

УДК 622.24.051
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4874
Шифр специальности ВАК: 2.8.1
Научная статья

Совершенствование конструкций алмазного инструмента с торцевой промывкой

М.С. Попова^{1✉}, Е.В. Кускаева²

¹ Югорский государственный университет, Россия, г. Ханты-Мансийск

² Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

✉ alleniram83@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Современные пути совершенствования бурового инструмента направлены на получение конструкций, позволяющих повысить качество бурения скважин. При этом геометрия колонкового инструмента должна способствовать повышению выхода керна и сохранению его целостности. Существующий серийно-выпускаемый буровой инструмент позволяет достигать высоких показателей процесса сооружения скважин, решать проблемы вскрытия и отбора проб в разрезах, отличающихся сложными условиями бурения. Так, конструкция бурового инструмента с торцевой промывкой обеспечивает проникновение очистного агента непосредственно под его рабочий торец без контакта с керном, что способствует сохранению получаемой горно-геологической информации пробы. Применение такого бурового инструмента наиболее актуально при отборе проб мягких, сильно разрушенных или рыхлых горных пород. Учитывая указанную область использования, основным недостатком конструкции промывочной системы инструмента с торцевыми каналами является высокая вероятность их засорения. Устранение всякой возможности засорения торцевых промывочных каналов способствует реализации полноценной работы инструмента, повышению эффективности бурения. В работе проведен анализ гидродинамических процессов, протекающих в промывочной системе инструмента и в призабойной зоне скважины, позволивший определить причины засорения каналов. Представленная модернизация геометрии инструмента произведена с целью устранения выявленных причин и улучшения циркуляции очистного агента. **Целью** работы является модернизация конструкции промывочной системы буровой коронки с торцевой промывкой, обеспечивающей оптимальные параметры напора и скорости потока промывочной жидкости для предотвращения засорения торцевых промывочных каналов. **Объекты:** гидродинамические процессы, протекающие в промывочной системе колонкового бурового инструмента с торцевой промывкой. **Методы:** аналитический метод, метод компьютерного моделирования. **Результаты.** Представлен способ модернизации промывочной системы алмазного инструмента с торцевой промывкой. За счет создания предложенным способом благоприятных условий течения очистного агента улучшается очистка рабочей поверхности инструмента, решается проблема засорения фронтальных каналов промывочной системы, размещенных в торцевой части коронок. Представленная конструкция промывочной системы коронки позволяет полноценно реализовать функции очистного агента без потерь гидравлической энергии и тем самым повысить качество бурения скважины и отбора керна в рыхлых, мягких, легкоразрушаемых горных породах. Эффект достигается за счет устранения зон гидравлических сопротивлений, возникающих в местах стыка конструктивных элементов буровой коронки.

Ключевые слова: бурение, компьютерное моделирование, буровой инструмент, промывочная система, торцевая промывка, алмазная коронка, конструкция, гидравлическое сопротивление, скорость течения жидкости

Для цитирования: Попова М.С., Кускаева Е.В. Совершенствование конструкций алмазного инструмента с торцевой промывкой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4874

UDC 622.24.051
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4874
Scientific paper

Improving the designs of diamond tools with end washing

M.S. Popova^{1✉}, E.V. Kuskaeva²

¹Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉alleniram83@mail.ru

Abstract. Relevance. Modern ways of upgrading drilling tools are aimed at obtaining designs that improve the quality of well drilling. At the same time, the geometry of the core tool should contribute to an increase in the core yield and maintain its integrity. The existing serially produced drilling tool allows achieving high indicators of the well construction, solving the problems of opening and sampling in sections with difficult drilling conditions. Thus, the design of the drilling tool with end flushing ensures the penetration of the cleaning agent directly under its working end without contact with the core, which helps to preserve the obtained mining and geological information of the sample. The use of such a drilling tool is most relevant when sampling soft, heavily destroyed or loose rocks. Given the specified area of use, the main disadvantage of the design of the flushing system of the tool with end channels is the high probability of their sludge contamination with the onset of negative consequences that reduce the technical and economic indicators of drilling and the potential of the tool. Thus, eliminating any possibility of clogging of the end flushing channels contributes to the implementation of the full-fledged operation of the tool. The work analyzes the hydrodynamic processes occurring in the flushing system of the tool and in the bottomhole zone of the well, which made it possible to determine the causes of channel clogging. The presented modernization of the tool geometry was made in order to eliminate the identified causes and improve the circulation of the cleaning agent. **Aim.** To develop a design for a flushing system for a drill bit with end flushing, providing optimal parameters of pressure and flow rate of flushing fluid in order to prevent clogging of the end flushing channels. **Objects.** Hydrodynamic processes occurring in the flushing system of a core drilling tool with end flushing. **Methods.** Analytical method, computer modeling method. **Results.** The paper presents a method for modernizing the flushing system of a diamond tool with end flushing. By creating favorable conditions for the flow of the cleaning agent by the proposed method the authors have solved the problem of slagging of the front channels of the flushing system located in the end part of the crowns and improved the cleaning of the tool working surface. The presented design of the flushing system of the crown allows fully implementing the functions of the cleaning agent without loss of hydraulic energy, and thereby improving the quality of well drilling and core sampling in loose, soft, easily destructible rocks. The effect is achieved by eliminating the zones of hydraulic resistance that occur at the junction of the structural elements of the drill crown.

Keywords: drilling, computer modeling, drilling tool, flushing system, end flushing, diamond crown, design, hydraulic resistance, fluid flow rate

For citation: Popova M.S., Kuskaeva E.V. Improving the designs of diamond tools with end washing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4874

Введение

Развитие научных, инженерных основ конструирования бурового инструмента позволяет решать ряд проблем, возникающих в процессе бурения скважин. Наиболее перспективным на сегодняшний день является алмазный буровой инструмент. Как показывают результаты производственного бурения, такой вид инструмента имеет широкую область применения, эффективен в сложных горно-геологических условиях, работоспособен при разрушении перемежающихся по твердости горных пород и так далее [1–25]. Алмазные долота и коронки обладают высокими показателями прочности и износостойкости, позволяют достигать высокой скорости бурения. Алмазный инструмент приме-

ним в составе различных снарядов, является основным при использовании специальных керноприемников, таких, например, как снаряды со съёмным керноприемником (ССК). К тому же именно такой тип инструмента наиболее подходящий для реализации сложных конструкторских решений, что легко осуществляется за счет изменения геометрии графитовой пресс-формы, с помощью которой производится изготовление его элементов.

Известные производители рекомендуют использовать алмазный инструмент для бурения как в твердых, так и в мягких горных породах, гарантируя эффективность его эксплуатации [26]. Как показывает практика, расширение области применения алмазного инструмента достижимо за счет мо-

дернизации геометрических параметров его режущей части и промывочной системы [2, 3, 16–18, 22, 24]. Поэтому серийно выпускаемый алмазный инструмент отличается достаточным многообразием. В то же время при своих положительных качествах такой инструмент не лишен недостатков, устранение которых требует новых научных подходов, учитывающих изменяющиеся условия эксплуатации бурового инструмента. Подбор бурового инструмента путем промышленных испытаний слишком затратный. Наличие проверенного и научно обоснованного инженерного аппарата разработки бурового инструмента обеспечивает оперативность изготовления инструмента рациональной конструкции. Исследования, направленные на совершенствование конструкций алмазного бурового инструмента, являются актуальными и имеют промышленное значение.

Одним из важных конструктивных параметров алмазного бурового инструмента выступает геометрия промывочной системы. Существует большое количество конфигураций промывочной системы, каждый геометрический элемент которой позволяет реализовывать определенную функцию очистного агента, направляя его струю для выполнения той или иной цели (очистки от шлама, охлаждения инструмента, разрушения (предразрушения) горной породы, снижения сопротивления со стороны забоя и т. д.). Так, внедрение торцевой промывки позволяет очистному агенту проникать непосредственно под рабочий торец инструмента без контакта с керном, что способствует сохранению получаемой горно-геологической информации пробы. Как утверждают производители, такая конструкция коронки наиболее актуальна при отборе проб мягких, сильно разрушенных или рыхлых горных пород [26]. Исходя из указанной области применения, основным недостатком конструкции инструмента с торцевыми промывочными каналами выступает высокая вероятность их зашламования (при большом скоплении шлама, крупной фракции разрушенной породы, высоких скоростях бурения и т. д.).

Целью работы является выявление с последующим устранением причин засорения торцевых каналов и разработка конструкции промывочной системы коронки с торцевой промывкой, обеспечивающей оптимальные параметры напора и скорости потока промывочной жидкости для предотвращения засорения фронтальных промывочных каналов.

Анализ конструкции коронки с торцевыми промывочными каналами

При разработке конструкции промывочной системы бурового инструмента возникает необходимость исследования гидродинамических процессов,

протекающих не только в ее каналах, но и за их пределами, т. е. в призабойной зоне скважины. Принимая во внимание, что особо важным является результат течения жидкости под рабочим торцом алмазного инструмента, требуется тщательное изучение условий выхода жидкости из промывочных каналов и последующего ее движения на забое скважины. При этом важно учитывать все явления, возникающие в процессе бурения. Для изучения гидродинамики потока жидкости должен использоваться комплексный подход, одновременно учитывающий глубину бурения, реологические свойства очистного агента, величину подачи промывочной жидкости, количество рабочих секторов или лопастей инструмента и их конструкцию, а также силы, возникающие на забое и влияющие на направление и характер течения жидкости. Взаимосвязь этих и других факторов оказывает влияние на скорость, давление, режим течения и направление потока, которые в свою очередь участвуют в призабойных процессах и в некоторой степени определяют результаты бурения и эксплуатации инструмента. Ранее проведенные исследования [24] показали, что крутящий момент, возникающий при вращении буровой колонны, оказывает влияние на режим течения жидкости как на забое скважины, так и в каналах промывочной системы. В то же время немаловажной является геометрия элементов промывочной системы и их сопряжения, в совокупности создающих или устраняющих сопротивление потоку жидкости и тем самым изменяющих его характеристики [19, 24]. Таким образом, исследование должно учитывать все факторы, оказывающие влияние на гидравлические свойства течения жидкости, и быть направлено на улучшение характеристик потока бурового раствора на забое скважины в процессе бурения.

Для детального анализа геометрических параметров алмазных коронок с торцевой промывкой за основу принята модель серийно-выпускаемой коронки *Epiroc* (рис. 1). Согласно рекомендации производителя коронок ООО «Эпирок Рус», данный буровой инструмент применим для бурения в разрушенных и зернистых породах [26]. Как показывает производственный опыт бурения *Epiroc exFD*, полученный на объектах АО «Красноярская буровая компания», использование данной коронки в геологических разрезах, содержащих уголь, часто приводит к возникновению прихвата, вызванного зашламованием торцевых промывочных каналов угольной крошкой. Конструкция коронки *Epiroc exFD* предполагает наличие промывочных каналов внутри корпуса, через которые подается промывочный раствор к забою (на рис. 1, а направление жидкости в канале указано стрелками). Стандартная конструкция промывочной системы снаряда с

коронкой *Epiroc exFD* предполагает наличие последовательно связанных между собой каналов различного размера и формы (рис. 1, а). Такие конструктивные особенности внутренней части инструмента ведут к возникновению зоны – 1 (рис. 1, а), где характер течения жидкости претерпевает изменения, а в случае даже частичного засорения выходных отверстий торцевого канала коронки – 2 (рис. 1, а, б) циркуляция жидкости на забое скважины прекращается, что влечет за собой негативные последствия: скопление шлама, нагрев рабочей части, зашламование каналов и т. д.

Факторами зашламования выходного отверстия торцевого промывочного канала могут выступать: высокая дисперсность шлама, нерациональный режим бурения, а также низкая величина скорости потока жидкости, недостаточная для очистки канала от шлама. Потери скорости потока связаны с местными сопротивлениями, возникающими из-за такой конструкции изучаемой промывочной системы, где происходит сложный переход от канала крупного сечения в канал значительно меньшего сечения. При этом местные сопротивления не только являются основанием падения скорости движения жидкости, но и могут быть причиной изменения направления потока.

Как показывает анализ гидродинамических процессов, протекающих в торцевом промывочном канале коронки *Epiroc* (рис. 1), наибольшие местные потери напора возникают в прямых углах перехода из канала меньшего диаметра в канал большего диаметра. В таких углах образуется так называемая «мертвая» зона [19, 23]. Пространство углов заполняется жидкостью, которая находится в вихревом состоянии и не участвует в движении потока, а только тормозит его. Учитывая малые размеры каналов, возникающие таким образом местные сопротивления оказывают значительное влияние на

режим течения жидкости, изменяя тем самым условия выхода жидкости к рабочему торцу коронки. При этом потери энергии тем больше, чем больше объем пространства углов.

К тому же в промывочной системе коронки *Epiroc* в зоне 1 (рис. 1) происходит резкое расширение потока, что само по себе ведет к потерям напора. Так как поток между рассматриваемыми сечениями расширяется, скорость его уменьшается, а давление возрастает.

Местные потери напора потока в данном случае можно определить по формуле (1) как:

$$h_{\text{рас}} = \varepsilon^2 \cdot \frac{v_1^2}{2g}, \quad (1)$$

где $\varepsilon = (1 - \frac{S_1}{S_2})^2$ – коэффициент потерь энергии потока; S_1 и S_2 – площадь поперечного сечения промывочных каналов; v_1 – скорость течения жидкости.

Из формулы видно, что потери энергии потока также определяются соотношением площадей поперечного сечения соединяющихся промывочных каналов.

Исходя из изложенного, следует, что конструкция торцевого промывочного канала коронки является причиной возникновения застойной зоны 1 (рис. 1, а), в которой жидкость находится в состоянии медленного циркуляционного движения, не участвуя в главном движении потока, что способствует ухудшению промывания каналов вследствие потери напора жидкости. Данный вид движения создает повышение местных сопротивлений, вызывает значительные потери энергии струи, т. к. в нем происходят отрыв потока и вихреобразование.

Для стабилизации напора и сохранения скорости потока необходимо предотвратить внезапное увеличение сечения и скруглить омываемые жидкостью внутренние элементы промывочной системы.

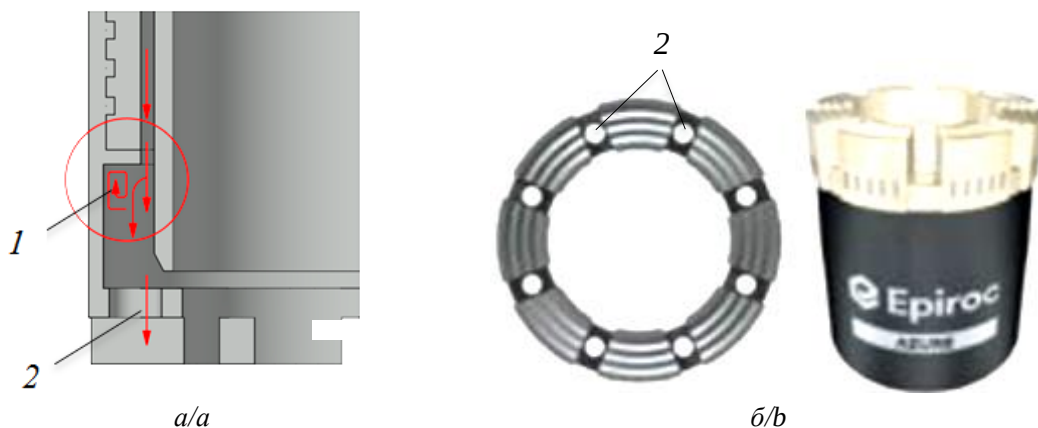


Рис. 1. Конструкция промывочной системы серийно выпускаемой коронки с торцевой промывкой: а) конструкция внутренней части одного канала; б) коронка *Epiroc*; 1 – зона сложного течения жидкости; 2 – торцевые каналы
Fig. 1. Design of the flushing system of a serially produced crown with end flushing: а) design of the inner part of one channel; б) *Epiroc* crown; 1 – zone of complex liquid flow; 2 – end channels

Определение влияния конструкции на гидродинамические процессы

Как показывают ранее проведенные исследования [23], при плавном переходе от канала одного диаметра к каналу другого диаметра коэффициент сопротивления может снижаться в 5–10 раз в зависимости от угла между стенками участка стыка каналов.

Учитывая имеющиеся результаты и анализ течения жидкости в промывочной системе алмазной коронки с торцевой промывкой, для устранения выявленных недостатков и достижения поставленных целей предложено выполнять наплавку в зоне перехода из канала малого диаметра в канал большего диаметра (зона 1, рис. 1, а). При этом во внутренней части промывочной системы коронки наплавки 1 могут выполняться различной формы сечения и размера. Размещение наплавки должно быть таким, чтобы достигалась стабилизация течения жидкости в узких каналах промывочной системы коронки. Таким образом, проектирование геометрических параметров наплавки должно основываться на выполнении условий сглаживания и по-

степенности. Следовательно, наплавка может либо иметь исполнение в виде прямолинейного скоса, либо быть полукруглой.

Возможные, наиболее приемлемые для рассматриваемой конструкции коронки, варианты исполнения промывочной системы, приведены на рис. 2.

Учитывая геометрию полученного в результате модернизации конструкции поперечного сечения канала, местные потери напора бурового раствора на расширение должны рассчитываться согласно законам гидравлики по формуле (2) с учетом коэффициента «смягчения» потока, зависящего от угла расширения α , величина которого в рассматриваемом случае определяется формой наплавки:

$$h_{\text{рас}} = k \cdot \varepsilon \cdot \frac{v_1^2}{2g}, \quad (2)$$

где $k = \sin \alpha$ – коэффициент смягчения потока.

Для полученных в результате модернизации промывочной системы геометрических параметров произведен расчет величины местных потерь напора бурового раствора. Некоторые результаты расчетов приведены в таблице.

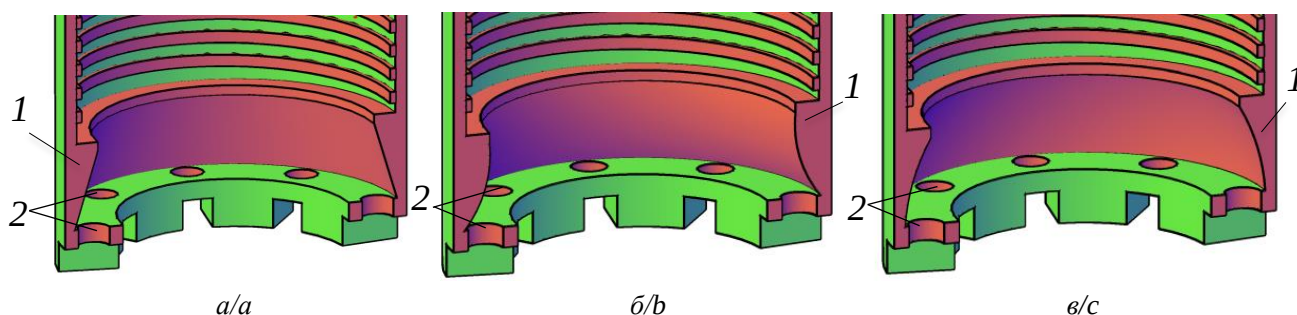


Рис. 2. Конструкции промывочной системы коронки с наплавкой в канале (фронтальный разрез): а) наплавка в виде прямого скоса; б) выпуклая наплавка; в) вогнутая наплавка; 1 – наплавка; 2 – торцевые промывочные каналы

Fig. 2. Designs of the flushing system of the crown with a surfacing in a channel of a larger diameter (frontal section): а) surfacing in the form of a straight bevel; б) convex surfacing; в) concave surfacing; 1 – surfacing; 2 – end flushing channels

Таблица. Зависимость местных сопротивлений, возникающих в торцевых каналах, от их формы и размеров поперечного сечения (для коронки Epiroc диаметром 95,6 мм)

Table. Dependence of local resistances arising in end channels on their shape and cross-sectional dimensions (for Epiroc crown diameter 95.6 mm)

Параметр/Parameter	Вариант конструкции/Design option			
	коронка Epiroc Epiroc crown	с наплавкой/with surfacing		
		прямой скос straight bevel	вогнутая concave	выпуклая convex
площадь поперечного сечения канала большего диаметра, S_1 , мм ² cross-sectional area of a larger diameter channel, S_1 , mm ²	4753,9	4753,9	4753,9	4753,9
площадь поперечного сечения канала меньшего диаметра, S_2 , мм ² cross-sectional area of the channel of smaller diameter S_2 , mm ²	6432,6	5541,7	5944,6	4963,9
местные потери напора потока, $h_{\text{рас}}$ local losses of flow pressure, $h_{\text{рас}}$	0,0312	0,0092	0,0184	0,0008

Как показывает анализ результатов расчета, наличие наплавки во внутренней части канала незначительно (не более чем на 10–20 %) снижает площадь поперечного сечения каналов, при этом показатель местных потерь напора потока ($h_{\text{рас}}$) снижается более чем в 2 раза. Наилучший показатель наблюдается при выполнении наплавки в виде выпуклой полусферы. Такой эффект можно обосновать тем, что образованный полукруглой формой плавный переход позволяет устранить «мертвые» зоны в углах стыка элементов промывочной системы и снизить резкий перепад давления жидкости в каналах.

Таким образом, предложенный способ координации течения жидкости в каналах промывочной системы бурового инструмента посредством наплавки является действенным для улучшения циркуляции раствора во внутренней полости торцевых каналов бурового инструмента.

Для более детального исследования гидродинамических процессов, протекающих в каналах предлагаемых конструкций, и реализации комплексного подхода, учитывающего наибольшее количество параметров бурения, применен хорошо зарекомендовавший себя метод компьютерного моделирования, реализуемый на платформе систем автоматизированных инженерных расчетов, с последующей проверкой сходимости результатов, в том числе аналитического исследования и производственного бурения [4, 5, 18]. В качестве исходных данных приняты параметры, зафиксированные в ходе бурения коронкой *Epiroc exFD* на объектах АО «Красноярская буровая компания», а также рекомендуемые производителями коронок [26].

Согласно результатам компьютерного моделирования (рис. 3), плавный переход из канала в канал позволяет устранить потери скорости течения

на преодоление сопротивлений в «мертвых» зонах, возникающих в большей мере в прямых углах. При одинаковых условиях наличие выпуклой наплавки во внутреннем канале позволяет увеличить скорость течения жидкости в торцевых каналах и на выходе у рабочего торца коронки более чем в два раза.

Заключение

На основании проведенного компьютерного моделирования определено следующее:

- 1) предложенные конструкции промывочной системы коронок (рис. 2) позволяют устранить резкий перепад давления жидкости при ее истечении из одного канала в другой, отличающихся размерами, и, как следствие, сохранить скорость течения жидкости при выходе из коронки на забой;
- 2) изменение размера поперечного сечения канала за счет различного объема производимой наплавки позволяет координировать гидродинамические условия течения жидкости и регулировать параметры потока;
- 3) форма наплавки определяет режим течения бурового раствора и направление его струи.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что сохранению гидравлической энергии бурового раствора, циркулирующего в промывочной системе бурового инструмента с торцевой промывкой, способствует прежде всего сглаживание углов и участков стыковки каналов различных размеров, а также создание условий сохранения неизменного гидравлического давления на протяжении всего пути течения струи.

Основываясь на полученных результатах, авторы предлагают конструкцию промывочной системы коронки с торцевой промывкой (рис. 4).

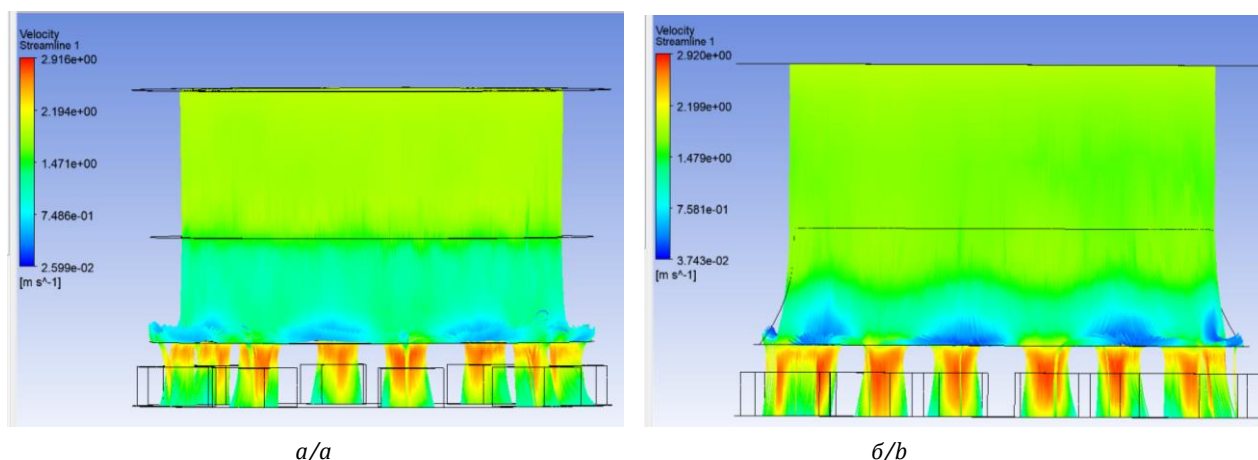


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования гидродинамических процессов в промывочной системе коронки с торцевой промывкой: а) *Epiroc*; б) с выпуклой наплавкой в канале

Fig. 3. Results of computer modeling of hydrodynamic processes in the flushing system of a crown with end flushing: а) *Epiroc*; б) with a convex surfacing in the channel

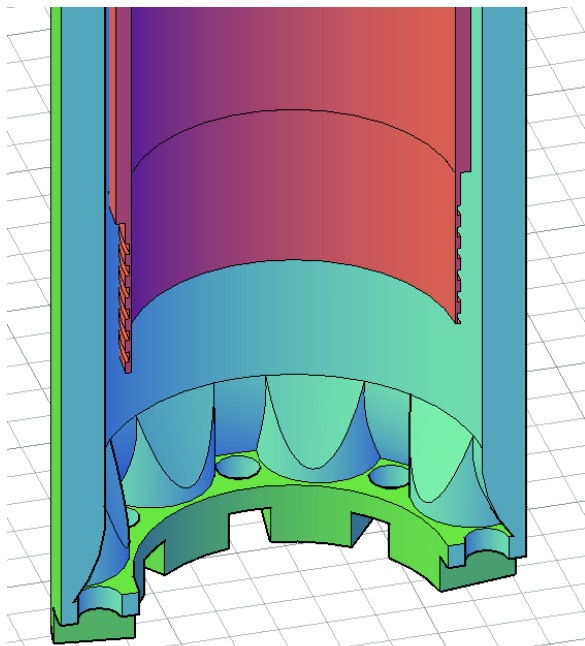


Рис. 4. Усовершенствованная конструкция промывочной системы коронки с торцевой промывкой
Fig. 4. Improved design of the flushing system of the crown with end flushing

Представленная на рис. 4 геометрия промывочной системы позволяет улучшить показатели циркуляции бурового раствора без изменения параметров рабочей поверхности буровой коронки. Разработанная конструкция промывочной системы коронки с торцевой промывкой служит для предотвращения возможных осложнений, возникающих при разрушении и отборе керна в рыхлых горных породах. Полуциркулярные наплавки, размещенные между отверстиями в торцевые каналы, снижают перепад давления, способствуют равномерности и ламинарности режима течения жидкости. За счет возможности плавного истечения бурового раствора происходит эффективная очистка как забоя, так и самих торцевых каналов коронки, а керн при этом остается защищен от размывания.

Полученные результаты работы доказывают важное влияние конструктивных особенностей промывочной системы бурового инструмента на показатели бурения.

Установлено, что применение принципа закругления при разработке конструкций бурового инструмента позволяет избегать потерь энергии струи очистного агента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – Vol. 30 (2). – P. 145–164.
- Борисов К.И. Динамика работы резцов в процессе разрушения горных пород инструментами режуще-скалывающего действия типа PDC // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 1. – С. 161–164.
- Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
- Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – Vol. 48 (3). – P. 434–442.
- Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – Vol. 96–97. – P. 109–119.
- A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – Vol. 121. – P. 344–354.
- Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – Vol. 45. – P. 147–152.
- 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.
- Третьяк А.Я., Борисов К.А. Классификация поломок пластин PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин // Результаты исследований-2020. Материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ). – Новочеркасск, 2020. – С. 252–254.
- Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
- Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 113. – P. 11–23.
- Drilling tools on frozen soils / I. Martyuchenko, M. Zenin, S. Ivanov, A. Kolesnikov // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2022. – № 10-1. – P. 59–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_59.
- Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – Vol. 190. – № 107120.
- Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L. Paez, U. Tran // Society of Petroleum Engineers / SPE Drilling Conference. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
- Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – Vol. 37 (13). – P. 1913–1929.

16. Пушмин П.С., Рожков А.А. Задачи оптимизации параметров промывочных систем породоразрушающего инструмента // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. науч. тр. – 2008. – Вып. 8. – С. 233–240.
17. Пушмин П.С. Факторы регулирования гидродинамических показателей для оптимизации процесса алмазного бурения // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. – 2010. – № 2 (37) – С. 167–172.
18. Жентичка М.В. Применение PDC долот Smith bits (Schlumberger) при бурении скважин на Ванкорском месторождении // Инженерная практика. – 2012. – № 10. – С. 54–58.
19. Газовая динамика / В.С. Бекнев, В.М. Елифанов, А.И. Леонтьев и др. // Механика жидкости и газа / под общей ред. А.И. Леонтьева. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 1997. – 671 с.
20. Djuraev R., Allanazarov B., Khatamova D. Enhancing technical solutions to reduce fuel energy consumption of drilling equipment during well drilling with air cleaning // IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2024). – Navoi, Uzbekistan, 03–05 April 2024. – Vol. 525. – P. 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/202452503001.
21. Третьяк А.Я. Технологии улучшения очистки ствола скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 7–13. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4716.
22. Гидравлика потока промывочной жидкости на торцевой поверхности долота с PDC-резами при различных схемах промывки / И.К. Бикбулатов, Э.С. Гинзбург, С.В. Касьянов, Г.И. Вышегородцева // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 2. – С. 52–55.
23. Блинов П.А., Никишин В.В., Козлов А.В. Гидроаэромеханика и теплообмен в бурении. – СПб: ООО «Издательство "ЛЕМА"», 2015. – 93 с.
24. Попова М.С. Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 159–171. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4320.
25. Сериков Д.Ю. Перспективная конструкция гидромониторной насадки шарошечного бурового инструмента // Сфера. Нефть и Газ. – 2022. – № 3 (86). – С. 72–78.
26. Алмазный инструмент для колонкового бурения. Каталог продукции ООО «Эпирок Рус». URL: https://forgeo.info/wp-content/uploads/2021/05/9866-0049-13-Exploration-core-drilling-diamond-tools-superior-products_LowRes.pdf (дата обращения 19.10.2024)

Информация об авторах

Марина Сергеевна Попова, кандидат технических наук, доцент высшей нефтяной школы Югорского государственного университета, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16. alleniram83@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-1462-8339>

Елизавета Вячеславовна Кускаева, студент кафедры технологии и техники разведки Сибирского федерального университета, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95. elizavetakuskaeva.1@gmail.com

Поступила в редакцию: 22.10.2024

Поступила после рецензирования: 29.10.2024

Принята к публикации: 30.06.2025

REFERENCES

1. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
2. Borisov K.I. Dynamics of work of cutters in the process of destruction of rocks by cutting-shearing tools of the PDC type. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no. 1, pp. 161–164. (In Russ.)
3. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.)
4. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
5. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
6. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.
7. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152.
8. 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.
9. Tretyak A.Ya., Borisov K.A. Classification of PDC plate fractures caused by downhole vibrations during well drilling. *Research results-2020. Materials of the V National Conference of the teaching staff and researchers of the YRSPU (NPI)*. Novocherkassk, 2020. pp. 252–254. (In Russ.)
10. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting-chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. (In Russ.)
11. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.

12. Martyuchenko I., Zenin M., Ivanov S., Kolesnikov A. Drilling tools on frozen soils. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2022, no. 10-1, pp. 59–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_59.
13. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
14. Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Fjaere A., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *Society of Petroleum Engineers / Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
15. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.
16. Pushmin P.S., Rozhkov A.A. Problems of optimizing the parameters of flushing systems of rock cutting tools. *Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research. Scientific papers*, 2008, vol. 8, pp. 233–240. (In Russ.)
17. Pushmin P.S. Factors regulating hydrodynamic parameters for optimizing the process of diamond drilling. *Proceedings of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2010, no. 2 (37), pp. 167–172. (In Russ.)
18. Zhentichka M.V. Use of Smith bits (Schlumberger) PDC bits in well drilling at the Vankor field. *Engineering practice*, 2012, no. 10, pp. 54–58. (In Russ.)
19. Beknev V.S., Epifanov V.M., Leontiev A.I. *Gas dynamics. Mechanics of liquid and gas*. Moscow, N.E. Bauman Moscow State Technical University Publ., 1997. 671 p. (In Russ.)
20. Djurayev R., Allanazarov B., Khatamova D. Enhancing technical solutions to reduce fuel energy consumption of drilling equipment during well drilling with air cleaning. *IV International Conference on Geotechnology, Mining and Rational Use of Natural Resources (GEOTECH-2024)*. Navoi, Uzbekistan, 03–05 April 2024. Vol. 525. pp. 03001. DOI: 10.1051/e3sconf/202452503001.
21. Tretyak A.Ya. Technologies for Improving Wellbore Cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 7–13. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4716.
22. Bikhulatov I.K., Ginzburg E.S., Kasyanov S.V., Vyshegorodtseva G.I. Hydraulics of the flushing fluid flow on the end surface of a bit with PDC cutters under different flushing schemes. *Quality management in the oil and gas complex*, 2013, no. 2, pp. 52–55. (In Russ.)
23. Blinov P.A., Nikishin V.V., Kozlov A.V. *Hydroaeromechanics and heat transfer in drilling*. St Petersburg, LEMA Publ., 2015. 93 p. (In Russ.)
24. Popova M.S. Hydrodynamic processes in designing diamond drilling tools. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 3357, no. 4, pp. 159–171. (In Russ.)
25. Serikov D.Yu. Promising design of a hydraulic monitor attachment for a roller-cone drilling tool. *Sphere. Oil and gas*, 2022, no. 3 (86), pp. 72–78. (In Russ.)
26. *Diamond tool for core drilling. Catalogue of products of Epiroc Rus LLC*. (In Russ.) Available at: https://forgeo.info/wp-content/uploads/2021/05/9866-0049-13-Exploration-core-drilling-diamond-tools-superior-products_LowRes.pdf (accessed 19 October 2024).

Information about the authors

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

Elizaveta V. Kuskaeva, Student, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarskiy rabochiy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russian Federation. elizavetakuskaeva.1@gmail.com

Received: 22.10.2024

Revised: 29.10.2024

Accepted: 30.06.2025