrix, degrees; P_i – force acting on each cutter, daN

Таблица 2. Расчетные значения угла наклона алмазосодержащих штабиков

Table 2. Estimated values of the inclination angle of diamond-containing rods

Известняк					Диорит					Сиенит				
$P_{откл}$, даН	$P_{ос}$, даН	P_d , Н	P_g , Н	γ , град.	$P_{откл}$, даН	$P_{ос}$, даН	P_d , Н	P_g , Н	γ , град.	$P_{откл}$, даН	$P_{ос}$, даН	P_d , Н	P_g , Н	γ , град.
60	500	79,24	78,28	52	80	600	99,24	99,58	41	120	800	134,4	134	39



Согласно расчетам, угол наклона бокового вооружения, компенсирующий действие дезориентирующего усилия, в зависимости от выбранных режимов бурения составит для известняка, диорита и сиенита 52, 41 и 39° соответственно.

Заключение

Использование предложенных в статье технических средств позволяет повысить производительность работ по направленному бурению в сложных горно-геологических условиях. Алмазное буровое долото с боковым наклонным вооружением позволит увеличить точность искривления скважин при использовании отклонителей фрезерующего типа с использованием алмазных буровых долот за счет

компенсирования дезориентирующего усилия. Бурение интервалов постановки отклонителей алмазными долотами с эксцентриситетом режущей части торца матрицы будет способствовать некоторому расширению ствола скважины и приведет к созданию геометрии забоя, в котором заклинивание долота при постановке отклонителей непрерывного действия будет исключено. Использование в составе отклонителей фрезерующего типа долота с шарниром позволит в условиях, когда диаметр скважины имеет минимальную разработанность, выполнить искривление скважины без предварительного расширения диаметра и сэкономить время и стоимость работ по направленному бурению.

Список источников

1. Ahmed A., Islam M. A., Alam M. Z., Quazi H. S. Surface settlement induced by horizontal directional drilling // *Underground Space*. 2023. Vol. 8. P. 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.05.001>.
2. Huang W., Wang G., Gao D. A method for predicting the build-up rate of 'push-the-bit' rotary steering system // *Natural Gas Industry B*. 2021. Vol. 8. Iss. 6. P. 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.11.010>.
3. Yantao B., Gonghui L., Ghua D., Jun L. Finite element analysis of effect of flexible pupjoints on push-the-bit rotary steering deflecting force // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020. Vol. 56. P. 218–225. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01132-8>.
4. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. Iss. 11. P. 2055–2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
5. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K. F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. Vol. 119. P. 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.020>.
6. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock // *Measurement*. 2018. Vol. 121. P. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.045>.
7. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 2055–2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
8. Wang W., Geng Y., Wang N., Pu X., Fiaux J. O. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system // *Energies*. 2019. Vol. 12. Iss. 10. P. 1831. <https://doi.org/10.3390/en12101831>.
9. 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. 6. <https://doi.org/10.1155/2014/923178>.
10. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016. P. 1559–1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
11. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods // *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016. P. 1559–1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
12. Шпаро Л. Г., Юдборовский И. М. Искривление скважин под действием постоянной по величине отклоняющей силы // *Методика и техника разведки: сб. статей*. Л., 1964. Вып. 48. С. 47–51.
13. Epikhin A., Zhironkin V., Szurgacz D., Trzop K. 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. Vol. 684. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012001>.
14. Wang M., Li X., Wang G., Huang W., Fan Y., Luo W., et al. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system // *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. P. 4673759. <https://doi.org/10.1155/2020/4673759>.
15. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Оценка влияния абразивности горных пород на параметры породоразрушающих машин // *Записки Горного института*. 2019. Т. 240. С. 621–627. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.621>.
16. Шигин А. О., Шигина А. А. Прогнозируемый ресурс шарошечных долот при бурении сложноструктурных горных массивов // *Вестник Иркутского государ-*



ственного технического университета. 2014. № 1. С. 29–33.

17. Фомин О. ССК: усталостное разрушение буровых труб, его прогнозирование и профилактика // *ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии*. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rogtecmagazine.com/cck-усталостное-разрушение-буровых-тр/?lang=ru> (03.03.2022).

18. Пат. № 190484, Российская Федерация, МПК E21B 10/43, E21B 7/08. Долото для бурения / В. В.

Нескоромных, П. Г. Петенёв, Д. В. Лысаков. Заявл. 06.03.2019; опубл. 02.07.2019. Бюл. № 19.

19. Пат. № 189409, Российская Федерация, МПК E21B 10/62, E21B 7/08. Алмазное долото / В. В. Нескоромных, П. Г. Петенёв, Д. В. Лысаков. Заявл. 11.03.2019; опубл. 22.05.2019. Бюл. № 15.

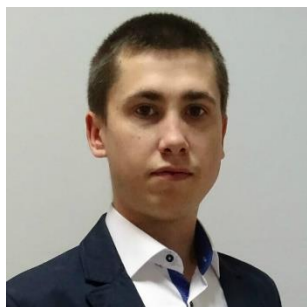
20. Пат. № 198234, Российская Федерация, МПК E21B 10/43, E21B 7/08. Алмазное буровое долото / В. В. Нескоромных, А. Е. Головченко, Д. В. Лысаков. Заявл. 06.02.2020; опубл. 25.06.2020. Бюл. № 18.

References

1. Ahmed A., Islam M. A., Alam M. Z., Quazi H. S. Surface settlement induced by horizontal directional drilling. *Underground Space*. 2023;8:94-108. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2022.05.001>.
2. Huang W., Wang G., Gao D. A method for predicting the build-up rate of 'push-the-bit' rotary steering system. *Natural Gas Industry B*. 2021;8(6):622-627. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.11.010>.
3. Yantao B., Gonghui L., Ghua D., Jun L. Finite element analysis of effect of flexible pupjoints on push-the-bit rotary steering deflecting force. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020;56:218-225. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01132-8>.
4. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114(11):2055-2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
5. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K. F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016;119:224-236. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.10.020>.
6. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*. 2018;121:344-354. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.045>.
7. Gu P., Zhu C., Yu Y., Liu D., Tao Z., Wu Y. Evaluation and prediction of drilling wear based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114:2055-2074. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06887-w>.
8. Wang W., Geng Y., Wang N., Pu X., Fiaux J. O. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system. *Energies*. 2019;12(10):1831. <https://doi.org/10.3390/en12101831>.
9. 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;6. <https://doi.org/10.1155/2014/923178>.
10. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016:1559-1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
11. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods. *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. 2016:1559-1565. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2016.7558796>.
12. Shrago L. G., Well deviation under the action of a constant deflecting force. In: *Metodika i tekhnika razvedki = Exploration Methodology and Technique*. Leningrad; 1964, iss, 48, p. 47–51. (In Russ.).
13. Epikhin A., Zhironkin V., Szurgacz D., Trzop K. 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;684:012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/684/1/012001>.
14. Wang M., Li X., Wang G., Huang W., Fan Y., Luo W., et al. Prediction model of build rate of push-the-bit rotary steerable system. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020:4673759. <https://doi.org/10.1155/2020/4673759>.
15. 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. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2019;240:621-627. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.6.621>.
16. Shigin A. O., Shigina A. A. Roller cone bit life expectancy when drilling complex structure rock massifs. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;1:29-33. (In Russ.).
17. Fomin O. Siberian Service Company: Fatigue failure of drill pipes, its prediction and prevention. *ROGTEC. Rossiiskie neftegazovye tekhnologii = ROGTEC. Russian Oil and Gas Technologies*. 2018. Available from: <https://www.rogtecmagazine.com/cck-усталостное-разрушение-буровых-тр/?lang=ru> [Accessed 3rd March 2022]. (In Russ.).
18. Neskoromnykh V. V., Petenev P. G., Lysakov D. V. *Bore bit*. Patent RF, no. 190484; 2019. (In Russ.).
19. Neskoromnykh V. V., Petenev P. G., Lysakov D. V. *Diamond bit*. Patent RF, no. 189409; 2019. (In Russ.).
20. Neskoromnykh V. V., Golovchenko A. E., Lysakov D. V. *Diamond drill bit*. Patent RF, no. 198234; 2020. (In Russ.).



Информация об авторе / Information about the author



Лысаков Дмитрий Викторович,
аспирант,
ведущий инженер кафедры технологии и техники разведки,
Институт горного дела, геологии и геотехнологий,
Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, Россия,
lysackovd@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9011-5906>.
Dmitry V. Lysakov,
Postgraduate Student,
Leading Engineer of the Department of Exploration Technology and Technique,
Institute of Mining, Geology and Geotechnologies,
Siberian Federal University,
Krasnoyarsk, Russia,
lysackovd@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-9011-5906>.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 17.03.2022; одобрена после рецензирования 06.10.2022; принята к публикации 11.11.2022.

The article was submitted 17.03.2022; approved after reviewing 06.10.2022; accepted for publication 11.11.2022.