

УДК 622.243.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780
Шифр специальности ВАК: 2.8.1
Обзорная статья

Обоснование и разработка отклонителя непрерывного действия с полным отбором керна для бурения геологоразведочных скважин

П.А. Блинов, Н.М. Силичев✉, В.В. Никишин, В.Г. Гореликов

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, г. Санкт-Петербург

✉ nikita1silichev@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Разведка новых месторождений минерального сырья связана с большими затратами на проведение геологоразведочных работ. Основным способом получения информации о количестве полезных компонентов на месторождениях твердых полезных ископаемых остается бурение разведочных скважин с отбором керна. Следовательно, наиболее перспективным путем снижения затрат является сокращение объемов бурения по вышележащим нерудным горным породам. Снижение этих затрат может быть достигнуто путем оптимизации разведочных сетей направленными и многоствольными скважинами с использованием отклонителей непрерывного действия. **Цель.** Провести анализ основных преимуществ многоствольного и направленного бурения, а также выявить факторы, ограничивающие их широкое внедрение в геологоразведочную практику. Систематизировать данные о существующих технических решениях в области направленного бурения, оценив их эффективность и ключевые недостатки. Сформулировать комплекс требований к проектированию отклонителя непрерывного действия, ориентированного на повышение точности и производительности геологоразведочного бурения. **Методы.** Твердотельное моделирование, математическое моделирование. **Результаты и выводы.** Определены основные требования для успешной работы отклонителя непрерывного действия в скважине. Эффективной технологией для более широкого внедрения многоствольного бурения при разведке месторождения твердых полезных ископаемых является создание отклонителя непрерывного действия для бурения с отбором керна на интервалах искривления. Представлена конструкция разрабатываемого устройства. В рамках статьи более подробно рассмотрен искривляющий узел, реализующий механизм искривления, подобный тем, что используются в роторных управляемых системах «point the bit» – изгиб полого ведущего вала внутри эксцентриковых колец. Максимальная интенсивность искривления, которой можно добиться путем изгиба ведущего вала, ограничена предельно допустимой нагрузкой на резьбовые соединения бурильных труб типоразмера N.

Ключевые слова: разведочное бурение, направленное бурение, искусственное искривление скважин, снаряд со съемным керноприёмником, многоствольные скважины

Для цитирования: Обоснование и разработка отклонителя непрерывного действия с полным отбором керна для бурения геологоразведочных скважин / П.А. Блинов, Н.М. Силичев, В.В. Никишин, В.Г. Гореликов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780

UDC 622.243.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780
Review article

Justification and development of a continuous deflector with full core sampling for drilling exploration wells

P.A. Blinov, N.M. Silichev✉, V.V. Nikishin, V.G. Gorelikov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ nikita1silichev@gmail.com

Abstract. Relevance. Exploration of new mineral deposits is associated with high costs of geological exploration works. The main way to obtain information on the concentration of mineral components in solid mineral deposits is still drilling exploration wells with coring. Consequently, the most promising way to decrease costs is to reduce drilling of overlying non-metallic rocks. This cost reduction can be achieved by optimizing exploration grids with directional and multilateral wells using continuous diverters. **Aim.** To analyze the main advantages of multilateral and directional drilling, as well as identify the factors limiting their widespread introduction into exploration practice. To systematize data on existing technical solutions in the field of directional drilling, assessing their efficiency and key drawbacks. To formulate a set of requirements to the design of a continuous deflector oriented to improve the accuracy and productivity of exploration drilling. **Methods.** Solid modeling, mathematical modeling. **Results and conclusions.** An effective technology for solving this problem is the creation of a continuous deflector for drilling with coring. The paper presents a device realizing the mechanism of curvature similar to those used in rotary steerable systems “point the bit” – bending of quill drive shaft inside eccentric rings. The authors defined the basic requirements for successful operation of a deflector in a well. As a result, they developed a new design of continuous deflector for drilling diameter N (76 mm) taking into account all the requirements put forward. In further research it is planned to develop a mathematical model of the drive shaft bending and to transfer from the bending value (eccentric bushing rotation) to the intensity of the borehole curvature.

Keywords: mineral exploration drilling, directional drilling, artificial borehole curvature, wireline core barrel, multilateral wells

For citation: Blinov P.A., Silichev N.M., Nikishin V.V., Gorelikov V.G. Justification and development of a continuous deflector with full core sampling for drilling exploration wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 17–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4780

Введение

Согласно данным, представленным в отчете UN Environment's Global Resources Outlook, добыча полезных ископаемых увеличилась более чем в три раза с 1970 г. Это включает в себя пятикратное увеличение использования неметаллических минералов и 45-процентное увеличение использования ископаемого топлива [1–3].

Большая часть разведанных и эксплуатируемых месторождений минерального сырья значительно выработана, растет дефицит перспективных площадей для изучения, а поиски новых все чаще связаны с большими глубинами [4–6].

Бурение является самой дорогостоящей частью проекта по разведке полезных ископаемых, поэтому важно определить оптимальное количество и пространственное положение скважин, чтобы получить максимум информации при минимально возможных затратах [7–9]. Увеличение глубин изучаемых месторождений кратно увеличивает денежные затраты, а разработка методов разведки месторождений позволяет их снизить, что является наиболее актуальной задачей геологоразведочного производства.

Основным способом получения информации о количестве полезных компонентов на месторождениях твердых полезных ископаемых остается бурение разведочных скважин с отбором керна. Следовательно, наиболее перспективным путем снижения затрат является сокращение объемов бурения по вышележащим нерудным горным породам.

В настоящее время в геологоразведочных работах вертикальные скважины используются в основном на этапах поиска и оценки горизонтально и субгоризонтально залегающих рудных тел. По мере увеличения плотности разведочной сети и более

детального изучения рудных тел с углом наклона более 10 градусов применяют наклонно-направленные скважины [10, 11]. Для отбора проб рудных тел, имеющих крутой угол падения, характерный для жильных золотоносных месторождений, расположенных на больших глубинах (свыше 1000 м), рекомендуется применять многоствольное бурение.

Программа разведки месторождений многоствольными скважинами, и особенно в сочетании с методами скважинной геофизики, является наиболее эффективным методом снижения объема буровых работ [12–14]. Успешность многоствольного бурения достигается за счет сокращения метража бурения и позволяет сократить количество монтажных и строительных работ.

Очевидно, что стоимость одного метра бурения многоствольной скважины будет выше в сравнении со стандартным методом бурения, но не менее важным параметром экономической эффективности многоствольного бурения являются решаемые задачи, к которым можно отнести:

1. Существенное ускорение процесса разведки, что сокращает время, необходимое для завершения проекта.
2. В отличие от разведки месторождений одноствольными скважинами, многоствольные скважины позволяют многократно пересечь рудные тела, особенно при работе с крутопадающими рудными залежами. Это увеличивает эффективность разведки и улучшает точность подсчета запасов полезных ископаемых на месторождении.
3. Проведение геологоразведочного бурения с ограниченной площадки или в случае, когда строительство буровых площадок затруднено,

при этом имеется возможность разбуривания сетки скважин любой плотности. Это дает гибкость в выборе расположения скважин и упрощает логистические задачи.

4. Однократное разбуривание верхней части геологического разреза, в котором возможны обвалы стенок скважины и поглощения промывочной жидкости. Основной ствол многоствольной скважины однократно пересекает зону со сложными горно-геологическими условиями, а дополнительные стволы бурят по полезному ископаемому.
5. Проведение геологоразведки одновременно с добычей, включая ведение взрывных работ. Это увеличивает эффективность использования ресурсов и позволяет сократить время на разведку.
6. Выявление закономерности естественного искривления ствола скважины для вывода его в проектную точку подсечения рудного тела.
7. Проведение работ при наличии особо охраняемых территорий.

Многоствольное бурение является перспективной технологией в геологоразведке на твердые полезные ископаемые и имеет ряд преимуществ в сравнении с одноствольным методом. Основной проблемой реализации программы многоствольного разведочного бурения является отсутствие эффективно работающего инструмента для искусственного искривления скважин. В свете современных тенденций встает вопрос о разработке методов и технологий геологоразведки, использующих инновационные подходы, аналогичные тем, которые реализуются в нефтяной отрасли. Этот сектор пережил настоящий «бум» новых технологий, в том числе наклонно-направленного, многоствольного и горизонтального бурения.

Анализ имеющихся методов

Значительное развитие технологии и техники многоствольного бурения получено в области строительства скважин для освоения месторождений углеводородов. Ввиду того, что нефтегазовые

скважины строятся и в дальнейшем приносят прибыль [15], широко развиваются различные инновационные технологии для искусственного искривления и более качественного контроля за траекторией скважин. Аппаратная часть этих технологий основана на использовании телеметрических каналов связи с высокоразвитыми компьютерными и навигационными системами. Техническая часть представлена винтовыми забойными двигателями (ВЗД), роторными управляемыми системами (РУС), гибкими элементами бурового инструмента и прочими новшествами [16–18]. Именно они позволяют строить направленные, многоствольные и горизонтальные скважины с высокой точностью.

Самой передовой технологией для искусственного искривления скважин (и контроля за их траекторией) являются РУС, в которых разрушение горной породы осуществляется вращением долота вместе с бурильной колонной, управление траекторией скважины осуществляется блоком отклонения, что обеспечивает точное управление траекторией скважины.

РУС делятся на две основные категории по способу набора кривизны:

1. Push the bit – фрезерование стенки скважины (рис. 1). К этому типу относятся системы «PowerDrive X5» – «Schlumberger», «AutoTrak G3 RCLS» – «Baker Hughes».

Фрезерование происходит за счет использования отклонителей, которые позволяют создавать давление на боковую поверхность долота в направлении, противоположном действию отклонителей [19]. При этом отклоняется вся РУС или большая её часть.

2. Point the bit – ассиметричное разрушение забоя. Путем перемещения ведущего вала внутри корпуса РУС или изменения его изгиба достигается перекося долота, что приводит к неравномерному разрушению забоя [20] (рис. 2) К этому типу относятся системы: «Geo-Pilot» – «Halliburton Sperry-sun», «PowerDrive Xceed» – «Schlumberger».

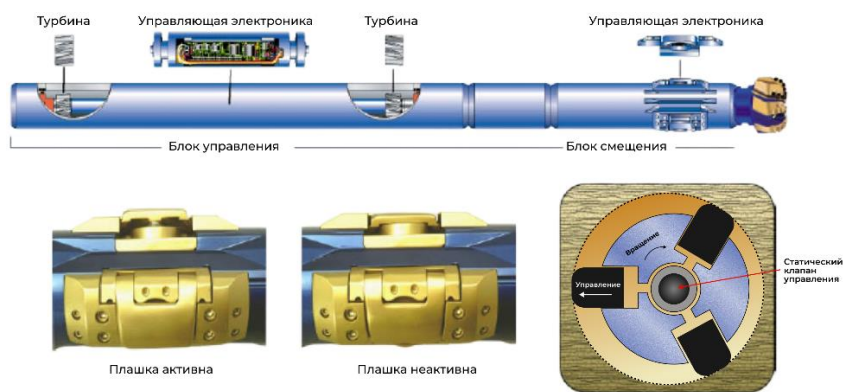


Рис. 1. Роторная управляемая система типа push the bit [18]

Fig. 1. Rotary steerable system (RSS) Push the bit type [18]

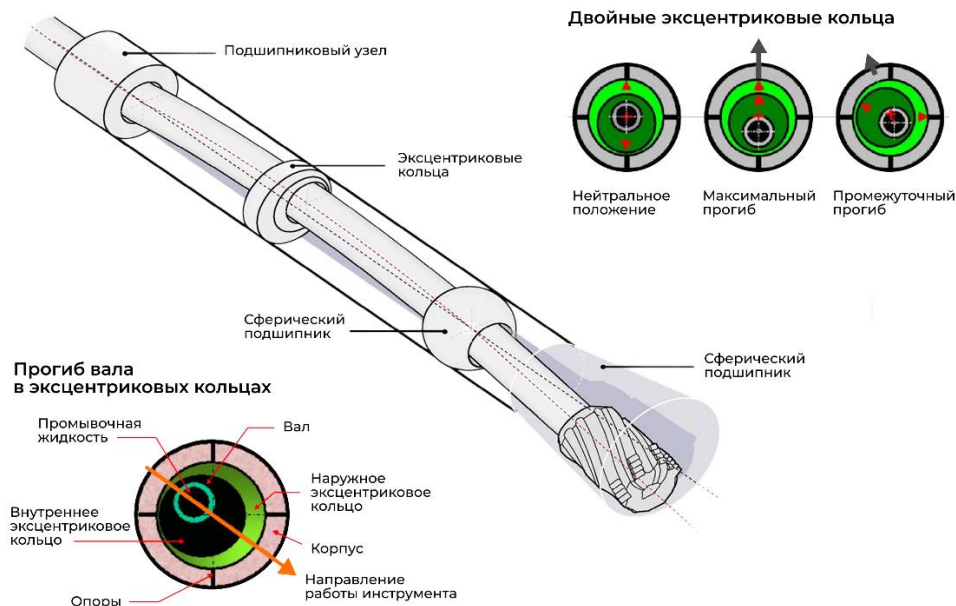


Рис. 2. Роторная управляемая система *point the bit* [18]

Fig. 2. *Point the bit* type RSS [18]

Использование технологии РУС при бурении скважин имеет несомненные преимущества. Она позволяет значительно увеличить механическую скорость бурения, повысить качество ствола при бурении направленных скважин и увеличить отклонение от вертикали в скважинах с горизонтальным окончанием.

Бурение геологоразведочных скважин обладает рядом специфических особенностей, которые ограничивают применение существующих методов из нефтегазовой отрасли. Одной из основных проблем является то, что большинство приборов и инструментов не соответствуют размерам скважин геологоразведочного номинала. Во вторую очередь работа в труднодоступных регионах, логистика в которые затруднена либо связана с большими затратами. Кроме того, существует еще одно препятствие – высокая стоимость услуг, предоставляемых специализированными компаниями при использовании новых технологий. Все эти особенности и сложности до сих пор не позволяли даже пробовать изменять технологии и методы проведения буровых работ, а также модернизировать приборную часть геологоразведочного производства. Важность устранения этих недостатков связана также с требованиями к отбору образцов керна как основного источника геологической информации для изучения структуры и условий залегания рудных месторождений [21]. Считается, что получение репрезентативного образца керна, отвечающего всем требованиям, является одной из главных задач геологоразведочных работ.

Частичное применение в геологоразведочном керна бурении нашли винтовые забойные дви-

гатели. Основной принцип работы ВЗД заключается в преобразовании гидравлической энергии бурового раствора в механическую энергию вращения вала двигателя [22].

Технология ВЗД, применительно к колонковому бурению на твердые полезные ископаемые, имеет ряд недостатков:

1. Бурение производится алмазным или шарошечным долотом (сплошным забоем) в интервалах искривления без отбора керна.
2. Ограниченная скорость механического бурения (не более 6 м/сут), вызванная как недостаточной частотой вращения для эффективной работы алмазного инструмента [23], так и тем, что при использовании долота площадь разрушения забоя в среднем в 2,5–3 раза больше, чем при использовании коронки. Это определяет необходимость большего крутящего момента и мощности, подаваемых на забой.
3. Большой расход промывочной жидкости, привлечение дополнительно насосного оборудования и персонала для обслуживания этой техники, что приводит к дополнительным финансовым затратам.
4. Необходимость в дополнительной очистке бурового раствора от шлама для обеспечения корректной работы забойного двигателя и нормального износа пары ротор–статор.
5. Необходимость дополнительного комплекта буровых труб (на один диаметр меньше) для установки над ВЗД. Количество труб определяется длиной интервала искривления во избежание обрыва буровой колонны в процессе искривления.

6. В конце цикла искривления забойным двигателем требуется проработка скважины до номинального диаметра.

Бурение с применением ВЗД позволяет решать задачи по бурению направленных и многоствольных скважин, снизить объем бурения и обеспечивает гарантию попадания в проектную точку до 95 %, но совокупность перечисленных факторов определяет недостаточную эффективность применения забойных двигателей в условиях геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые.

Клиновые отклонители остаются самым распространенным средством разведки месторождений минерального сырья направленными и многоствольными (в основном используются для возвращения к проектной траектории в случае ухода) скважинами.

Теоретически стационарные и извлекаемые (съемные) клиновые отклонители надежны и просты в работе. Однако на практике бурение наклонно-направленных скважин с применением стационарных и съемных клиньев является самым низкоэффективным методом за счет ряда ограничений. Например, при сильном естественном искривлении скважин необходимо большое количество постановок клиньев (до 10 шт. на 1000 м), вследствие чего происходит сильное удорожание себестоимости и резкое снижение производительности работ. Но стоит отметить, что данный метод будет весьма эффективным при бурении одноствольных направленных скважин в простых геологических условиях (близких к идеальным) глубиной не более 500 м.

Таким образом, обобщая недостатки используемых на производстве инструментов для искусственного искривления скважин, можно выдвинуть основные требования к отклонителям непрерывного действия:

1. Кондиционный выход керна с интервалов искусственного искривления скважины.
2. Интенсивность искривления скважины должна определяться не только целями бурения, но и прочностными характеристиками используемой (типовой) бурильной колонны.
3. Диаметр бурения при искривлении должен соответствовать проектному диаметру бурения, что исключает необходимость дополнительной калибровки ствола скважины.
4. Технология искривления не должна требовать специальных компоновок (жестких, шарнирных и т. д.) для сглаживания резких перегибов на участках набора угла.
5. Стабильная работа с использованием стандартных насосов, установленных на буровых установках.

Материалы и методы

Для успешного искусственного искривления скважины отклонителем непрерывного действия необходимо соблюдение следующих условий в конструкции устройства:

1. Предельную интенсивность искривления (минимальный радиус искривления) скважины необходимо проектировать с учетом изгибающей нагрузки на бурильные трубы. Любая часть отклонения не должна вызывать изгибающую нагрузку, превышающую прочность бурильной штанги.

Любое отклонение должно происходить на нескольких длинах штанг, и любая часть отклонения не должна вызывать изгибающую нагрузку, превышающую прочность элементов проходящей буровой штанги. Прочность каждой штанги в значительной степени зависит от ее положения в колонне, прилагаемых нагрузок при бурении и предыдущих деформаций. В конечном счете прочность любой буровой штанги определяется двумя механическими характеристиками материала: пределом упругого изгиба тела трубы и пределом усталости материала резьбового соединения.

Все стали подвержены усталостному разрушению (хрупкое растрескивание с быстрым последующим разрушением) при воздействии знакопеременной нагрузки в течение достаточного периода времени (предел усталости) [24, 25]. Рассмотрим, что при прохождении буровой штанги через отклонение она подвергается знакопеременной изгибающей нагрузке. При каждом повороте бурильной колонны в интервале искривления она подвергается растяжению через внешнюю часть изгиба и сжатию через внутреннюю.

Практика подтверждает, что материал не теряет целостности, если переменные нагрузки не превышают 50 % от предела текучести. Однако это справедливо только для стали, которая в остальное время не нагружена или находится под сжимающей предварительной нагрузкой. В процессе бурения бурильные трубы вблизи забоя всегда находятся под сжимающим усилием, а бурильные трубы вблизи устья подвергаются растяжению (особенно в условиях сухой скважины), что может снизить усталостную прочность до менее чем 25 % от предела текучести, в зависимости от величины растяжения (рис. 3).



Рис. 3. Предел выносливости [26]
Fig. 3. Fatigue strength [26]

Дальнейшее снижение усталостной прочности происходит в сечении наружной резьбы буровой трубы, где возникает дополнительное напряжение, вызванное моментом затяжки, требуемым в каждом резьбовом соединении [27]. Стоит отметить, что это снижение частично компенсируется при термообработке резьбовых соединений, повышающей прочность материала [28].

Таким образом, напряжения изгиба в колонне буровых труб не должны превышать предела выносливости материала в соответствии со следующим условием прочности (без учета запаса прочности):

$$\sigma_{из} = \frac{EI_0 i_n}{57,3W_0} \leq [\sigma_{-1}],$$

где $\sigma_{из}$ – напряжение изгиба, МПа; E – модуль Юнга, МПа; I_0 – осевой момент инерции поперечного сечения трубы по резьбе, м⁴; i_n – предельное значение интенсивности искривления, град/м; W_0 – осевой момент сопротивления поперечного сечения трубы по резьбе, м³; $[\sigma_{-1}]$ – предел выносливости на изгиб, МПа.

Результаты расчетного метода определения предельной интенсивности искривления подтверждаются производственной практикой и рекомендациями по эксплуатации ведущих производителей бурового оборудования. Так, компания «Boart Longyear» приводит руководство по максимальному допустимому искривлению ствола скважины для каждого типоразмера бурения, в соответствии с табл. 1.

Таблица 1. Максимальное искривление скважины [29]

Table 1. Maximum allowable wellbore curvature [29]

Типоразмер труб Rod size	Максимальное отклонение Maximum deviation	Радиус искривления, м Bend radius, m	Поперечная нагрузка, Н·м Lateral loading, N·m
BQ	1,2° на 3,0 м 1.2° in 3.0 m	69	738
NQ	1,0° на 3,0 м 1.0° in 3.0 m	87	1228
HQ	0,8° на 3,0 м 0.8° in 3.0 m	111	2359

Для предотвращения отказов буровой колонны необходимо устранять чрезмерное отклонение ствола скважины или ограничивать отклонения ствола скважины при планировании буровых работ.

Предельное значение искривления буровой колонны каждого типоразмера является ограничением в реализуемой отклонителем интенсивности искривления.

II. Длина и жесткость забойной компоновки искусственного искривления должна соответствовать проектному радиусу искривления.

Термин «вписываемость» определяет возможность спуска компоновки в скважину с искривлением без деформации. При продвижении отклоняющего устройства одновременно с искривлением ствола скважины габаритные размеры отклонителя определяют реализуемый им радиус искривления.

Размеры отклонителя должны соответствовать минимальному радиусу искривления для используемой буровой колонны. В противном случае максимальная реализуемая интенсивность искривления скважины снизится, а корпус устройства будет деформироваться и оказывать силовое воздействие на стенку скважины.

Так, при спуске отклонителя с породоразрушающим инструментом, диаметр которого равен диаметру ствола скважины, его предельную длину, согласно условию вписываемости, можно определить по формуле:

$$L = \sqrt{\frac{11,7(D_{скв} - D_n)}{i_{max}}} 57,3,$$

где L – предельная длина отклонителя, м; $D_{скв}$ – диаметр скважины, м; D_n – наружный диаметр отклонителя, м; i_{max} – максимально допустимая интенсивность искривления, град/м.

Задавшись поперечным размером отклонителя и диаметром бурения, можно определить предельный размер отклонителя. Например, для буровой колонны типоразмера N при сохранении диаметра бурения во время искривления (76 мм) и диаметре корпуса отклонителя 73 мм максимальная длина устройства не должна превышать 3,5 м.

III. Для искусственного искривления скважины необходимо обеспечить на забое либо фрезерование стенки скважины, либо перекося долота (коронки).

В конструкциях отклонителей используются две принципиальные схемы набора кривизны [30]:

1. Искривление скважин происходит благодаря воздействию отклоняющей силы на породоразрушающий инструмент, перпендикулярно его продольной оси. В результате этого непрерывно происходит фрезерование боковой стенки скважины в забойной зоне.
2. Бурение в заданном направлении обеспечивается перекосом снаряда или породоразрушающего инструмента. При этом происходит асимметричное разрушение забоя.

Устройства, работающие по первой схеме, имеют ряд значительных недостатков, ограничивающих их применение, а именно:

- на отклонитель помимо осевой нагрузки воздействует отклоняющая сила. Наличие последней

увеличивает момент трения между вращающейся и не вращающейся частями снаряда, что увеличивает дезориентирующий момент, как следствие, к узлу раскрепления отклонителя в стенке скважины необходимо предъявлять повышенные требования;

- отклонение скважин возможно только в породах сравнительно невысокой категории по буримости;
- необходимость в породоразрушающем инструменте с дополнительным или специальным боковым вооружением;
- набор кривизны скважины зависит от режимных параметров бурения, часто определяющих величину скорости фрезерования стенки скважины;
- скорость фрезерования обратно пропорциональна скорости бурения.

Указанные особенности в значительно меньшей степени характерны для снарядов, работающих по принципу асимметричного разрушения забоя. Но они также не лишены недостатков. Наиболее значимым является защемление породоразрушающего инструмента при перекосе – превышение размеров сечения долота в плоскости перпендикулярной оси скважины по сравнению с диаметром скважины [31].

Однако отклонители непрерывного действия второго типа обладают рядом преимуществ. Они менее нагружены и деформированы в процессе бурения, имеют простую конструкцию и демонстрируют достаточно высокую надежность в работе. Кроме того, они обладают возможностью плавного и контролируемого набора кривизны, поскольку не зависят от скорости фрезерования и скорости бурения.

Перечисленные особенности работы механизмов искривления обоих типов подтверждаются опытом использования роторных управляющих систем (рис. 4).

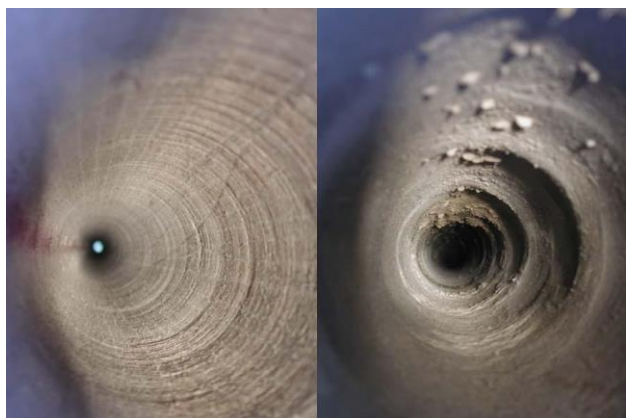


Рис. 4. Качество ствола скважины РУС point the bit (слева) и push the bit (справа) [32]

Fig. 4. Quality of point the bit wellbore (left) and push the bit (right) RSS [32]

Отмечается, что при использовании фрезерующего типа РУС (push the bit) возникают основные проблемы, связанные с качеством ствола скважины. В местах искривлений ствол характеризуется наличием уступов и ступенчатых форм, что при бурении в твердых горных породах может привести к аномальному износу бурильной колонны. Для данных РУС требуется особое боковое вооружение на долотах. При этом ресурс долот, фрезерующих стенку скважины, всегда меньше, чем у долот предназначенных для РУС (point the bit), которые формируют искривленный ствол за счет асимметричного разрушения забоя [33, 34]. При этом обратно пропорциональная зависимость интенсивности искривления от механической скорости бурения показывает, что рост производительности бурения находится в противоречии с тенденцией роста интенсивности искривления [35].

Таким образом, отклонители непрерывного действия второго типа менее нагружены и деформированы в процессе бурения, просты в конструкции и в работе достаточно надежны, а также отличаются возможностью плавного и контролируемого набора кривизны, т. к. отсутствует зависимость от скорости фрезерования и скорости бурения.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из указанного, ясно, что для успешного геологоразведочного бурения требуется улучшение технологии направленного бурения, специально разработанной под оборудование и цели геологоразведки. Оно должно обеспечивать возможность отбора керна на искривленных интервалах, при этом интенсивность искривления не должна превышать допустимые значения, установленные для бурильной колонны. Важно, чтобы отклонитель функционировал без необходимости использования дополнительного оборудования, такого как наосы или дополнительные бурильные трубы.

В поисках решения данной проблемы появилась идея использования механизма искривления скважин, как и в роторных управляемых системах типа point the bit (искривление ведущего вала внутри эксцентриковых втулок, вызывающее изменение угла атаки вооружения породоразрушающего инструмента). Такая конструкция позволяет гибко изменять интенсивность искривления, а также появляется возможность выполнить ведущий вал полым для размещения в нем съемного керноприемника.

Предлагается отклонитель непрерывного действия с непрерывным отбором керна (рис. 5), включающий искривляющий узел – 1, выполненный в виде пары эксцентриковых втулок; полый ведущий вал – 2 (внутри располагается съемный керноприемник, соединенный с бурильной колон-

ной); узел фиксации – 3 корпуса отклонителя – 7 в стенки скважины посредством выдвижных плашек – 9; узел зацепления – 4 корпуса отклонителя и ведущего вала посредством подвижного фиксирующего штифта – 10; ориентирующий переводник – 5 и релитовый переводник – 6; 8 – установочный винт [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

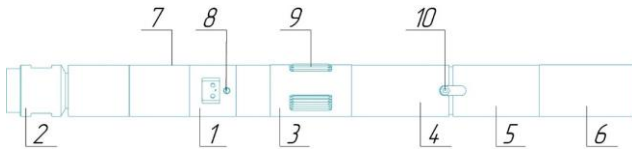


Рис. 5. Общий вид отклонителя непрерывного действия с отбором керна

Fig. 5. Schematic diagram of a continuous deflector with coring

Предложенный отклонитель разрабатывается для типоразмера бурения 76 мм (N), диаметр отбираемого керна равен 32 мм, что соизмеримо с керном, получаемым при бурении типоразмером 59 мм (B).

Отклонитель работает следующим образом. На поверхности с помощью узла искривления выставляется изгиб ведущего вала, соответствующий проектной интенсивности искривления. Устройство ориентируется по азимуту на поверхности и ориентированно спускается на забой (без поворота буровой колонны). После постановки на забой включается буровой насос, под действием промывочной жидкости срабатывают узел зацепления и узел раскрепления в стенки скважины (корпус отклонителя зафиксирован в стенках скважины, вращение на него не передается). Происходит бурение с набором кривизны на длину керноприемной трубы (3 м), керноприемник поднимется с помощью лебедки и спускается пустой. Бурение продолжается до достижения проектного искривления.

Далее в статье более подробно рассмотрен механизм работы узла отклонения и методика расчета изгиба ведущего вала.

Узел искривления ведущего вала состоит из корпуса с эксцентричным отверстием, эксцентриковой втулки, втулки скольжения и фиксирующего болта (рис. 6).

Корпус узла искривления соединяется с корпусом отклонителя посредством резьбовых соединений. Таким образом, после активации узла раскрепления в скважине корпус узла искривления остается неподвижен, а изгиб ведущего вала зафиксирован в одной плоскости. Эксцентриковая втулка расположена в корпусе, ее поворот обеспечивает изгиб ведущего вала и, как следствие, перекося коронки на забое. Смещение осей отклонителя и ведущего вала при повороте втулки изменяется от 0 до 5 мм.

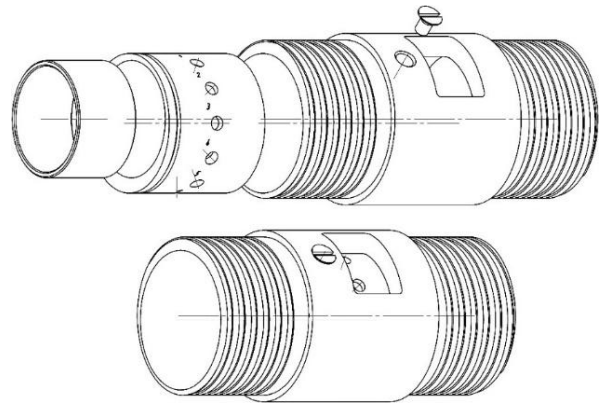


Рис. 6. Узел искривления ведущего вала в разборе (сверху) и в сборе (снизу)

Fig. 6. Drive shaft curvature assembly disassembled (top) and assembled (bottom)

Изменение положения втулки (7 положений) производится путем поворота втулки внутри корпуса узла искривления через специальное окошко в последнем, шаг поворота между положениями составляет 15 градусов. Фиксация эксцентриковой втулки обеспечивается стопорным винтом. Внутри эксцентриковой втулки расположена втулка скольжения, необходимая для предотвращения передачи вращения от ведущего вала на корпус узла искривления, а также на корпус отклонителя. Втулка скольжения может быть изготовлена из фторопласта, так как пара скольжения сталь–фторопласт обладает способностью работать без смазки с самым низким коэффициентом трения (0,02–0,03).

При повороте эксцентриковой втулки внутри корпуса центр внутреннего отверстия втулки описывает окружность вокруг центра корпуса узла искривления. Так как ведущий вал проходит через эксцентриковую втулку, смещение между ведущим валом и корпусом определяется расстоянием между этими центрами.

Смещение центров относительно наружной поверхности в корпусе и втулке составляет 2,5 мм. Таким образом, максимальное смещение ведущего вала составляет 5 мм (максимальный перекося коронки на забое), а минимальное смещение – 0 мм (перекося коронки отсутствует). Результаты промежуточных смещений представлены ниже и получены в виде зависимости от поворота эксцентриковой втулки (табл. 2).

$$y_B = f(\varphi) = -4 \cdot 10^{-7} \varphi^3 - 2 \cdot 10^{-5} \varphi^2 + 0,0444 \varphi,$$

где y_B – смещение оси ведущего вала в месте изгиба, мм; φ – угол поворота эксцентриковой втулки, град.

Плоскость изгиба ведущего вала, а как следствие, и направление набора кривизны, будут изменяться при разных положениях эксцентриковой втулки. Направления плоскости изгиба и соответствующие им смещения представлены на рис. 7.

Таблица 2. Смещение оси ведущего вала при повороте эксцентриковой втулки

Table 2. Drive shaft axis displacement when the eccentric bushing is rotated

Поворот эксцентриковой втулки φ , град Rotating the eccentric bushing φ , °	Смещение оси ведущего вала в месте изгиба u_b , мм Drive shaft axis displacement at the bending point, mm
0	0
30	1,29
60	2,50
90	3,54
120	4,33
150	4,83
180	5

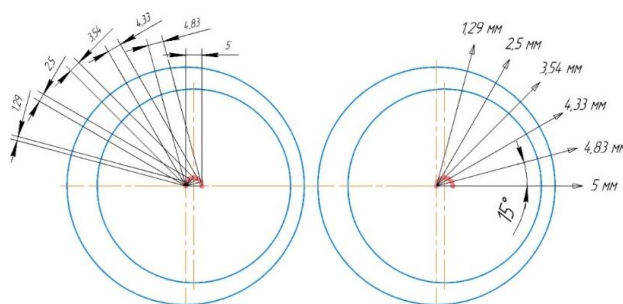


Рис. 7. Смещение плоскости изгиба при повороте эксцентриковой втулки

Fig. 7. Displacement of the bending plane when the eccentric bushing is rotated

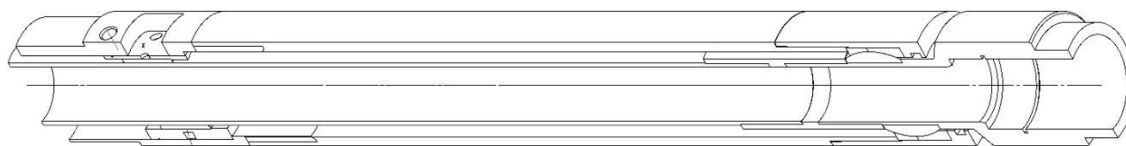


Рис. 8. Нижняя часть отклонителя

Fig. 8. Lower section of the deflector

Верхняя часть ведущего вала соединена с буровой колонной посредством резьбового соединения, нижняя часть ведущего вала проходит через сферический подшипник скольжения. Последний обеспечивает пересечение оси ведущего вала и корпуса отклонителя в нижней части и позволяет ведущему валу вращаться в фиксированной изгибом плоскости (рис. 8).

Заключение

Проведен анализ существующих технологий искусственного искривления скважин. Выявлены их недостатки, на основе которых определены требования к отклонителям непрерывного действия с учетом специфики геологоразведочных работ. Предложено адаптировать технологию искусствен-

ного искривления, реализуемую в роторных управляемых системах «point the bit», а именно изгиб ведущего вала внутри бурового снаряда. Полный ведущий вал позволяет разместить в нем съемный керноприемник, а система эксцентриковых колец – гибко настраивать интенсивность искривления.

Определены основные требования для успешного искусственного искривления скважины отклонителем непрерывного действия, которые необходимо учитывать при конструировании нового устройства.

В результате разработана новая конструкция отклонителя непрерывного действия для диаметра бурения N (76 мм) с учетом всех выдвинутых требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global resources outlook: 2019 / B. Oberle, S. Bringezu, S. Hatfield-Dodds, S. Hellweg, H. Schandl, J. Clement // International Resource Panel, United Nations Envio. – Paris, France, 2019. – 181 p.
2. Smimova E., Saychenko L. Hydrodynamic modeling and evaluation of partial substitution of cushion gas during creation of temporary underground gas storage in an aquifer // Hydrodynamic. International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2024. – Vol. 37. – № 7. – P. 1221–1230. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.02.
3. Технология глушения газовых скважин на регулируемом давлении / М.В. Двойников, Я.Д. Минаев, В.В. Минибаев и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4315.
4. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: implications for ESG principles and sustainable development goals / V. Litvinenko, I. Bowbrick, I. Naumov, Z. Zaitseva // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 338. – P. 130–153. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530.
5. Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде / А.В. Большунов, Д.А. Васильев, А.Н. Дмитриев, С.А. Игнатьев, В.Г. Кадочников, Н.С. Крикун, Д.В. Сербин, В.С. Шадрин // Записки Горного института. – 2023. – Т. 263. – С. 724–741.
6. Fatehi M., Asadi Haroni H., Hossein Morshedy A. Designing infill directional drilling in mineral exploration by using particle swarm optimization algorithm // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – Vol. 10. – P. 1–14. DOI: 10.1007/s12517-017-3209-4.
7. Efficacy of information in mineral exploration drilling / J. Caers, C. Scheidt, Z. Yin, L. Wang, T. Mukerji, K. House // Natural Resources Research. – 2022. – Vol. 31. – № 3. – P. 1157–1173. DOI: 10.1007/s11053-022-10030-1.

8. Application of artificial neural networks for identification of lithofacies by processing of core drilling data / M. Yang, Y. Hu, B. Liu, L. Wang, Z. Zhou, M. Jia // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – № 21. – P. 119–134. DOI: 10.3390/app132111934.
9. Hossein-Morshedy A., Khorram F., Emery X. A multi-objective approach for optimizing the layout of additional boreholes in mineral exploration // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 10. – P. 1252. DOI: 10.3390/min13101252.
10. Nwosu J. I., Egesi N. Predicting the true reserve of a steeply dipping deposit in a multi-deviation angle exploration operation // *Journal of Mining and Geology*. – 2021. – Vol. 57. – № 2. – P. 397–406.
11. Hapugoda S., Manuel J.R. A comparison of drilling and sampling techniques as they relate to base and precious metal exploration in the Mt Isa Inlier of North West Queensland and the Southern Lachlan Fold Belt in New South Wales // *Sampling conference: Proceedings Sampling 2010*. – Perth, 11–12 May 2010. – P. 2–14.
12. Томский К.О., Иванова М.С. Оптимизация расположения многозабойной скважины в тонкой нефтяной оторочке, осложненной наличием обширной газовой шапки // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 265. – С. 140–146.
13. Dvoynikov M.V., Nikitin V.I., Kopteva A.I. Analysis of the methodology for selecting the rheological model of cement slurry for determining the technological parameters of well casing // *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. – 2024. – Vol. 37. – № 10. – P. 2042–2050. DOI: 10.5829/ije.2024.37.10a.15
14. Analysis of nucleation time of gas hydrates in presence of paraffin during mechanized oil production / G.Y. Korobov, A.A. Vorontsov, G.V. Buslaev, V.T. Nguyen // *International Journal of Engineering*. – 2024. – Vol. 37. – P. 1343–1356. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.13.
15. Разработка и исследование тампонажных составов с улучшенными упруго-прочностными свойствами для крепления нефтяных и газовых скважин / П.А. Блинов, М.И. Садыков, В.Г. Гореликов, В.В. Никишин // *Записки Горного института*. – 2024. – Т. 268. – С. 588–598.
16. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods // *2016 IEEE international conference on mechatronics and automation*. – 2016. – P. 1559–1565. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558796.
17. Жданев О.В., Зайцев А.В., Продан Т.Т. О возможностях создания российской высокотехнологичной компоновки низа бурильной колонны // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 252. – С. 872–884. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.9
18. Ma T., Chen P., Zhao J. 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. – P. 365–395. DOI: 10.1007/s40948-016-0038-y.
19. 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. – № 6. – P. 622–627. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.11.010.
20. Schaaf S., Mallary C.R., Pafitis D. Point-the-bit rotary steerable system: theory and field results // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition? – SPE, 2000*. – C. SPE-63247-MS. DOI: 10.2118/63247-MS.
21. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* – 2020. – № 3-1. – P. 216–223. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223.
22. Mohamed A., Salehi S., Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: a review // *Geothermics*. – 2021. – Vol. 93. – P. 1020–1066. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102066.
23. Development of automatic electric drive drilling system for core drilling / Z. Zhou, Y. Hu, B. Liu, K. Dai, Y. Zhang // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – № 2. – P. 105–109. DOI: 10.3390/app13021059.
24. Evaluating the effectiveness of magnetic-pulse treatment for healing continuity defects in the metal of oil and gas pipelines / A. Schipachev, M. Aljadly, O. Ganzulenko, D. Chernikov, V. Razzhivin, R. Yusupov // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – № 11. – P. 1875. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13111875>.
25. Activated crack growth and fracture toughness evaluation of pipeline steels using acoustic emission / O.G. Perveitov, V.V. Nosov, A.M. Schipachev, A.I. Alekhin // *Metals*. – 2023. – Vol. 13. – № 7. – P. 1272. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071272>.
26. Drenth Ch. Know your limits: drill rod bending capabilities and deviated hole applications // *Coring Magazine*. – 2017. – Vol. 5. – P. 16–19.
27. Лачинян Л.А., Медведев А.К. Обоснование конструкции резьбового соединения бурильной колонны в составе комплексов буровых снарядов со съемным керноприемником // *Разведка и охрана недр*. – 2021. – № 5. – С. 38–44.
28. Степанчукова А.В. Обзор современных мировых технологий изготовления труб, применяемых в геологоразведочном бурении // *Шаг в науку*. – 2021. – № 1. – С. 98–101.
29. Drenth Ch. Bulletin CDDA technical committee borehole deviation guidelines // *Conference: 2019 CDDA AGM*. – St. John’s, Newfoundland, 2–4 June 2020. – P. 1–4.
30. Рязанов В.И., Спиридонов Б.И. Анализ принципиальных схем отклонителей // *Известия Томского ордена Октябрьской революции Трудового Красного знамени политехнического института им. С.М. Кирова*. – 1976. – Т. 260. – С. 75–77.
31. Основные направления совершенствования технологии искусственного искривления скважин в твердых и крепких горных породах / В.В. Нескоромных, П.С. Пушмин, А.А. Надеяев, Л.С. Фадеева // *Науки о Земле и недропользование*. – 2008. – Т. 32. – № 6. – С. 186–190.
32. Stroud D., Russell M., Peach S. Development of the industry's first slimhole point-the-bit rotary steerable system // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – 2003. DOI: 10.2118/84449-MS.
33. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резами PDC / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, А.Е. Головченко, П.Г. Петенёв, Л. Баочанг // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 245. – С. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5
34. PDC bit steerability modeling and testing for push-the-bit and point-the-bit RSS / S. Menand, S. Christophe, L. Gerbaud, H. Denoix, C. Bruno, J. Gaombalet, Y. Amghar, H. Sinardet // *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. – 2012. DOI: 10.2118/151283-MS.

35. Torsional vibration analysis of push-the-bit rotary steerable drilling system / R. Wang, Q. Xue, L. Han, F. Sun, W. Yue // *Meccanica*. – 2014. – Vol. 49. – P. 1601–1615. DOI: 10.1007/s11012-014-9942-9.
36. Устройство для направленного бурения с отбором керна: пат. № 2832393, Российская Федерация, С1; заявл. 04.06.2024; опубл. 23.12.2024.

REFERENCES

1. Oberle B., Bringezu S., Hatfield-Dodds S., Hellweg S., Schandl H., Clement J. Global resources outlook: 2019. *International Resource Panel, United Nations Envio*. Paris, France, 2019. 181 p.
2. Smirnova E., Saychenko L. Hydrodynamic modeling and evaluation of partial substitution of cushion gas during creation of temporary underground gas storage in an aquifer. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 2024, vol. 37, no. 7, pp. 1221–1230. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.02.
3. Dvoynikov M.V., Minaev Ya.D., Minibaev V.V., Kambulov E.Yu., Lamosov M.E. Technology for killing gas wells at managed pressure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 7–18. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4336. (In Russ.)
4. Litvinenko V., Bowbrick I., Naumov I., Zaitseva Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: implications for ESG principles and sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 338, pp. 130–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>.
5. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Dmitriev A.N., Ignatev S.A., Kadochnikov V.G., Krikun N.S., Serbin D.V., Shadrin V.S. Results of complex experimental studies at Vostok station in Antarctica. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 263, pp. 724–741. (In Russ.)
6. Fatehi M., Asadi Haroni H., Hossein Morshedy A. Designing infill directional drilling in mineral exploration by using particle swarm optimization algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s12517-017-3209-4.
7. Caers J., Scheidt C., Yin Z., Wang L., Mukerji T., House K. Efficacy of Information in Mineral Exploration Drilling. *Natural Resources Research*, 2022, vol. 31, no. 3, pp. 1157–1173. DOI: 10.1007/s11053-022-10030-1.
8. Yang M., Hu Y., Liu B., Wang L., Zhou Z., Jia M. Application of artificial neural networks for identification of lithofacies by processing of core drilling data. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 21, pp. 119–134. DOI: 10.3390/app132111934.
9. Hossein-Morshedy A., Khorram F., Emery X. A multi-objective approach for optimizing the layout of additional boreholes in mineral exploration. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 10, pp. 1252. DOI: 10.3390/min13101252.
10. Nwosu J.I., Egesi N. Predicting the true reserve of a steeply dipping deposit in a multi-deviation angle exploration operation. *Journal of Mining and Geology*, 2021, vol. 57, no. 2, pp. 397–406.
11. Hapugoda S., Manuel J.R. A comparison of drilling and sampling techniques as they relate to base and precious metal exploration in the Mt Isa Inlier of North West Queensland and the Southern Lachlan Fold Belt in New South Wales. *Sampling conference. Proceedings Sampling 2010*. Perth, 11–12 May 2010. pp. 2–14
12. Tomsikii K.O., Ivanova M.S. Optimization of the location of a multilateral well in a thin oil rim, complicated by the presence of an extensive gas cap. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 265, pp. 140–146. (In Russ.)
13. Dvoynikov M.V., Nikitin V.I., Kopteva A.I. Analysis of the methodology for selecting the rheological model of cement slurry for determining the technological parameters of well casing. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 2024, vol. 37, no. 10, pp. 2042–2050. DOI: 10.5829/ije.2024.37.10a.15
14. Korobov G.Y., Vorontsov A.A., Buslaev G.V., Nguyen V.T. Analysis of nucleation time of gas hydrates in presence of paraffin during mechanized oil production. *International Journal of Engineering*, 2024, vol. 37, pp. 1343–1356. DOI: 10.5829/ije.2024.37.07a.13.
15. Blinov P.A., Sadykov M.I., Gorelikov V.G., Nikishin V.V. Development and research of backfill compounds with improved elastic and strength properties for oil and gas well lining. *Journal of Mining Institute*, 2024, vol. 268, pp. 588–598. (In Russ.)
16. Zhang C., Zou W., Cheng N. Overview of rotary steerable system and its control methods. *2016 IEEE international conference on mechatronics and automation*, 2016. pp. 1559–1565. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558796.
17. Zhdanev O.V., Zaytsev A.V., Prodan T.T. Possibilities for creating Russian high-tech bottomhole assembly. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 252, pp. 872–884. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.9. (In Russ.)
18. Ma T., Chen P., Zhao J. 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, pp. 365–395. DOI: 10.1007/s40948-016-0038-y.
19. 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, no. 6, pp. 622–627. DOI: 10.1016/j.ngib.2021.11.010.
20. Schaaf S., Mallary C.R., Pafitis D. Point-the-bit rotary steerable system: theory and field results. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2000. DOI: 10.2118/63247-MS.
21. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Forecast of the stability of the array of gold ore deposits based on the analysis of core material from exploration core drilling wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2020, no. 3-1, pp. 216–223. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-216-223.
22. Mohamed A., Salehi S., Ahmed R. Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: a review. *Geothermics*, 2021, vol. 93, pp. 1020–1066. DOI: 10.1016/j.geothermics.2021.102066.
23. Zhou Z., Hu Y., Liu B., Dai K., Zhang Y. Development of automatic electric drive drilling system for core drilling. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 105–109. DOI: 10.3390/app13021059.
24. Schipachev A., Aljadly M., Ganzulenko O., Chernikov D., Razzhivin V., Yusupov R. Evaluating the effectiveness of magnetic-pulse treatment for healing continuity defects in the metal of oil and gas pipelines. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 11, pp. 1875. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13111875>.
25. Perveitalov O.G., Nosov V.V., Schipachev A.M., Alekhin A.I. Thermally activated crack growth and fracture toughness evaluation of pipeline steels using acoustic emission. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 7, pp. 1272. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13071272>.

26. Drenth Ch. Know your limits: drill rod bending capabilities and deviated hole applications. *Coring Magazine*, 2017, vol. 5, pp. 16–19.
27. Lachinyan L.A., Medvedev A.K. Justification of the design of the drill string threaded connection as a part of the complexes of drilling shells with a removable core receiver. *Exploration and protection of subsoil*, 2021, no. 5, pp. 38–44. (In Russ.)
28. Stepanchukova A.V. Review of modern world technologies of pipe manufacturing used in exploration drilling. *Step in Science*, 2021, no. 1, pp. 98–101. (In Russ.)
29. Drenth Ch. Bulletin CDDA technical committee borehole deviation guidelines. *Conference: 2019 CDDA AGM*. St. John's, Newfoundland, June 2–4, 2020. pp. 1–4.
30. Ryazanov V.I., Spiridonov B.I. Analysis of principle schemes of deflectors. *Proceedings of the Tomsk S.M. Kirov Polytechnic Institute, Order of the October Revolution, Order of the Labor Red Banner*, 1976, vol. 260, pp. 75–77. (In Russ.)
31. Neskromnykh V.V., Pushmin P.S., Nadelyaev A.A., Fadeeva L.S. Main directions of improvement of the technology of artificial well curvature in hard and hard rocks. *Earth Sciences and Subsoil Use*, 2008, vol. 32, no. 6, pp. 186–190. (In Russ.)
32. Stroud D., Russell M., Peach S. Development of the industry's first slimhole point-the-bit rotary steerable system. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2003. DOI: 10.2118/84449-MS.
33. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Petenev P.G., Baochang L. Method of drilling process control and experimental studies of resistance forces during bits drilling with PDC cutters. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 245, pp. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5. (In Russ.)
34. Menand S., Christophe S., Gerbaud L., Denoix H., Bruno C., Gaombalet J., Amghar Y., Sinardet H. PDC bit steerability modeling and testing for push-the-bit and point-the-bit RSS. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, 2012. DOI: 10.2118/151283-MS.
35. Wang R., Xue Q., Han L., Sun F., Yue W. Torsional vibration analysis of push-the-bit rotary steerable drilling system. *Meccanica*, 2014, vol. 49, pp. 1601–1615. DOI: 10.1007/s11012-014-9942-9.
36. Blinov P.A., Nikishin V.V., Silichev N.M. *Device for directional drilling with coring*. Invention application RF no. 2832393, 2024. (In Russ.)

Информация об авторах

Павел Александрович Блинов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; Blinov_PA@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4379-8804>

Никита Михайлович Силичев, аспирант кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; nikita1silichev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-5219-6539>

Вячеслав Валерьевич Никишин, кандидат технических наук, доцент кафедры бурения скважин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; Nikishin_VV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7973-1856>

Владимир Георгиевич Гореликов, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры механики, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, 2; Gorelikov_VG@pers.spmi.ru <https://orcid.org/0000-0003-2318-5186>

Поступила в редакцию: 19.07.2024

Поступила после рецензирования: 06.09.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

Information about authors

Pavel A. Blinov, Cand. Sc., Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; Blinov_PA@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4379-8804>

Nikita M. Silichev, Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; nikita1silichev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-5219-6539>

Vyacheslav V. Nikishin, Cand. Sc., Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; Nikishin_VV@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7973-1856>

Vladimir G. Gorelikov, Dr. Sc., Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2, 21 line, St Petersburg, 199106, Russian Federation; Gorelikov_VG@pers.spmi.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2318-5186>

Received: 19.07.2024

Revised: 06.09.2024

Accepted: 21.04.2025