

УДК 622.24.05
DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4088
Шифр специальности ВАК: 2.8.1

Анализ условий забуривания нового направления скважины в твердых горных породах съемным отклоняющим комплексом

В.В. Нескоромных¹, И.А. Комаровский¹, Д.В. Лысаков¹,
А.Е. Головченко^{1✉}, М.С. Попова², Л. Баочанг³

¹ Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

² Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

³ Университет Цзилинь, Китай, г. Чанчунь

✉ antong77@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. В настоящее время в практике геологоразведочных работ при необходимости корректировки направления проведения скважин главным образом используются отклонители непрерывного действия. Однако их применение сопряжено с определенными сложностями. Затраты времени на спускоподъемные операции, связанные с необходимостью подготовки скважины к искривлению, спуска отклонителя, проработки интервала искривления и т. д., значительны и непроизводительны. Формируемая кривизна скважины со значениями интенсивности от 1,5 град/м даже после проработки интервала специальными снарядами приводит к риску образования значительных перегибов колонны и потенциальным аварийным ситуациям, в особенности при применении снаряда со съемным керноприемником, ввиду невозможности его использования в скважинах, имеющих интенсивность искривления более 0,1–0,3 град/м. Конструктивные особенности отклонителей и ориентирующих устройств определяют сложности с корректной постановкой и надежным закреплением устройств на забое, нередко случаи отклонения плоскости набора кривизны от проектной. Принимая во внимание вышесказанное, разработка специального технического средства, позволяющего с высокой точностью и умеренной интенсивностью кривизны производить оперативную корректировку направления проведения скважин без подъема буровой колонны с применением комплекса снаряда со съемным керноприемником является актуальной и требующей решения задач.

Цель: оценка силового воздействия на породоразрушающий инструмент при формировании нового направления ствола скважины съемным отклоняющим комплексом; оценка влияния бокового вооружения алмазного инструмента на траекторию забуриваемого ствола скважины; обоснование оптимального расположения вооружения на периферии алмазного породоразрушающего инструмента. **Объект:** механизм формирования нового направления проведения скважины при фрезеровании её стенки. **Методы:** сбор, анализ и обобщение информации о работе отклонителей непрерывного действия, аналитические исследования силового взаимодействия в призабойной зоне при формировании нового направления проведения скважин фрезерованием её стенки. **Результаты.** Приведена оценка временных затрат на непроизводительные технологические операции при корректировке направления проведения скважин с использованием отклонителей непрерывного действия и съемным отклоняющим комплексом; приведена зависимость формируемого отклоняющего усилия при использовании съемного отклоняющего комплекса от физико-механических и геометрических характеристик инструмента, свойств горных пород; приведена зависимость для определения оптимального угла наклона алмазосодержащих штабиков для компенсации дезориентирующего усилия при фрезеровании стенки скважины алмазным породоразрушающим инструментом.

Ключевые слова: бурение, скважина, горная порода, направленное бурение, отклоняющий комплекс

Для цитирования: Анализ условий забуривания нового направления скважины в твердых горных породах съемным отклоняющим комплексом / В.В. Нескоромных, И.А. Комаровский, Д.В. Лысаков, А.Е. Головченко, М.С. Попова, Л. Баочанг // известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 89–99. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4088

UDC 622.24.05

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4088

Analysis of conditions for drilling a new direction of a well in solid rocks with a removable deflecting complex

V.V. Neskoromnykh¹, I.A. Komarovskiy¹, D.V. Lysakov¹,
A.E. Golovchenko^{1✉}, M.S. Popova², L. Baochang³

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

² Yurga State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

³ Jilin University, Changchun, China

✉ antong77@yandex.ru

Abstract. Relevance. Currently, in the practice of geological exploration, if the adjustments to well direction is required, the continuous action deflectors are mainly used. However, their application is fraught with certain difficulties. The time spent on lifting operations associated with the need to prepare the well for curvature, deflector descent, study of the curvature interval, etc. are significant and unproductive. The formed curvature of the well with intensity values from 1.5 degrees/m, even after working through the interval with special projectiles, leads to the risk of significant column bends and potential emergencies, especially when using a projectile with a removable core receiver, due to the impossibility of its use in wells with a curvature intensity of more than 0.1–0.3 degrees/m. The design features of the deflectors and orienting devices determine the difficulties with the correct setting and reliable fixing of the devices on the face, there are frequent cases of deviation of the curvature set plane from the design one. Taking into account the above, the development of a special technical tool that allows with high accuracy and moderate intensity of curvature making operational adjustments to the direction of wells without lifting the drilling column using the removable core receiver complex is an urgent and demanding task. **Aim.** To assess the force effect on the rock-cutting tool during the formation of a new direction of the borehole by a removable deflecting complex; assess the influence of the side armament of the diamond tool on the trajectory of the drilled borehole; justify the optimal location of the armament on the periphery of the diamond rock-cutting tool. **Object.** Mechanism of formation of a new well direction during milling its wall. **Methods.** Collection, analysis and generalization of information about the operation of continuous action deflectors, analytical studies of force interaction in the bottomhole zone when forming a new direction of wells by milling its wall. **Results.** The paper introduces the estimate of the time spent on unproductive technological operations when adjusting the direction of wells using continuous action deflectors and a removable deflecting complex. The authors have described the dependence of the formed deflecting force when using a removable deflecting complex on the physico-mechanical and geometric characteristics of the tool, properties of rocks. The paper introduces the dependence to determine the optimal angle of inclination of diamond-cutting stacks to compensate the disorienting force when milling the well wall with a diamond rock-cutting tool.

Keywords: drilling, well, rock, directional drilling, deflecting complex

For citation: Neskoromnykh V.V., Komarovskiy I.A., Lysakov D.V., Golovchenko A.E., Popova M.S., Baochang L. Analysis of conditions for drilling a new direction of a well in solid rocks with a removable deflecting complex. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 89–99. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4088

Введение

При производстве геологоразведочных работ главным источником фактической информации о структурно-текстурных особенностях, форме и параметрах залегания, элементном составе полезного ископаемого является разведочное колонковое бурение с отбором керна комплексами со съемным керноприемником (ССК) [1–3]. Однако в процессе бурения нередко встречаются случаи ухода траектории скважины от запланированной под действием большого количества случайных факторов, обусловленных особенностями геологического строения массива горных пород и работы бурового ин-

струмента в скважине, как следствие скважина перестает попадать в круг допуска и возникает необходимость корректировки ее направления [4–7].

Для возврата траектории скважин в круг допуска могут использоваться специальные технические средства – отклонители. В геологоразведочном бурении наиболее распространены отклонители непрерывного действия (ОНД), например, ТЗ-3 и его модификация ТЗ-3П; «КЕДР»; СБС-59; ОБС-76 и др. [8–10]. В настоящее время при бурении на твердые полезные ископаемые наиболее эффективным и активно используемым способом сооружения скважин является алмазное колонковое бурение с примене-

нием ССК. Следует учитывать, что допустимые значения интенсивности искривления для серийно изготавливаемых труб ССК типоразмеров ВQ, NQ и HQ находятся в диапазоне 0,1–0,3 град/м, что обуславливает необходимость последующей проработки интервала искривления при применении ОНД с целью уменьшения кривизны траектории скважин, так как она негативно влияет на механическую скорость бурения и повышает риск обрыва буровой колонны [11–13].

Помимо вышеуказанного, серьезным ограничением применения ОНД в практике геологоразведочных работ является необходимость проведения спускоподъемных операций (СПО) и соответствующие значительные временные затраты на работы по направленному бурению скважин. При использовании ОНД существует необходимость подъема буровой колонны с целью установки отклонителя и спуска на интервал искривления. Также следует учитывать, что перед спуском отклонителя зачастую требуется подготовка ствола скважины в интервале постановки ОНД, что приводит к дополнительным временным издержкам [14–16]. Помимо этого, после формирования пилот-скважины интервалу искривления потребуется проработка, для чего необходимо заменить низ буровой компоновки с отклонителя на специальный снаряд для проработки интервала. В завершении работ по направленному бурению замена специального снаряда на стандартный колонковый набор также обуславливает дополнительный цикл СПО.

Затраты времени на проведение СПО при использовании отклонителей непрерывного действия можно оценить исходя из следующей зависимости:

$$t_1 = K \cdot H \cdot n,$$

где K – время, затрачиваемое на спуск–подъем одного метра буровой колонны, ч/м ($K=2 \cdot 10^{-3}$); H – глубина бурения, м; n – число СПО.

Соответственно, при необходимости корректировки направления проведения скважины и выбора ОНД как средства достижения поставленной задачи затраты времени на выполнение непроизводительных технологических операций, сформированных главным образом необходимостью проведения дополнительных циклов СПО, будут расти прямо пропорционально увеличению глубины скважины [17].

Помимо отклонителей непрерывного действия, которые на сегодняшний день используются в геологоразведочном производстве и конструкции которых в большинстве разработаны полвека назад на соответствующем техническом уровне, известен и используется снаряд DeviDrill компании Devico.

Снаряд DeviDrill имеет неоспоримые преимущества относительно ОНД, применяясь со снаря-

дом ССК типоразмера NQ и позволяя в процессе корректировки направления проведения скважины (с интенсивностью искривления 0,3 град/м) отбирать керн диаметром 31,5 мм. К недостаткам данного отклонителя можно отнести затраты времени на СПО, связанные с заменой низа компоновки буровой колонны, меньший диаметр керна по сравнению со стандартным типоразмером ССК. Также к недостаткам можно отнести то, что проведение работ по искусственному искривлению является услугой компании Devico без возможности приобретения данного устройства.

Основываясь на вышеперечисленном, разработка специального съемного отклоняющего комплекса, позволяющего производить оперативную корректировку направления проведения скважин без подъема буровой колонны при применении комплекса ССК с интенсивностью набора кривизны, не превышающей 0,1–0,3 град/м, является актуальной и требующей поиска современных методов решения задачи.

Принцип работы съемного отклоняющего комплекса и оценка затрат времени на спускоподъемные операции

Согласно сформированной цели работ в рамках обозначенной актуальности была разработана и запатентована конструкция съемного отклоняющего комплекса, способного осуществлять корректировку траектории скважины с малой интенсивностью искривления без подъема буровой колонны [18].

Съемный отклоняющий комплекс состоит из трёх основных узлов: ориентатор – 1, устанавливающий комплекс под определенным азимутальным углом за счет эксцентриситета центра масс поперечного сечения в скважинах с зенитным углом от 3° (по принципу работы самоориентатора ОП, использующегося совместно с ОНД ТЗ-3П, «Кедр» и т. д.), узел блокирования – 2 и отклоняющий узел – 3 (рис. 1).

Отклоняющий узел включает в себя шарнир – 4, связывающий направляющий шток – 5 с корпусом отклоняющего узла – 6 и фиксирующий угол его смещения. На нижнем торце направляющего штока закреплен профильный башмак – 7, оснащенный резами – 8 для предотвращения изменения направления искривления скважины в процессе работы комплекса. Для снижения влияния динамических нагрузок на конструкцию и обеспечения продольного перемещения стандартного внешнего снаряда ССК – 9 относительно съемного отклоняющего комплекса в процессе работы служит пружина сжатия – 10. Центрирование и закрепление нижней части съемного отклоняющего комплекса обеспечивается фиксирующей втулкой – 11, име-

ющей в поперечном сечении промывочные каналы. Площадь промывочных каналов фиксирующей втулки равна площади зазора между коронкой и кернорвательным стаканом в стандартном исполнении комплекса ССК.

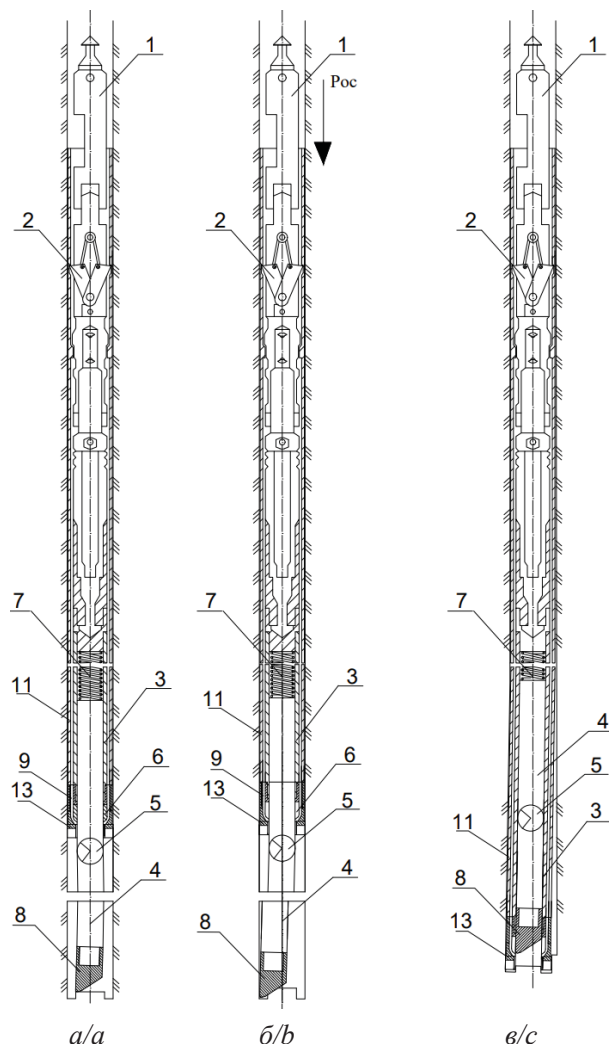


Рис. 1. Принцип работы съемного отклоняющего комплекса: а) постановка отклонителя на забой; б) отклонение штока под действием осевого усилия; в) процесс корректировки направления проведения скважины: 1 – ориентатор; 2 – механизм блокирования; 3 – корпус отклоняющего узла; 4 – направляющий шток; 5 – шарнир; 6 – фиксирующая втулка; 7 – пружина сжатия; 8 – профильный башмак; 9 – промывочные каналы; 10 – породоразрушающий инструмент 11 – буровая труба

Fig. 1. Principle of operation of the removable deflecting complex: а) setting the deflector on the well bottom; б) deflection of the guide rod under the action of axial force; в) adjusting the direction of the well: 1 – orientator; 2 – locking mechanism; 3 – deflecting assembly housing; 4 – guide rod; 5 – hinge; 6 – locking sleeve; 7 – compression spring; 8 – profile shoe; 9 – flushing channels; 10 – rock cutting tool; 11 – drill pipe

Принцип работы съемного отклоняющего комплекса следующий (рис. 1). На первом этапе на поверхности ориентатор фиксируют на установочный угол для соблюдения проектного направления искривления скважины. Затем извлекается керноприемник, а колонна буровых труб поднимается над забоем на величину, равную длине направляющего штока. Затем комплекс с помощью овершота опускается на забой, в процессе спуска самоориентируясь в азимутальной плоскости за счет эксцентриситета центра масс, и, достигнув проектного положения, на месте фиксации керноприемника, закрепляется посредством механизма блокирования. Благодаря скосу нижнего торца профильного башмака под действием осевого усилия направляющий шток отклоняется относительно оси скважины, упираясь и закрепляясь острием башмака в сопряжение стенки скважины и забоя в направлении, соответствующем проектному направлению искривления скважины. На этом процесс установки съемного отклоняющего комплекса завершается.

Следующий этап – формирование нового направления проведения скважины – производится при умеренных технологических режимах. В процессе бурения, за счет отклонения направляющего штока, буровая коронка фрезерует стенку скважины. Процесс завершается при углублении породоразрушающего инструмента на величину, равную сумме длины направляющего штока и высоты алмазосодержащей матрицы для того, чтобы, с одной стороны, сформировать проектный ориентированный перегиб забойной части буровой колонны, а с другой – обеспечить последующую беспрепятственную постановку керноприемника на свое посадочное место для продолжения процесса бурения.

Для оценки затрат времени на СПО при использовании отклонителей непрерывного действия и съемного отклоняющего комплекса воспользуемся зависимостью для определения затрат времени на транспортировку оборудования стандартной лебедкой ССК [17]:

$$t_2 = C \cdot H \cdot n, \quad (1)$$

где C – время, затрачиваемое на спуск–подъем одного метра троса лебедкой ССК, ч/м ($C=0,2 \cdot 10^{-3}$).

Согласно представленной зависимости (1), при проведении работ по корректировке направления проведения скважины скорость транспортировки съемного отклоняющего комплексакратно выше скорости транспортировки ОНД, определяя значительно меньшие временные издержки при использовании первого. Также за счет малой величины интервала искривления съемным отклоняющим комплексом и подбора направляющего штока длины, обуславливающей формирование кривизны скважины, не превышающей максимально допу-

стимых значений для соответствующих типоразмеров бурильных труб ССК, последующая проработка интервала искривления не требуется. Что касается непосредственно затрат времени на формирование нового направления скважины – они сопоставимы при использовании как ОНД, так и съемного отклоняющего комплекса, так как в обоих случаях процесс производится на умеренных технологических режимах.

Результаты расчета затрачиваемого времени на СПО отклонителем непрерывного действия t_1 и съемным отклоняющим комплексом t_2 представлены в табл. 1.

Таблица 1. Оценка времени, затрачиваемого на СПО при применении ОНД и съемного отклоняющего комплекса, отнесенного к глубине скважины

Table 1. Estimation of the time spent on descent and lifting operations when using continuous deflection complex and a removable deflecting complex related to the depth of the well

Глубина H , м/Depth H , m	400	600	800	1000	1200	1400
Время t_1 , ч/Time t_1 , h	4,8	7,2	9,6	12	14,4	16,8
Время t_2 , ч/Time t_2 , h	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56

Оценка силового воздействия при формировании нового направления ствола скважины

Принцип работы съемного отклоняющего комплекса, реализующего набор кривизны за счет фрезерования стенки скважины породоразрушающим инструментом при его поступательном движении по отклоненному от осевого положения направляющему штоку, предопределяет возникновение сил, соотношение которых определяет механизм набора кривизны.

Смещение породоразрушающего инструмента от оси скважины происходит под действием отклоняющей силы, формируемой под действием осевой нагрузки и горизонтальной реакции в точке опоры на направляющий шток (рис. 2):

$$P_{от} = P_r - N_r - P_y,$$

где P_r – горизонтальная реакция со стороны стенки скважины, Н; N_r – горизонтальная реакция со стороны опоры буровой коронки на штоке, Н; P_y – упругая реакция при изгибе колонкового набора, Н.

Вопрос формирования горизонтальной реакции горной породы рассматривался в работе [17]:

$$P_r = \frac{P_{oc}K}{(K+1)\operatorname{tg}\gamma(1+\operatorname{tg}\varphi)},$$

$$N_r = \frac{P_{oc}(K-1)}{(K+1)\operatorname{tg}\gamma},$$

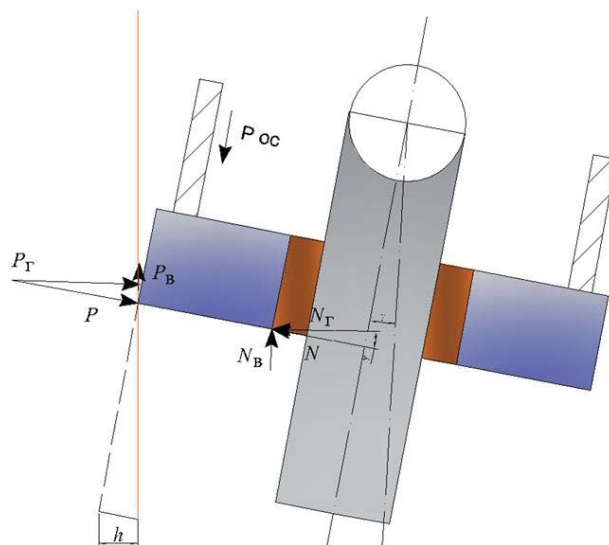


Рис. 2. Схема силового взаимодействия при формировании нового направления ствола скважины съемным отклоняющим комплексом

Fig. 2. Scheme of force interaction when forming a new direction of a borehole by a removable deflecting complex

где P_{oc} – осевая нагрузка на инструмент, Н; K – соотношение модулей упругости горной породы и материала втулки между штоком и коронкой отбурочного набора; φ – угол внутреннего трения горной пород при деформации в момент силового воздействия и разрушения, град; γ – угол наклона штока, град.

Упругая реакция P_y определяется как:

$$P_y = \frac{\pi^2 EJ (D_c - d_k)}{0,25l^3},$$

где EJ – жесткость буровой компоновки (наружной трубы колонкового набора – произведение модуля упругости стали E и осевого момента инерции поперечного сечения трубы колонкового набора J), Н·м²; D_c – диаметр скважины, м; d_k – диаметр колонкового набора, м; l – длина отбурочного набора (нижняя часть колонковой трубы), формирующая отклонение вдоль штока (равна сумме длины направляющего штока и высоты алмазосодержащей матрицы), м.

После преобразований формула расчёта $P_{от}$ принимает вид:

$$P_{от} = \frac{P_{oc}K}{(K+1)\operatorname{tg}\gamma(1+\operatorname{tg}\varphi)} - \frac{P_{oc}(K-1)}{(K+1)\operatorname{tg}\gamma} - \frac{\pi^2 EJ (D_c - d_k)}{0,25l^3} =$$

$$= \frac{P_{oc}}{(K+1)\operatorname{tg}\gamma} \left[\frac{K}{1+\operatorname{tg}\varphi} - (K-1) \right] - \frac{\pi^2 EJ (D_c - d_k)}{0,25l^3}.$$

Из полученной зависимости следует, что в начальный момент формирования нового направления проведения скважины со стороны ее стенки будет действовать максимальная реакция, уменьшающаяся по мере увеличения ширины уступа и отклонения оси нового направления скважины от изначального.

В начальный момент формирования нового направления скважины на торец буровой коронки будет оказывать действие опрокидывающий момент M , который ориентирует коронку в направлении увеличения угла забуривания γ . Этот момент равен:

$$M_n = P_{oc}R(1 - \operatorname{tg}\varphi),$$

где R – радиус коронки, м.

При этом в процессе увеличения ширины уступа (рис. 3) центр тяжести опирания коронки на забуриваемый уступ шириной h будет смещаться в сторону центра торца коронки, и момент M несколько снизится. Его величина в зависимости от ширины уступа h будет равна:

$$M = P_{oc}(R - h)(1 - \operatorname{tg}\varphi).$$

Согласно представленным теоретическим зависимостям, были произведены расчеты отклоняющего усилия $P_{от}$ в различных по твердости горных породах, жесткость буровой компоновки EJ принята для стальных труб диаметром 73 мм. Расчетные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения отклоняющего усилия при изменении длины направляющего штока

Table 2. Calculated values of the deflecting force when changing the length of the guide rod

Известняк/Limestone		Диорит/Diorite		Сиенит/Syenite	
$l, \text{ м/м}$	$P_{от}, \text{ Н/Н}$	$l, \text{ м/м}$	$P_{от}, \text{ Н/Н}$	$l, \text{ м/м}$	$P_{от}, \text{ Н/Н}$
0,66	-2133	0,7	197	0,72	-2114
0,68	111	0,72	1978	0,74	-521
0,7	2107	0,74	3571	0,76	908
0,72	3888	0,76	5001	0,78	2195
0,74	5481	0,78	6288	0,8	3357

После анализа полученных данных был выделен ряд зависимостей, которые оказывают прямое влияние на результативность искривления съемным отклоняющим комплексом. Во-первых, можно отметить прямую зависимость отклоняющего усилия от длины штока отклонителя, во-вторых, в различных по физико-механическим свойствам горных породах оптимальная длина направляющего штока индивидуальна и требует расчета. Так, например, в известняках, согласно расчетам, длина штока при использовании комплекса должна превышать 0,68 м. Несоблюдение этого условия при искривлении скважины приведет к тому, что силы, действующие со стороны горной породы и препятствующие

забуриванию в стенку скважины, будут превышать нагрузку, которую может выдержать шток, что приведет к его поломке и выходу отклонителя из строя.

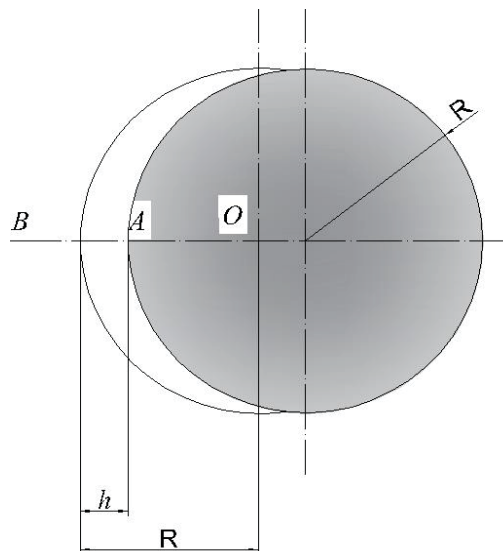


Рис. 3. Схема забоя после формирования уступа
Fig. 3. Scheme of the face after ledge formation

Помимо представленных сил, действующих на шток, следует учитывать силы, действующие на вооружение алмазного инструмента, которые также способны оказывать существенное влияние на точность искривления скважины.

Механизм повышения точности формирования нового направления скважины при фрезеровании стенки скважины

В связи с тем, что отклоняющий комплекс реализует искривление за счет фрезерования стенки скважины под действием отклоняющего усилия, а угол встречи бокового вооружения со стенкой скважины очень мал, можно сказать, что принцип работы комплекса аналогичен механизму набора кривизны, свойственному отклонителям непрерывного действия фрезерующего типа, а значит подвержен тем же недостаткам. Например, к таковым относится смещение плоскости набора кривизны от запланированной вследствие появления дезориентирующей силы на породоразрушающем инструменте при разрушении горной породы и момента, вызванного действием отклоняющей силы со стороны долота на стенку скважины [17, 19, 20].

В процессе искривления скважины съемным отклоняющим комплексом на этапе забуривания в стенку скважины и формирования уступа существует вероятность смещения штока отклонителя в сторону, противоположную вращению породоразрушающего инструмента, которое вызвано появлением

нием дезориентирующего усилия P_d , что приведет к потере ориентации снаряда и уходу траектории скважины от запланированной. Усилие P_d обусловлено сопротивлением разрушению горной породы резцами, контактирующими со стенкой скважины, и имеет тем большую величину, чем выше значения отклоняющей силы $P_{от}$ (рис. 4).

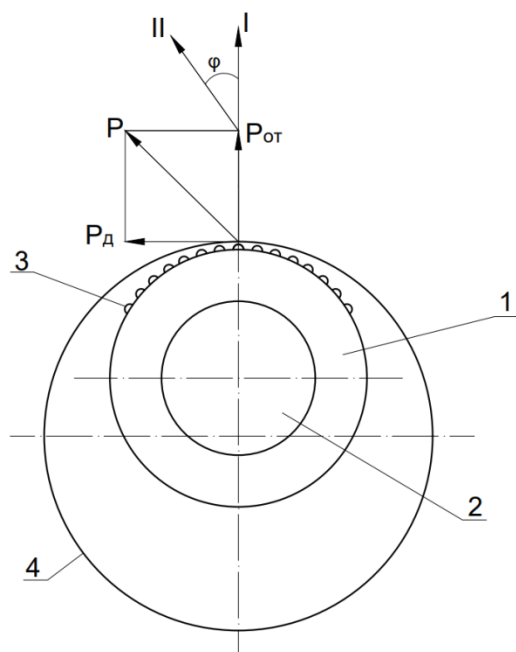


Рис. 4. Схема, поясняющая процесс смещения траектории скважины в сторону дезориентирующего усилия: 1 – породоразрушающий инструмент, 2 – шток отклонителя, 3 – боковое вооружение алмазного инструмента, 4 – стенка скважины

Fig. 4. Diagram explaining a well trajectory shifting towards disorienting force: 1 – rock-destroying tool, 2 – deflector rod, 3 – side armament of the diamond tool, 4 – well wall

Совместное действие усилия P_d и $P_{от}$ приводит к появлению реактивного момента, направленного параллельно результирующей P . В результате будет происходить смещение заданной плоскости набора кривизны I при постановке задачи в направлении искривления II на угол φ (рис. 4).

Для решения проблемы смещения плоскости набора кривизны от проектной под действием дезориентирующего усилия разработана конструкция породоразрушающего инструмента со специальной геометрией бокового вооружения.

Конструкция включает присоединительную резьбу, корпус, матрицу, имеющую на боковой поверхности наклонные алмазосодержащие штабики (рис. 5), причем угол их наклона определяется индивидуально, исходя из показателей физико-

механических свойств горных пород, слагающих массив, режимных параметров бурения, геометрических параметров забойного инструмента и т. д.



Рис. 5. Разработанная конструкция алмазного породоразрушающего инструмента: $P_{ос}$ – осевая нагрузка на инструмент, Н; P_d – дезориентирующее усилие, Н; $P_{откл}$ – отклоняющее усилие, Н; P_r – результирующее усилие, Н

Fig. 5. Developed design of a diamond rock-breaking tool; $P_{ос}$ – axial load on the tool, N; P_d – disorienting force, N; $P_{откл}$ – deflecting force, N; P_r – resultant force, N

Отклонение плоскости набора кривизны φ вследствие действия дезориентирующего усилия определяется как:

$$\varphi = \arctg \frac{P_d}{P_{от}}$$

Условием формирования проектного направления искривления скважины как съёмным отклоняющим комплексом, так и отклонителями непрерывного действия фрезерующего типа с использованием алмазного породоразрушающего инструмента, является полная компенсация дезориентирующего усилия P_d . Так как оно является сопротивлением разрушению горной породы резцами, контактирующими со стенкой скважины, дезориентирующее усилие, согласно приведенной в работе [17] зависимости усилия резания-скалывания горных пород алмазным резцом, определяется как:

$$P_d = \frac{\pi \cdot (h + 0.25\sqrt{d \cdot h})^2 \cdot n_b}{2\gamma\gamma_{ск}} \cdot \sigma_{ск} + P_{от} \cdot \mu = P_a + P_{от} \cdot \mu,$$

где P_a – усилие резания–скалывания горной породы алмазным резцом, даН; h – глубина внедрения алмазного резца в породу, мм; d – диаметр алмазного резца, мм; n_6 – количество прижатых к стенке скважины боковых алмазных резцов; $\gamma_{ск}$ – угол скалывания породы перед передней гранью резца, градус; $\sigma_{ск}$ – предел прочности горной породы на скалывание, даН/мм²; μ – коэффициент трения алмазного резца о породу.

Глубина внедрения алмазного резца в породу может быть рассчитана из следующей зависимости [17]:

$$h = 0,5d - \sqrt{0,25d^2 - \frac{P_{от}}{\pi \cdot p_{ш} \cdot (1 + \operatorname{tg} \varphi_n)'}}$$

где $p_{ш}$ – твердость горной породы, даН/мм²; φ_n – угол внутреннего трения горной породы, градус.

Механизм работы породоразрушающего инструмента с наклонным расположением алмазосодержащих штабиков на боковой поверхности определяется силовым взаимодействием торцевых n_t и боковых n_6 алмазных резцов с горной породой под действием осевого $P_{ос}$ и отклоняющего $P_{от}$ усилий. С учетом того, что часть осевого усилия $P_{ос}$ компенсируется силой прижатия резцов, на каждый торцевой и боковой алмазный резец будет действовать усилие P_i , определяемое как (рис. 6):

$$P_i = \frac{P_{ос} + P_{откл} \cdot \mu}{n_t + n_6},$$

где $P_{ос}$ – осевое усилие, даН; n_t – количество торцевых алмазных резцов.

Осевому внедрению алмазных резцов в штабике долота препятствует реакция разрушаемой горной породы P_c , направленная от породы в направлении резцов, определяющих геометрию наклонного штабика. С учетом того, что сопротивление со стороны твердой горной породы вызвано в основном ее упругими реакциями, которые могут быть выражены через коэффициент внутреннего трения $\operatorname{tg} \varphi$, на все боковые резцы, прижатые к стенке скважины, отклоняющей силой действует усилие сопротивления:

$$P_c = n_6 \cdot P_i (1 - \operatorname{tg} \varphi).$$

Ввиду наклонного расположения алмазосодержащих штабиков на боковом торце породоразрушающего инструмента реакция разрушаемой горной породы P_c может быть представлена как горизонтальная составляющая P_r , с учетом угла наклона γ имеющая вид:

$$\begin{aligned} P_r &= P_c \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma = \\ &= n_6 \cdot P_i (1 - \operatorname{tg} \varphi) \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma = \\ &= \frac{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi) \cdot \sin 2\gamma}{2(n_t + n_6)}. \end{aligned}$$

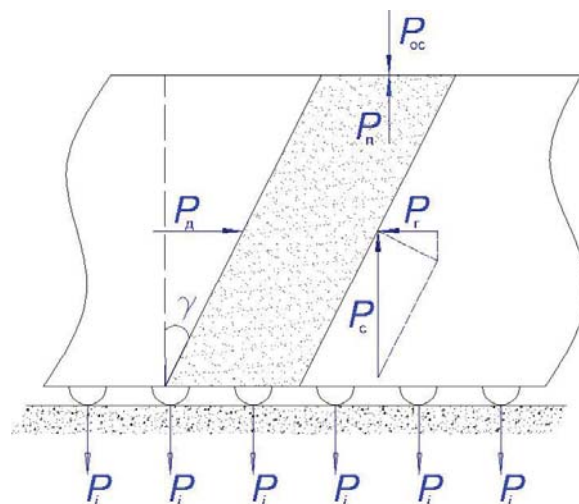


Рис. 6. Схема силового воздействия на наклонный алмазосодержащий штабик в процессе работы: P_d – дезориентирующее усилие, Н; P_c – реакция разрушаемой горной породы, Н; P_r – горизонтальная составляющая реакции разрушаемой горной породы, Н; γ – угол наклона штабика, град; $P_{ос}$ – осевая нагрузка, даН; P_i – сила, действующая на резец, Н

Fig. 6. Scheme of force action on an inclined diamond-bearing stack during operation: P_d – disorienting force, N; P_c – reaction of the destroyed rock, N; P_r – horizontal component of the reaction of the destroyed rock, N; γ – angle of inclination of the stack, deg; $P_{ос}$ – axial load, daN; P_i – force, acting on the cutter, N

Согласно схеме, представленной на рис. 4, для обеспечения искривления ствола скважины фрезированием её стенки (при использовании съемного отклоняющего комплекса разработанной конструкции и отклонителей непрерывного действия) в проектом направлении необходимо исключить возникновение угла отклонения плоскости набора кривизны φ путем компенсации дезориентирующего усилия P_d горизонтальной составляющей реакции разрушаемой горной породы P_c , величину которой возможно регулировать изменением угла наклона алмазосодержащих штабиков:

$$\begin{aligned} P_a + P_{откл} \cdot \mu &= \\ &= \frac{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi) \cdot \sin 2\gamma}{2(n_t + n_6)}. \end{aligned}$$

Следовательно, оптимальная величина γ может быть определена как

$$\gamma = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2(n_t + n_6) \cdot (P_p + P_{откл} \cdot \mu)}{n_6 \cdot (P_{ос} - P_{откл} \cdot \mu) \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi)}.$$

Согласно представленным теоретическим зависимостям, были произведены расчеты оптимального угла наклона алмазосодержащих штабиков γ при различных параметрах режима бурения, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения углов наклона алмазо-содержащих штабиков, компенсирующее дезориентирующее усилие при фрезеровании стенки скважины

Table 3. Calculated values of the angles of inclination of diamond-containing stacks that compensate the disorienting force when milling the well wall

Р _{откл.} даН daN	Известняк Limestone			Диорит/Diorite			Сиенит/Syenite		
	Р _{ос.} кН kN	Р _{д.} даН daN	γ, град deg	Р _{ос.} кН kN	Р _{д.} даН daN	γ, град deg	Р _{ос.} кН kN	Р _{д.} даН daN	γ, град deg
60	10	44,04	15,11	10	40,58	16,95	10	37,21	23,32
70		51,38	17,99		47,34	20,32		43,42	29,03
80		58,72	21,12		54,11	24,07		49,62	38,01
90		66,06	24,61		60,86	28,49		55,82	–
100		73,39	28,67		67,63	34,41		62,02	–

Таким образом, угол наклона бокового вооружения γ , полностью компенсирующий действие дезориентирующего усилия P_d , для устранения угла отклонения плоскости набора кривизны при фрезеровании стенки скважины имеет прямую зависимость от создаваемого отклоняющего усилия, и тем он выше, чем выше твердость горных пород, в которых производятся работы по корректировке направления ствола скважины.

Заключение

Разработка съемного отклоняющего комплекса – актуальная задача в практике проведения геолого-разведочных работ, решение которой позволит повысить точность выполнения геологического задания, значительно уменьшить процент забракованных скважин и увеличить экономическую эффективность геологоразведочного бурения.

Оптимальная область применения съемного отклоняющего комплекса разработанной конструкции для использования со стандартным снарядами ССК – скважины с зенитным углом величиной от 3° без ограничений по предельной глубине использования и типу пород, слагающих проектный разрез.

Основные выводы по результатам проведенного исследования:

- применение съемного отклоняющего комплекса разработанной конструкции по сравнению с промышленными моделями отклонителей непрерывного действия позволяет значительно снизить время на проведение операций по кор-

ректировке направления проведения скважин за счет меньшего количества необходимых циклов спускоподъемных операций;

- отклоняющее усилие, возникающее при формировании нового направления проведения скважины с использованием съемного отклоняющего комплекса разработанной конструкции обуславливается силовым воздействием на породоразрушающий инструмент со стороны точки его опоры на направляющий шток, горизонтальной реакции со стороны стенки скважины и упругой реакции, возникающей при изгибе колонкового набора;
- длина направляющего штока съемного отклоняющего комплекса разработанной конструкции оказывает влияние на формируемое отклоняющее усилие, причем оптимальная величина длины направляющего штока зависит от физико-механических свойств горных пород, материала исполнения конструктивных элементов комплекса и диаметра бурения;
- при корректировке направления проведения скважины за счет фрезерования её стенки под действием отклоняющего усилия с использованием съемного отклоняющего комплекса происходит смещение заданной плоскости искривления, обусловленное возникновением дезориентирующего усилия, направленного против направления вращения и обусловленного сопротивлением резанию–скалыванию горной породы резцами, прижатыми к стенке скважины;
- повышение точности работ по корректировке направления проведения скважин за счет компенсации формируемого сопротивлением резанию–скалыванию горной породы резцами, прижатыми к стенке скважины, дезориентирующего усилия возможно с помощью породоразрушающего инструмента с наклонным расположением алмазосодержащих штабиков на боковой поверхности;
- оптимальный угол наклона алмазосодержащих штабиков на боковой поверхности породоразрушающего инструмента, компенсирующий за счет горизонтальной составляющей реакции разрушаемой горной породы дезориентирующее усилие, увеличивается по мере увеличения отклоняющего и дезориентирующего усилий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system / Wang Weiliang, Geng Yanfeng, Wang Ning, Pu Xiaojiao, Joice de Oliveira Fiaux // Energies. – 2019. – № 12. – P. 1–20.

5. Tianshou Ma, Ping Chen, Jian Zhao Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. – 2016. – Vol. 2. – № 4. – P. 365–395.
6. Bashir B., Piaskowy M., Alusta G. Overview on directional drilling wells // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 16. – № 22. – P. 2305–2316.
7. Петенев П.Г. Исследование и совершенствование компоновки бурильной колонны для повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2016. – 179 с.
8. Сулакшин С.С., Кривошеев В.В., Рязанов В.И. Методическое руководство по направленному бурению геологоразведочных скважин. – М.: Изд-во «Недра», 1978. – 186 с.
9. Морозов Ю.Т., Мочуловский А.М. Механизм искусственного искривления скважин скользящими отклонителями непрерывного действия // *Записки Горного Института*. – 2017. – Т. 170. – № 1. – С. 33–36.
10. Еловых П.Ф. Совершенствование забуривания новых направлений в открытом стволе скважины с искусственного забоя: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2021. – 146 с.
11. 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. – Vol. 114 (11). – P. 2055–2074.
12. 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. – Vol. 2020. – P. 1–9.
13. Prediction of drill bit breakage using an infrared sensor / M.-J. Jeong, S.-W. Lee, W.-K. Jang, H.-J. Kim, Y.-H. Seo, B.-H. Kim // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 1–13.
14. Васильев С.И., Милосердов Е.Е., Тряпичкин М.А. Технологические приемы забуривания дополнительных направлений с искусственных забоев в необсаженных стволах скважин // *Горная промышленность*. – 2016. – Т. 128. – № 4. – С. 73–76.
15. Morenov V., Leusheva E. Development of drilling mud solution for drilling in hard rocks // *International journal of engineering, transactions A: basics. Materials and Energy Research Center*. – 2017. – Vol. 30. – № 4. – P. 620–626.
16. 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.
17. Нескоромных В.В., Лысаков Д.В. Разработка технологий и средств забуривания дополнительных стволов скважин с искусственного забоя отклонителями непрерывного действия в твердых и очень твердых горных породах // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 2020. – № 2. – С. 86–94.
18. Устройство для направленного бурения скважин: пат. Рос. Федерация, № 2714998, заявл. 28.12.2018; опубл. 21.02.2020. Бюл. № 6. – 5 с.
19. Разработка алмазного бурового долота для направленного бурения / В.В. Нескоромных, П.Г. Петенёв, Д.В. Лысаков, М.С. Попова, А.Е. Головченко, Лиу Баочанг // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 116–125.
20. Алмазное буровое долото: пат. Рос. Федерация, № 198234, заявл. 06.02.2020; опубл. 25.06.2020. Бюл. № 18. – 5 с.

Информация об авторах

Вячеслав Васильевич Нескоромных, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. sovair@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8922-0779>

Игорь Андреевич Комаровский, аспирант кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. igorkomarovskij702@gmail.com

Дмитрий Викторович Лысаков, аспирант кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. Lysackovd@yandex.ru

Антон Евгеньевич Головченко, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института цветных металлов Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. antong77@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7069-6483>

Марина Сергеевна Попова, кандидат технических наук, доцент высшей нефтяной школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 6. alleniram83@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1462-8339>

Лиу Баочанг, профессор геоинженерии кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь, Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938. liubc@jlu.edu.cn, <http://orcid.org/0000-0002-0185-3684>

Поступила в редакцию: 17.02.2024

Поступила после рецензирования: 07.05.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. 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.

2. 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.
3. 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, vol. 240, pp. 621–627.
4. Weiliang Wang, Yanfeng Geng, Ning Wang, Xiaojiao Pu, Joice de Oliveira Fiaux. Toolface control method for a dynamic point-the-bit rotary steerable drilling system. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 1–20.
5. Tianshou Ma, Ping Chen, Jian Zhao. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 365–395.
6. Bashir B., Piaskowy M., Alusta G. Overview on directional drilling wells. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, vol. 16, no. 22, pp. 2305–2316.
7. Petenev P.G. *Research and improvement of the layout of the drill string to improve the efficiency of drilling exploration wells*. Cand. Diss. Tomsk, 2016. 179 p. (In Russ.)
8. Sulakshin S.S., Krivosheev V.V., Ryazanov V.I. *Guidelines for directional drilling of exploration wells*. Moscow, Nedra Publ., 1978. 186 p. (In Russ.)
9. Morozov Yu.T., Mochulovskiy A.M. Mechanism of artificial curvature of wells by sliding deflectors of continuous action. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2017, vol. 170, no. 1, pp. 33–36. (In Russ.)
10. Elovkykh, P.F. *Improvement of drilling of new directions in an open borehole from an artificial face*. Cand. Diss. Moscow, 2021. 146 p. (In Russ.)
11. 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.
12. 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.
13. Jeong M.-J., Lee S.-W., Jang W.-K., Kim H.-J., Seo Y.-H., Kim B.-H. Prediction of Drill Bit Breakage Using an Infrared Sensor. *Sensors*, 2021, vol. 21, pp. 1–13.
14. Vasil'ev S.I., Miloserdov E.E., Trjapichkin M.A. Technological techniques for drilling additional directions from artificial faces in unsettled boreholes. *Russian Mining Industry*, 2016, vol. 128, no. 4, pp. 73–76.
15. Morenov V., Leusheva E. Development of drilling mud solution for drilling in hard rocks. *International journal of engineering, transactions A: basics. Materials and Energy Research Center*, 2017, vol. 30, no. 4, pp. 620–626.
16. 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.
17. Neskromnykh V.V., Lysakov D.V. Development of technologies and tools for drilling additional wells from artificial bottom-hole with whipstock of continuous action in hard and very hard rocks. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2020, no. 2, pp. 86–94. (In Russ.)
18. Neskromnykh V.V., Komarovskiy I.A. *Device for directional drilling of wells*. Patent RF, no. 2714998, 2020. (In Russ.)
19. Neskromnykh V.V., Petenev P.G., Lysakov D.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Baochang Liu. Development of diamond drilling bit for directional drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 116–125. (In Russ.)
20. Neskromnykh V.V., Golovchenko A.E., Lysakov D.V. *Diamond drill bit*. Patent RF, no. 198234, 2020. (In Russ.)

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskromnykh, Dr. Sc., Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. sovair@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8922-0779>

Igor A. Komarovskiy, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. igorkomarovskij702@gmail.com

Dmitry V. Lysakov, Postgraduate Student, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. Lysakovd@yandex.ru

Anton E. Golovchenko, Cand. Sc., Associate Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. antong77@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7069-6483>

Marina S. Popova, Cand. Sc., Associate Professor, Yurga State University, 16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russian Federation. alleniram83@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1462-8339>

Liu Baochang, Professor, Jilin University, 938, Ximinzhong street, Changchun, 130026, China. liubc@jlu.edu.cn, <http://orcid.org/0000-0002-0185-3684>

Received: 17.02.2024

Revised: 07.05.2024

Accepted: 24.01.2025