



## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И КОНСТРУКЦИИ СЪЕМНОГО ОТКЛОНЯЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ БУРЕНИЯ ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН СНАРЯДАМИ СО СЪЕМНЫМИ КЕРНОПРИЕМНИКАМИ

В.В. НЕСКОРОМНЫХ, И.А. КОМАРОВСКИЙ\*, П.Г. ПЕТЕНЕВ

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»  
79, Свободный проспект, г. Красноярск 660041, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе бурения все скважины в большей или меньшей степени искривляются. В ряде случаев искривление скважин не оказывает существенного влияния на результаты бурения, поэтому фактическое положение ствола скважины и координаты забоя не определяются. Это относится к картировочным, инженерно-геологическим, взрывным и другим скважинам, имеющим незначительную глубину. При бурении глубоких скважин, особенно на поздних стадиях разведки месторождений, вопросы проведения скважин по проектным траекториям приобретают очень большое значение, и на их решение затрачиваются значительные средства. При использовании технических средств для изменения направления скважины (отклонителей) возникает ряд проблем, связанных со спускоподъемными операциями.

**Цель** — снижение времени, затрачиваемого на корректировку траектории направления скважины, путем исключения спускоподъемных операций при проведении работ по направленному бурению.

**Материалы и методы.** Изучен принцип работы различных типов отклонителей. В основу написания статьи легли результаты анализа работы отклонителя непрерывного действия, средств для корректировки направления траектории ствола скважины, а также результаты разработок, направленных на снижения затрачиваемого времени на работы по направленному бурению.

**Результаты.** Анализ позволил выявить, что основное время, затрачиваемое на проведение работ по искусственному искривлению скважины, приходится на спускоподъемные операции, которые прямо пропорционально влияют на себестоимость работ по направленному бурению.  
**Заключение.** Для снижения затрат времени на спускоподъемные операции возникла необходимость создания технических средств, использование которых позволило бы исключить спускоподъемные операции, связанные с направленным бурением.

**Ключевые слова:** ССК, отклонитель, скважина, устройство, съёмный отклоняющий комплекс, спускоподъемные операции

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**Для цитирования:** Нескоромных В.В., Комаровский И.А., Петенев П.Г. Разработка технологии и конструкции съёмного отклоняющего комплекса для бурения геолого-разведочных скважин снарядами со съёмными керноприемниками. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2022;64(4):81—90. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-4-81-90>

Статья поступила в редакцию 22.03.2020

Принята к публикации 01.07.2022

Опубликована 14.11.2022

\* Автор, ответственный за переписку

## DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY AND DESIGN OF A REMOVABLE WHIPSTOCK ASSEMBLY FOR DRILLING EXPLORATION WELLS USING WIRELINE CORE BARRELS

VYACHESLAV V. NESKOROMNYKH, IGOR A. KOMAROVSKY\*, PAVEL G. PETENEV

*Siberian Federal University  
79, Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk 660041, Russia*

### ABSTRACT

**Background.** During the drilling process, all wells undergo distortion to a greater or lesser extent. In a number of cases, the distortion of wells causes no significant effect on the results of drilling. Therefore, the actual position of the well shaft and bottom coordinates are not determined. This applies to mapping, engineering-geological, blasting and other wells having a shallow depth. During deep-well drilling, especially at the final exploration stages, issues of drilling wells according to design trajectories acquire a greater importance and significant resources for their solution. The application of technical means for changing the direction of the well (whipstocks) is associated with a number of problems related to tripping operations.

**Aim.** To reduce the time input needed for adjusting drilling trajectories by excluding tripping operations when conducting controlled drilling works.

**Materials and methods.** The operating principles of various types of deflectors were studied. The results of investigating deflectors of continuous action are presented, along with means for adjusting drilling trajectories and optimizing the time required for controlled drilling works.

**Results.** The conducted analysis revealed the direct proportion between the time spent on tripping operations and the costs incurred in controlled drilling.

**Conclusion.** In order to reduce the time input needed for tripping operations during drilling, technological means should be developed to exclude them from the entire process.

**Keywords:** Wire-line, wellbore, device, removable deflecting complex, descent and lifting operations

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Financial disclosure:** no financial support was provided for this study.

**For citation:** Neskromnykh V.V., Komarovskiy I.A., Petenev P.G. Development of a technology and design of a removable whipstock assembly for drilling exploration wells using wireline core barrels. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(4):81—90. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-4-81-90>

*Manuscript received 22 March 2020*

*Accepted 01 July 2022*

*Published 14 November 2022*

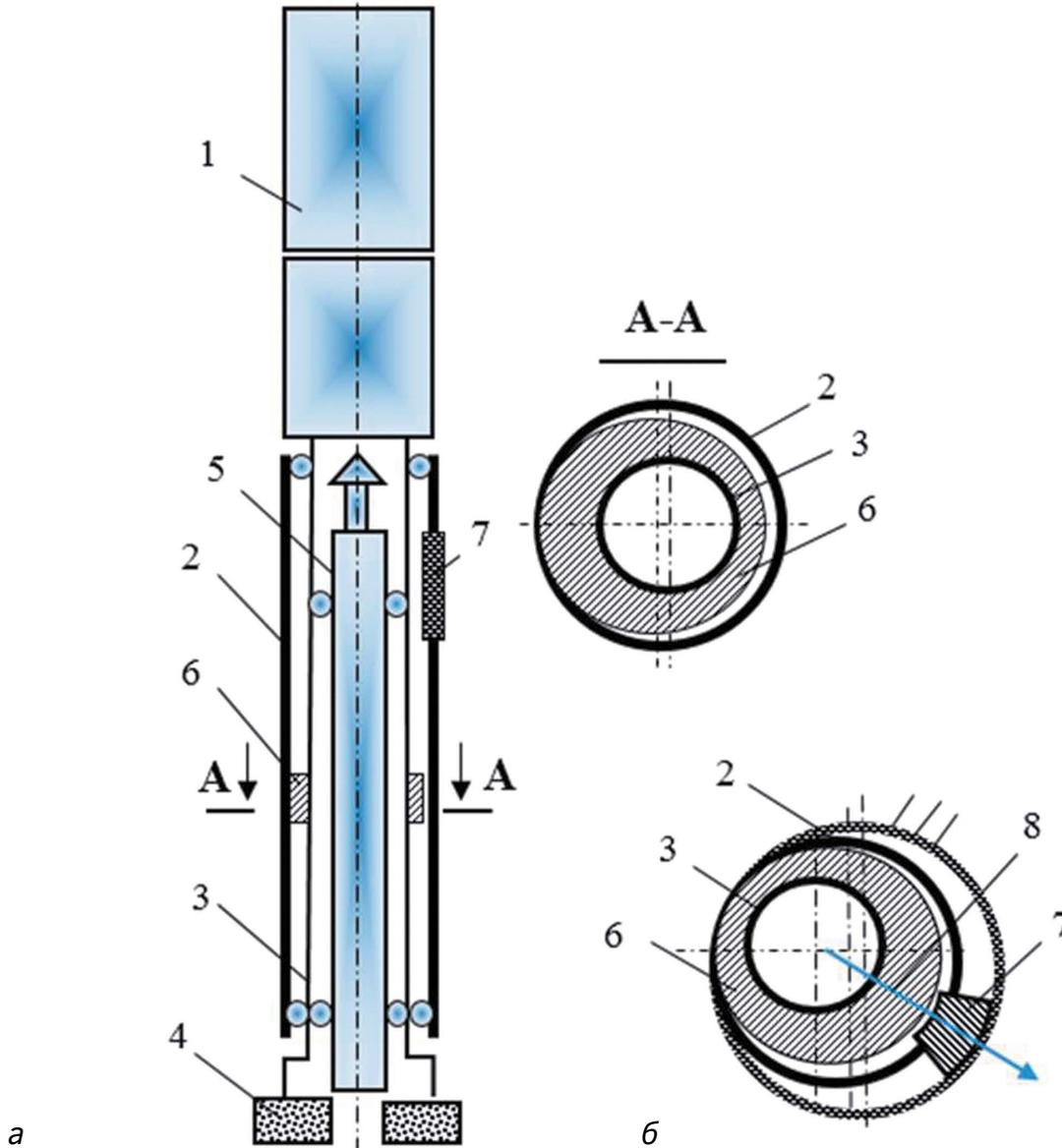
\* Corresponding author

На сегодня в геолого-разведочном бурении наиболее распространены снаряды со съёмными керноприемниками (ССК). При бурении геолого-разведочных скважин снарядами ССК возникают ситуации, когда при необходимости корректировки буровой скважины нет подходящих технических средств, которые удовлетворяли бы допустимой интенсивности набора кривизны из условий прочности бурильной колонны. Из отечественных самое

подходящее техническое средство для изменения направления буровой скважины — это забойный комплекс «КЕДР-76». Комплекс «КЕДР-76» обеспечивает реализацию требуемой интенсивности искривления в диапазоне 0,2—1,5 град/м. Данный диапазон подойдет только для снаряда типа NQ, его диапазон составляет 0,16—0,24 град/м. К недостаткам можно отнести сложность доставки, так как данный отклонитель делают только под заказ [3].

Из современных технических средств для изменения направления скважины стоит отметить снаряд направленного бурения для ССК компании Devisco. Данный снаряд способен изменять скважину в пространстве в процессе бурения и одновременно отбирать керн диаметром 31,5 мм. Снаряд может применяться с серийным снарядом типа NQ. Данный снаряд обеспечивает интенсивность

искривления 0,3 град/м. Принцип работы устройства Devidrill заключается в использовании ведущего вала (бурильной колонны), проходящего через эксцентриковую втулку (см. рис. 1), смещенную от центральной оси устройства, что обеспечивает изгиб колонкового набора под действием осевого усилия и перекося коронки. В верхней части набора на расстоянии 2 м устройство имеет



**Рис. 1.** Снаряд Devidrill: а — положение снаряда без реализации искривления; б — положение деталей снаряда при реализации искривления; 1 — бурильные трубы ССК; 2 — наружная труба колонкового набора; 3 — ведущий вал отклонителя; 4 — керноприемная труба; 5 — эксцентричная отклоняющая втулка; 6 — специальная коронка; 7 — выдвижной ползун; 8 — направление искривления ствола скважины

**Fig. 1.** Devidrill projectile: а — position without the implementation of curvature; б — the position of the parts of the projectile when the curvature is implemented; 1 — drill-pipes WCB; 2 — outside barrel core retrieving barrel; 3 — drive shaft diverter; 4 — inner core tube; 5 — eccentric deflecting sleeve; 6 — special diamond crown; 7 — retractable slider; 8 — direction of curvature of the wellbore

выдвижной ползун, который работает под давлением промывочной жидкости и воздействует на стенку скважины. Ползун выдвигается за пределы поверхности колонкового набора и, упираясь в стенку скважины с определённым усилием, фиксирует плоскость изгиба колонкового набора.

Внутренние составляющие снаряда включают в себя средства ориентирования отклонителя, съёмный керноприемник, систему переводников, трубу с инструментом для инклинометрии, который фиксирует данные с последующей их передачей на компьютер. Информация записывается внутри устройства и загружается на компьютер после каждого рейса. Основным недостатком отклонителя типа DeviDrill является необходимость подъёма всей бурильной колонны для замены стандартного колонкового набора на специальный колонковый набор с отклонителем. Это даёт возможность проводить искривление с отбором керна (меньшего диаметра), но резко ограничивает возможности оперативного корректирования направления ствола скважины при естественном ее искривлении. Также стоит отметить, что компания Devico не продает данный снаряд, а лишь оказывает услуги по бурению геолого-разведочных скважин [2].

Исходя из вышеперечисленного понятно, что геолого-разведочное бурение нуждается в оперативной корректировке направления ствола скважины без подъёма бурильной колонны. Также интенсивность искривления таким отклонителем не должна превышать допустимые значения интенсивности искривления по условию прочности бурильной колонны (табл. 1).

В поисках решения данной проблемы появилась идея создания съёмных отклоняющих комплексов. Разработки съёмных отклоняющих комплексов начались еще в Советском Союзе. Уже тогда была надобность в оперативной корректировке направления скважины. Данные отклонители призваны сократить затраты времени на спускоподъёмные

операции, при проведении работ по искусственному искривлению скважин.

В 1982 году был предложен способ направленного бурения скважин. Принцип работы таких устройств заключается в спуске отклонителя в скважину за место керноприемника, отбуривании интервала искривления, поднятии отклонителя на поверхность, спуске керноприемника и продолжении бурения [6].

В 1984 году было предложено устройство для изменения направления буровой скважины. Цель изобретения — повышение надежности в работе. Устройство для направленного бурения скважин включало колонковую трубу с коронкой, свободно расположенный в ее полости узел отклонения, состоящий из верхней полумуфты с выступом и нижней полумуфты с наклонным пазом для его размещения, жестко связанный с нижней полумуфтой направляющий шток с фиксирующим элементом и средство центрирования верхней полумуфты. Недостатком данного отклонителя является сложность конструкции, что вызывает его низкую надежность и работоспособность [5].

На основе двух вышеперечисленных способов и устройства был разработан съёмный отклоняющий комплекс «Рейс 59» [1]. Он предназначен для искусственного искривления геолого-разведочных скважин, буримых ССК-59, глубиной до 1200 метров, в монолитных и слабо трещиноватых породах VI—X категории по буримости без нарушения общей технологической схемы работы ССК, так как спуск «Рейс-59» в скважину и извлечение из нее осуществляются через внутренний канал бурильных труб без их подъёма на поверхность. К недостаткам данного съёмного отклонителя можно отнести то, что при его работе на забой устанавливается деревянная пробка, которая по завершении процесса искривления скважины остается на забое. Также стоит отметить, что данная конструкция подходит только для снаряда ССК-59 [1].

**Таблица 1.** Допустимые значения интенсивности искривления по условию прочности бурильной колонны  
**Table 1.** Permissible values of the intensity of curvature according to the condition of the drill string strength

Тип бурильной колонны	Допустимые значения интенсивности искусственного искривления, град/м
ССК-AQ	0,33—0,4
ССК-BQ	0,25—0,3
ССК-NQ	0,16—0,24
ССК-HQ	0,1—0,15
ССК-PQ	меньше 0,1

В связи с недостатками вышеперечисленных отклонителей предлагается устройство для направленного бурения скважин, включающее отклонитель с ориентирующим устройством и корпус с механизмом блокирования устройства внутри колонны бурильных труб с коронкой. Данный снаряд позволит оперативно производить корректировку направления скважины путем исключения спускоподъемных операций.

Устройство выполнено в виде подпружиненного штока с возможностью продольного перемещения на длину штока внутри корпуса отклонителя, при этом внешний диаметр штока не превышает внутреннего диаметра коронки, а корпус отклонителя соединен с корпусом механизма блокирования с помощью шарнира, обеспечивая возможность отклонения штока в одной заданной плоскости. На нижнем конце штока выполнен профильный башмак, профиль которого имеет скос торца, при этом направление скоса торца противоположно направлению отклонения штока, а на штоке над шарниром установлена втулка с возможностью продольного скольжения по штоку, при этом наружная форма втулки соответствует внутренней форме коронки. Длина штока находится по формуле:

$$L_{\omega} = N / \sin(\beta),$$

где  $\beta$  — угол отклонения штока, град;  $N$  — расстояние от нижнего конца штока до осевой линии съёмного отклонителя.

Данное устройство будет разрабатываться под каждый тип снаряда со съёмным керноприемником исходя из допустимых значений интенсивности по условию прочностных свойств бурильной колонны (табл. 1).

Съёмный снаряд направленного бурения имеет скос (рис. 2), на торце которого имеются резцы 10. Над штоком установлен шарнир 5, который фиксирует угол отклонения штока 4. Шток 4 закреплен в корпусе отклоняющего модуля 3. Также имеется фиксирующая втулка 6, которая повторяет внутреннюю форму коронки 13, за счет этого плотно прилегает к ней и отклонитель надежно зафиксирован в колонне бурильных труб 12, также втулка 6 снижает вибрации штока 4. В фиксирующую втулку 6 впрессована металлическая резьба 11 для соединения с корпусом 3, также во втулке 6 имеются промывочные каналы 9, общая площадь которых примерно равна зазору между керноприемной тубой (не показана на чертеже) и колонной бурильных труб 12, ориентатор 1 и механизм блокирования 2.

Отклоняющий модуль включает в себя направляющий шток 4 с профильным башмаком 8.

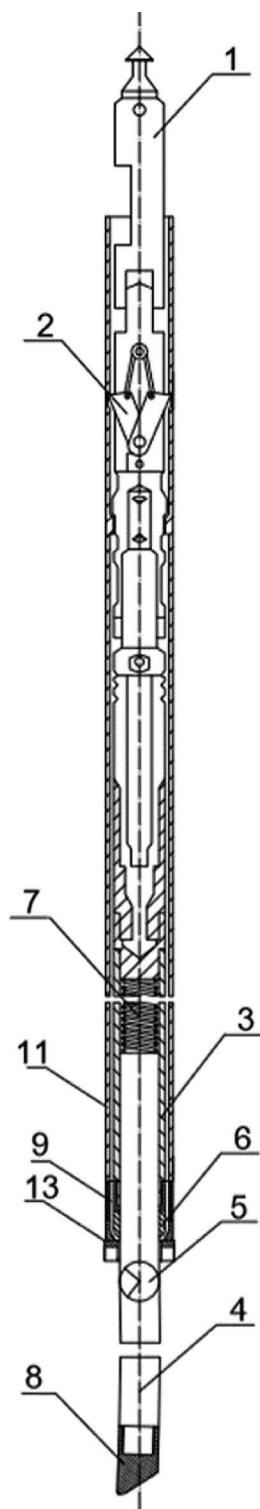
Устройство работает следующим образом (рис. 3). Перед началом работ устройство ориентируют на поверхности, поднимают керноприемник (не показан на чертеже) из колонны бурильных труб 12, колонну приподнимают на длину штока 4 и отклонитель на забой, за счет ориентатора 1 устройство само ориентируется под действием сил тяжести. С помощью механизма блокирования 2 устройство для направленного бурения скважин закрепляется в колонне бурильных труб 12. Шток 4 может отклоняться относительно шарнира 5, что позволяет установить отклонитель на самый край пенька. Фиксирующая втулка 6 повторяет внутреннюю форму коронки 13, за счет этого плотно прилегает к ней и отклонитель зафиксирован в колонне бурильных труб 12. Также втулка 6 снижает вибрации штока 4. После установки под действием осевой нагрузки и скоса на башмаке 8 (рис. 4) шток 4 отклоняется в одной плоскости, за счет шарнира 5 угол перекося штока 4 фиксируется. Резцы 10 врезаются в породу, за счет этого происходит фиксация штока 4 на забое. По мере фрезерования стенки скважины и углубления штока 4 под действием осевого усилия заезжает внутрь отклонителя, сжимая пружину 7. При отбуривании интервала, равного длине штока 4, при необходимости набора большего угла отклонения необходимо повторить вышеперечисленные операции. После проведения работ по корректировке направления скважины устройство извлекают из колонны бурильных труб без подъема колонны, спускают керноприемник и продолжают бурение.

В дальнейшем планируется модернизация профильного башмака под разные типы забоев, также возможен отказ от искривленного направляющего штока с целью повышения его прочностных свойств.

Данное решение позволит сократить затраты времени на спускоподъемные операции, а также понизит себестоимость одного метра бурения.

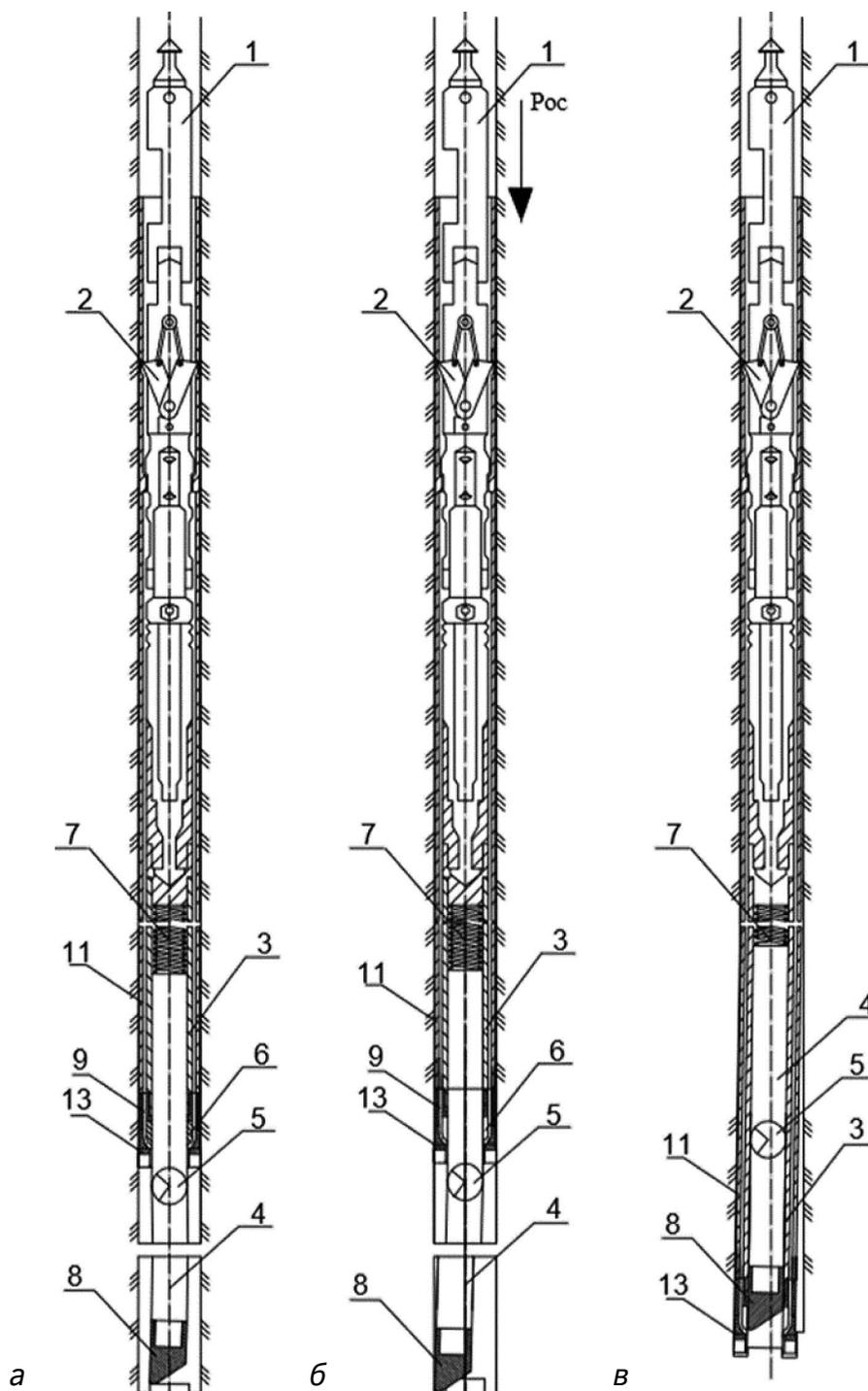
Для обоснования экономической эффективности были произведены расчеты для трех отклонителей исходя из затрат времени на спускоподъемные операции [4]. Стоимость метра бурения для отклонителя непрерывного действия рассчитана по формуле (1):

$$C_M = \frac{C_{st}}{T} \cdot \left( \frac{1}{v_m} + \frac{2H \cdot K}{l_r} + \frac{2H \cdot K + S}{l_p} + \frac{2H \cdot K}{n \cdot l_p} \right), \quad (1)$$



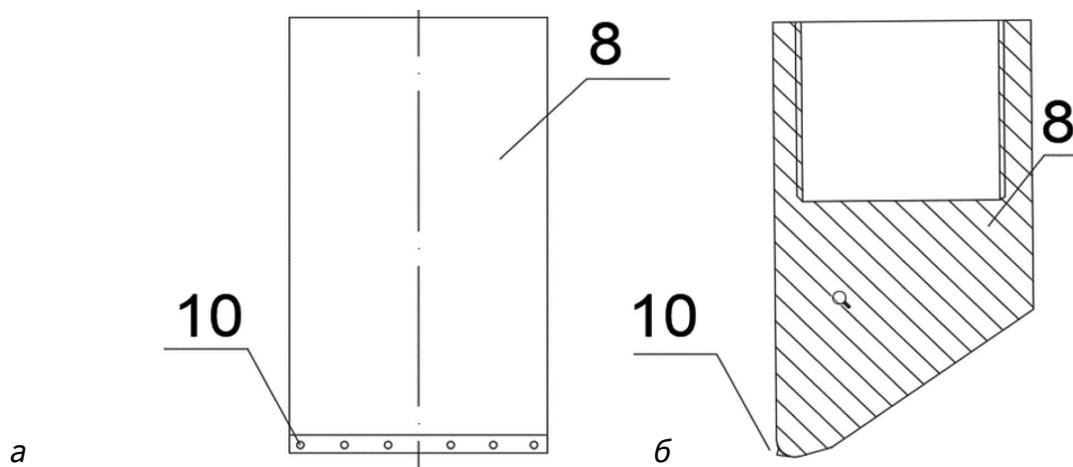
**Рис. 2.** Схема съемного отклонителя: 1 — ориентатор, 2 — механизм блокирования, 3 — корпус отклоняющего модуля, 4 — направляющий шток, 5 — шарнир, 6 — фиксирующая втулка, 7 — пружина сжатия, 8 — профильный башмак, 9 — промывочные каналы, 11 — металлическая резьба, 13 — алмазная коронка

**Fig. 2.** Scheme of a removable diverter: 1 — orientator, 2 — blocking mechanism, 3 — deflector module body, 4 — guide rod, 5 — hinge, 6 — fixing sleeve, 7 — compression spring, 8 — profile shoe, 9 — flushing channels, 11 — metal thread, 13 — diamond crown

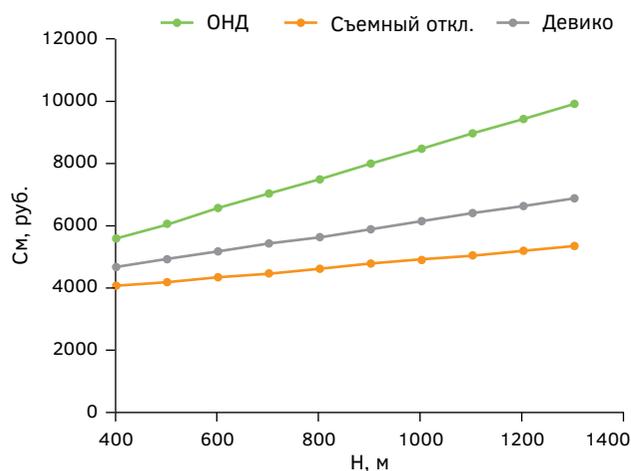


**Рис. 3.** Схема работы съемного отклоняющего комплекса: а — установка отклонителя на забой; б — отклонение штока под действием осевой нагрузки; в — корректировка направления: 1 — ориентатор, 2 — механизм блокирования, 3 — корпус отклоняющего модуля, 4 — направляющий шток, 5 — шарнир, 6 — фиксирующая втулка, 7 — пружина сжатия, 8 — профильный башмак, 9 — промывочные каналы, 11 — металлическая резьба, 13 — алмазная коронка

**Fig. 3.** Scheme of operation of the removable deflecting complex: а — installation of the diverter at the bottom; б — stem deflection under the action of axial load; в — direction correction: 1 — orientator, 2 — blocking mechanism, 3 — deflecting module housing, 4 — guide rod, 5 — hinge, 6 — fixing sleeve, 7 — compression spring, 8 — profiled shoe, 9 — flushing channels, 11 — metal thread, 13 — diamond crown



**Рис. 4.** Схема профильного башмака: а — схема размещения резцов на башмаке; б — профиль башмака: 8 — профильный башмак, 10 — породоразрушающий резец  
**Fig. 4.** Scheme of the profile shoe: а — the layout of the cutters on the shoe; б — shoe profile: 8 — profile shoe, 10 — rock cutting cutter



**Рис. 5.** График зависимости стоимости одного метра бурения от глубины  
**Fig. 5.** Graph of the dependence of the cost of one meter of drilling on the depth

где  $C_{st}$  — стоимость станкосмены, тыс. руб.;  $T$  — время станкосмены, час;  $H$  — глубина скважины;  $K$  — время, затрачиваемое на спуск 1 м колонны;  $l_r$  — длина рейса;  $S$  — время, затрачиваемое на ориентацию отклонителя;  $n$  — число проработок интервала искривления;  $v_m$  — механическая скорость бурения;  $l_p$  — длина участка искривления / проработки.

Для устройства Devidrill формула будет иметь следующий вид:

$$C_m = \frac{C_{st}}{T} \cdot \left( \frac{1}{v_m} + \frac{2H \cdot K}{l_r} + \frac{2H \cdot K + S}{l_p} \right). \quad (2)$$

Так как снаряд направленного бурения компании Deviso разработан для ССК, ему не требуется проработка интервала искривления, но перед бурением необходимо заменить нижнюю часть компоновки.

Расчет экономической эффективности предлагаемого устройства был выполнен по формуле (3):

$$C_m = \frac{C_{st}}{T} \cdot \left( \frac{1}{v_m} + \frac{2H \cdot C + S}{l_p} \right), \quad (3)$$

где  $C$  — время на спуск 1 метра троса съемного снаряда направленного бурения.

Для визуализации и удобства сравнения были построены графики зависимости стоимости метра бурения от глубины бурения (рис. 5).

Из всего этого можно сделать вывод, что использование отклонителей непрерывного действия целесообразно для корректировки направления скважины, так как повышается время, требуемое для проходки скважины. Использование предлагаемого устройства позволит существенно сократить это время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костицин Ю.С., Соловьев Ю.Г., Нескоромных В.В., Закиев Р.Б., Блохин Ю.Ф. Современные методы и технологии по управлению траекториями геологоразведочных скважин. Иркутск: Изд-во. ИргТУ, 2004.
2. 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.
3. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. М.: ИНФРА-М, 2015. 41 с.
4. Пат. 2714998 РФ, СПК E21B 7/06. Устройство для направленного бурения скважин / Нескоромных В.В. Комаровский И.А.; заявитель и патентообладатель федерально государственное автономное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»; опубл. 21.02.2020.
5. Пат. 1615306 СССР, МПК E21B 7/08. Устройство для изменения направления буровой скважины / Р.Б. Закиев, Ю.В. Андреев; заявитель и патентообладатель Забайкальский комплексный научно-исследовательский институт. № 622.243.2(088.8); опубл. 23.12.1990.
6. Пат. 1067187 СССР, МПК E21B 7/04. Способ направленного бурения скважин / Ю.С. Костицин, Ю.В. Андреев, Р.Б. Закиев; заявитель и патентообладатель Забайкальский комплексный научно-исследовательский институт. № 622.243.2(088.8); опубл. 15.01.1984.

## REFERENCES

1. Kostitsin Yu.S., Soloviev Yu.G., Neskromnykh V.V., Zakiev R.B., Blokhin Yu.F. Modern methods and technologies for controlling the trajectories of exploration wells. Irkutsk: Publishing House. IrSTU, 2004.
2. Neskromnykh V.V., Lysakov D.V. Development of technologies and means of drilling additional boreholes with artificial face deflectors of continuous action in solid and very hard rocks // Izvestiya higher educational institutions. Geology and exploration. 2020, No. 2, pp. 86—94.
3. Neskromnykh V.V. Optimization in geological exploration production. Moscow: INFRA-M, 2015. 41 p.
4. Pat. 2714998 RF, SEC E21B 7/06. Device for directional drilling of wells /Neskromnykh V.V. Komarovsky I.A.; applicant and patent holder Federal State Autonomous Institution of Higher Education «Siberian Federal University»; publ. 02/21/2020.
5. Pat. 1615306 USSR, IPC E21B 7/08. Device for changing the direction of a drilling well / R.B. Zakiev, Yu.V. Andreev; applicant and patent holder Zabaikalsky Integrated Research Institute. No. 622.243.2(088.8); publ. 23.12.1990.
6. Pat. 1067187 USSR, IPC E21B 7/04. Method of directional drilling of wells / Yu.S. Kostitsin, Yu.V. Andreev, R.B. Zakiev; applicant and patent holder Zabaikalsky Integrated Research Institute. No. 622.243.2(088.8); publ. 15.01.1984.

## ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Нескоромных В.В. — внес вклад в разработку концепции статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Комаровский И.А. — внес вклад в анализ работы отклонителей, участвовал в разработке конструкции съёмного отклоняющего комплекса, выполнил перевод текста на английский язык, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Петенев П.Г. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Vyacheslav V. Neskromnykh — contributed to the development of the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Igor A. Komarovsky — contributed to the analysis of the work of the deflectors, participated in the design of the removable deflecting complex, translated the text into English, approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Pavel G. Petenev — developed the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Нескоромных Вячеслав Васильевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и техника разведки» Института горного дела технологии и геотехнологий ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».  
79, Свободный проспект, г. Красноярск 660041, Россия  
e-mail: [sovair@bk.ru](mailto:sovair@bk.ru)  
тел.: +7 (902) 976-23-64, +7 (391) 206-37-72  
SPIN-код: 1506-9273  
Scopus ID: 57194141875

**Vyacheslav V. Neskromnykh** — Dr. of Sci. (Tech.), Prof., Head of the Department of Exploration Technologies and Techniques, Institute of Mining Technology and Geotechnology, Siberian Federal University.  
79, Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk 660041, Russia  
e-mail: [sovair@bk.ru](mailto:sovair@bk.ru)  
tel.: +7 (902) 976-23-64, +7 (391) 206-37-72  
SPIN-code: 1506-9273  
Scopus ID: 57194141875

**Комаровский Игорь Андреевич\*** — старший лаборант кафедры технологии и техники разведки Института горного дела технологии и геотехнологий ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».  
79, Свободный проспект, г. Красноярск 660041, Россия  
e-mail: [igorkomarovskij702@gmail.com](mailto:igorkomarovskij702@gmail.com)  
тел.: +7 (923) 758-79-77; +7 (391) 206-37-72  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8052-2770>

**Igor A. Komarovskiy\*** — Senior Laboratory Assistant at the Department of Exploration Technology and Engineering, Institute of Mining Technology and Geotechnology, Siberian Federal University.  
79, Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk 660041, Russia  
e-mail: [igorkomarovskij702@gmail.com](mailto:igorkomarovskij702@gmail.com)  
tel.: +7 (923) 758-79-77; +7 (391) 206-37-72  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8052-2770>

**Петенев Павел Геннадьевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела технологии и геотехнологий ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».  
79, Свободный проспект, г. Красноярск 660041, Россия  
e-mail: [pavel-whait@mail.ru](mailto:pavel-whait@mail.ru)  
тел.: +7 (929) 357-38-98; +7 (391) 206-37-72  
SPIN-код: 2580-8023

**Pavel G. Petenev** — Cand. of Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Department of Exploration Technology and Engineering, Institute of Mining Technology and Geotechnology, Siberian Federal University.  
79, Svobodnyy prosp., Krasnoyarsk 660041, Russia  
e-mail: [pavel-whait@mail.ru](mailto:pavel-whait@mail.ru)  
tel.: +7 (929) 357-38-98; +7 (391) 206-37-72  
SPIN-code: 2580-8023

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author