

УДК 622.24.051
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762
Шифр специальности ВАК: 2.8.1
Научная статья

Влияние конструкции коронок, армированных резцами PDC, на отбор керн в мерзлых породах

М.С. Попова^{1✉}, Б.В. Григорьев²

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

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, г. Якутск

✉ alleniram83@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Инженерно-геологические изыскания – неотъемлемая часть горных работ различного назначения. Важное влияние на результаты инженерно-геологических изысканий оказывает качество отбора керновой пробы грунта. При этом получение керн мерзлых пород осложняется повышением температуры призабойной зоны, возникающим вследствие реализации процесса бурения. При повышении температуры изменяются физико-механические свойства мерзлых грунтов, что приводит к трансформации механизма их разрушения и повышению вероятности возникновения аварийных ситуаций бурения. Полученный в условиях повышения температуры керн не позволяет достоверно оценить свойства и строение грунтов в естественных условиях их залегания. Поэтому возникает необходимость разработки технологических и технических средств, способствующих сохранению температурного режима массива горных пород при механическом воздействии на него. Проведенный анализ условий колонкового бурения в мерзлых породах показал, что наряду с технологическими причинами на повышение температуры забоя оказывает влияние конструкция породоразрушающего инструмента. В статье раскрыта зависимость изменения температуры на забое скважины в процессе бурения от конструктивных особенностей колонкового породоразрушающего инструмента. **Целью** работы является исследование влияния конструктивных особенностей бурового колонкового инструмента на характер разрушения мерзлых грунтов, представленных рыхлыми осадочными горными породами, как наиболее подверженных изменению физико-механических свойств при повышении температуры. За основу исследования выбраны мерзлые грунты, слагающие разрез Якутии – крупного промышленного района, требующего для своего развития частого проведения инженерно-геологических изысканий. **Объекты:** конструкция колонкового бурового инструмента, механизм разрушения мерзлых горных пород, условия отбора керн в мерзлых грунтах. **Методы:** аналитический метод, экспериментальный метод, метод производственного испытания. **Результаты.** Определены основные направления разработки колонкового инструмента для качественного отбора проб керн в мерзлых грунтах. Выведена зависимость величины температурного прироста на забое скважины от ориентации и размеров резцов, армирующих породоразрушающий инструмент.

Ключевые слова: колонковый инструмент, коронка, бурение, мерзлые грунты, повышение эффективности бурения, отбор проб, керн, инженерно-геологические изыскания

Для цитирования: Попова М.С., Григорьев Б.В. Влияние конструкции коронок, армированных резцами PDC, на отбор керн в мерзлых породах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762

UDC 622.24.051
DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762
Scientific paper

Impact of the design of crowns reinforced with PDC cutters on core sampling in frozen rocks

M.S. Popova^{1✉}, B.V. Grigoriev²

¹ Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉ alleniram83@mail.ru

Abstract. Relevance. Engineering-geological surveys are an integral part of mining operations for various purposes. The quality of soil core sampling has an important impact on the results of engineering geological surveys. At the same time, obtaining a frozen rock core is complicated by an increase in the bottomhole zone temperature, which arises as a result of drilling. As the temperature rises, the physical and mechanical properties of frozen soils change, which leads to a transformation of the mechanism of their destruction and an increase in the likelihood of drilling emergencies. A core obtained under conditions of rising temperature does not allow for a reliably accurate assessment of the properties and structure of soils in their natural conditions. Therefore, there is a need to develop technological and technical means that help maintain the temperature regime of a rock mass under mechanical effect on it. The analysis of the conditions of core drilling in frozen rocks showed that, along with technological reasons, the design of the rock-cutting tool affects the increase in bottom-hole temperature. The article reveals the dependence of the temperature change at well bottom when drilling on the design features of the core rock-cutting tool. **Aim.** To study the impact of the design features of a drilling core tool on the nature of destruction of frozen soils, represented by loose sedimentary rocks as the most susceptible to changes in physical and mechanical properties with increasing temperature. The study was based on frozen soils that make up the section of Yakutia, a large industrial region that requires frequent geotechnical surveys for its development. **Objects.** Core drilling tool design, mechanism of frozen rocks destruction, conditions for core sampling in frozen soils. **Methods.** Analytical method, experimental method, production test method. **Results.** The authors have determined the main directions for the development of core tools for high-quality core sampling in frozen soils. They derived the dependence of the magnitude of the temperature increase at well bottom on the orientation and size of the cutters reinforcing the rock-cutting tool.

Keywords: core tool, crown, drilling, frozen soils, increasing drilling efficiency, sampling, core, engineering and geological surveys

For citation: Popova M.S., Grigoriev B.V. Impact of the design of crowns reinforced with PDC cutters on core sampling in frozen rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4762

Введение

Проведение инженерно-геологических изысканий в северо-восточной части Сибири является неотъемлемым, необходимым и постоянным этапом промышленных работ различного назначения в регионе. Это связано с особенностью строения верхней части земной коры и климатом данной территории. Геологический разрез северо-восточной Сибири характеризуется сплошным распространением мерзлых грунтов, при этом в некоторых участках мощность мерзлой толщи может достигать 200 м. Мерзлый грунт – это, как правило, дисперсная, неоднородная горная порода, свойства которой определяются ее составом и могут изменяться в зависимости от состояния окружающей среды. Основной проблемой при любом механическом воздействии на мерзлые грунты является изменение их физико-механических свойств, вызванное повышением или понижением температуры. Тщательное изучение мерзлых грунтов позволяет избегать трудностей, возникающих при строительстве и в процессе ведения горно-геологических работ, составлять прогнозы эксплуатации промышленных объектов и возможных изменений природных условий, достигая необходимого эффекта при реализации производственных процессов, предвидеть и решать многие другие важные задачи, осваивать новые территории Сибири и т. д. [1–25].

Одним из важных этапов инженерно-геологических изысканий является отбор проб керна. Причем надежность и уровень сложности проведения последующих этапов инженерно-геологических

изысканий во многом зависит от качества и фактического выхода отобранной в процессе бурения пробы. Однако при бурении скважин в мерзлых породах возникает большое количество осложнений [20–25], которые зачастую перерастают в аварийные ситуации, а отбор керновой пробы в таких условиях дополнительно затрудняет обеспечение эффективной скорости проходки скважин.

Способность мерзлого грунта проявлять разные физико-механические свойства вследствие изменения температуры усложняет процесс бурения и отбор керна, в результате чего параметры полученной пробы могут быть искажены или не отвечать действительности.

На сегодняшний день существует много способов повышения продуктивности бурения в мерзлых горных породах. При этом проблема «растепления» мерзлых грунтов и возникновение осложнений, связанных с этим явлением, считается актуальной. Бурение скважин в мерзлых грунтах сопровождается образованием сальников, обрушением стенок скважины, нарушением направления траектории, а самое главное, что, безусловно, важно для результатов инженерно-геологических изысканий, потерей и нарушением керна.

Текущее состояние забоя в процессе бурения формируется из совокупности факторов, одним из которых является соответствие конструкции породоразрушающего инструмента горно-геологическим условиям. Данной теме посвящены известные научные труды [1, 10, 26, 27]. Наиболее простым, но действенным способом изменения геометрии

породоразрушающего инструмента является смена типа резцов и регулирование их ориентации [1, 10, 26, 27]. Целью работы является определение влияния конструктивных параметров коронок на условия бурения и отбора керн в мерзлых грунтах, а именно возможности воздействия на температурный режим путем изменения конструкции режущей части коронок. В качестве задачи выбрана необходимость решения производственных проблем, возникающих при бурении ООО «МИП «Арктик-Бур», «Арктик Проект», «Алмазы Анабара» в мерзлых грунтах Якутии и связанных с таянием пород при их разрушении, за основу приняты результаты производственного бурения данных организаций.

Анализ производственных условий бурения в мерзлых грунтах

Состав и строение мерзлых горных пород весьма неоднороден и зачастую различен на разных участках территории Сибири. Согласно результатам геологических исследований, проведенных ООО «МИП «Арктик-Бур» и проектно-изыскательской компанией «Арктик Проект», разрез территории Якутии до 12 м состоит из четвертичных отложений, представленных такими породами, как супеси, суглинки и пески, гравийно-галечниковыми грунтами с песчаным заполнителем, в основном рыхлыми молодыми континентальными отложениями, находящимися в мерзлом состоянии. Температура начала замерзания данных грунтов находится в пределах от минус 0,2 до минус 0,15 °С. В мерзлом состоянии такие грунты ведут себя как устойчивые, прочные породы средней твердости. Так, согласно классификации категории пород по буримости мерзлые пески и глины относятся к IV–V категории. Криогенная текстура грунтов изученной территории массивная, тонкослоистая. Лед в глинистых грунтах присутствует в виде тонких (от 1–2 мм) горизонтальных прослойков.

При этом отмечается возможность залегания грунтов различной степени льдистости, что указывает на частое изменение физико-механических свойств исследуемого разреза.

Чем более дисперсным является мерзлый грунт, тем дольше время замерзания содержащейся в нем воды. При этом лед выступает прочной связью скелета мерзлых грунтов. В случае «растепления» грунты активно проявляют свойства пластичности, вязкости. Таким образом, поддержание отрицательных температур способствует повышению прочности, снижению пластичности мерзлого грунта и облегчает процесс бурения с отбором керн.

Анализ имеющихся геологических данных указывает на то, что исследование процесса разруше-

ния мерзлых горных пород при бурении скважин должно учитывать особенности разреза, который может характеризоваться перемежаемостью слоев, частым изменением свойств горных пород, обводненностью, наличием льда и дисперсностью грунтов.

Известный опыт бурения [22, 25] показал, что преимущественно эффективным методом очистки скважин при бурении в мерзлых породах является применение в качестве очистного агента сжатого, сухого, охлажденного воздуха. В то же время даже в случае полного соблюдения условий бурения, при которых воздух попадает на забой необходимой температуры и влажности, «растепления» горной породы на забое избежать не удастся. Источником повышения температуры выступает механическая работа породоразрушающего инструмента. Как известно, практически вся механическая энергия рассеивается в виде тепла. Таким образом, тепловой эффект является неизбежным фактором разрушения горных пород при бурении скважин.

Аналитическое исследование

Согласно исследованиям Б.Б. Кудряшова и А.М. Яковлева [28], приrost температуры на забое скважины (Δt_3) зависит от величины забойной мощности и расхода воздуха, что аналитически можно представить в виде формулы (1):

$$\Delta t_3 = \frac{0,52N}{G}, \quad (1)$$

где N – забойная мощность; G – расход воздуха.

Забойная мощность – мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы с целью углубления скважины. Справедливо утверждать, что величина данного показателя во многом определяется параметрами состояния системы взаимодействия «породоразрушающий инструмент – горная порода».

Учитывая, что при инженерно-геологических изысканиях применяется преимущественно вращательный способ бурения скважин с отбором керн, забойную мощность можно представить в виде выражения (2):

$$N = M \cdot \omega = \frac{2\pi Mn}{60}, \quad (2)$$

где ω – окружная скорость; M – крутящий момент инструмента.

При этом окружная скорость находится согласно выражению (3):

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (3)$$

где n – частота вращения бурового инструмента.

Величина крутящего момента зависит от силы, которую оказывает буровой инструмент на забой, и плеча, на котором эта сила действует, что описывается формулой (4):

$$M = F \cdot r, \quad (4)$$

где F – сила действия инструмента на забой; r – средний радиус буровой коронки.

Согласно анализу механизма разрушения горной породы буровым инструментом режущего типа, обладающим крупным резцом, сила F , определяющая величину крутящего момента, представляет собой не что иное, как тангенциальное усилие разрушения горной породы, приложенное к резцам инструмента, $-F_{\text{т}}$. Для эффективного бурения сила F , приложенная к каждому резцу бурового инструмента, должна быть достаточной для разрушения горной породы ($F_{\text{р}}$) и преодоления сил трения резца о забой ($F_{\text{тр}}$). Тогда силу F можно определить из выражения (5) [1]:

$$F = F_{\text{р}} + F_{\text{тр}}. \quad (5)$$

При этом силу, необходимую для преодоления трения бурового инструмента о горную породу, можно найти как произведение осевой нагрузки ($P_{\text{ос}}$) на коэффициент трения (f), согласно формуле (6):

$$F_{\text{тр}} = P_{\text{ос}} \cdot f. \quad (6)$$

Как правило, для отбора проб керна при инженерно-геологических изысканиях используются твердосплавные коронки. В таком случае сила, необходимая для разрушения горной породы резцом, определяется по известной формуле (7) [1]:

$$F_{\text{р}} = \frac{\sigma_{\text{ск}} h l (1 + \text{tg} \varphi)}{\sin \gamma_{\text{ск}}}, \quad (7)$$

где $\text{tg} \varphi$ – коэффициент внутреннего трения; h – глубина внедрения резца в горную породу; l – ширина резца; $\gamma_{\text{ск}}$ – угол скалывания горной породы.

Отсюда следует, что забойную мощность можно представить в виде выражения (8):

$$N = \omega r N_{\text{р}} \left(\frac{\sigma_{\text{ск}} h l (1 + \text{tg} \varphi)}{\sin \gamma_{\text{ск}}} + P f \right), \quad (8)$$

где $N_{\text{р}}$ – количество резцов коронки.

Тогда, подставив (8) в формулу (1), получим выражение, определяющее зависимость прироста температуры на забое от параметров механизма разрушения горной породы твердосплавным буровым инструментом (9):

$$\Delta t_{\text{з}} = \frac{0,52 \omega r N_{\text{р}} \left(\frac{\sigma_{\text{ск}} h l (1 + \text{tg} \varphi)}{\sin \gamma_{\text{ск}}} + P f \right)}{G}. \quad (9)$$

Из выражения (9) видно, что помимо физико-механических свойств горной породы ($\sigma_{\text{ск}}$, $\text{tg} \varphi$, $\gamma_{\text{ск}}$, f) и режимов бурения (P , ω , G) на повышение температуры нагрева оказывают влияние глубина его заглупления (h) и конструктивные параметры бурового инструмента (r , l , $N_{\text{р}}$). Из чего следует, что в изучаемой системе взаимодействия «породоразрушающий инструмент – горная порода» есть не-

управляемые, управляемые и частично управляемые параметры, влияющие на тепловой режим работы бурового инструмента. Неуправляемыми являются свойства и характер залегания пород, горные условия бурения. К управляемым относятся режимы бурения, которые можно регулировать в процессе бурения. Геометрические параметры коронки могут быть заранее выбраны исходя из области применения инструмента. При этом возможный износ режущей части инструмента сложно достоверно и точно предсказать, поэтому данную группу параметров следует отнести к частично управляемым.

Учитывая основную роль трения в повышении температуры на забое, отдельное внимание следует уделять размеру площадки смятия горной породы, где, согласно ранее проведенным исследованиям [1, 27], возникают основные силы трения. Основываясь на анализе механизма разрушения горной породы твердосплавным резцом, помимо изменения ориентации, уменьшение ширины резца (l) позволяет снижать площадь смятия горной породы. Однако уменьшение ширины резца приводит к снижению прочностных показателей инструмента и его производительности. В любом случае преднамеренное применение инструмента с вооружением, снижающим размер площадки смятия горной породы режущей гранью, способствует снижению теплового прироста на забое в процессе бурения.

Анализ результатов производственного бурения

Согласно результатам производственного бурения Мирнинской ГРЭ, а также АО «Алмазы Анабара», твердосплавные коронки, такие, например, как СМ-5, ТК-10 и КТУ-2, при встрече с мерзлыми горными породами подвержены критическому износу (рис. 1, а), а коронки ТК-10 осуществляют разрушение породы с образованием крупных частиц шлама, что приводит к нарушению целостности керна.



Рис. 1. Износ коронок (а) СМ-5, (б) PDC в результате производственного бурения

Fig. 1. Bit (a) CM-5, (b) PDC wear as a result of production drilling

При этом применение в тех же условиях коронок, армированных резцами типа PDC, позволяет увеличить ресурс инструмента более чем в 3 раза (рис. 1). Однако, учитывая форму и размеры серийно-выпускаемых резцов PDC, для снижения теплового воздействия на мерзлые породы таких коронок необходимо проведение дополнительного исследования влияния их конструктивных особенностей на приrost температуры на забое при разрушении горной породы.

Помимо прочностных, конструктивных возможностей PDC, преимуществом таких резцов выступает возможность изменения ориентации их режущей грани в вертикальной плоскости (путем изменения переднего и заднего углов установки), а также и относительно радиуса коронки (путем изменения фронтального угла установки [1, 10, 26]). Фронтальный угол (φ_p) [1] (угол поворота резца [10]; боковой угол [26]) установки PDC – угол между плоскостью режущей грани PDC и радиусом коронки (рис. 2).

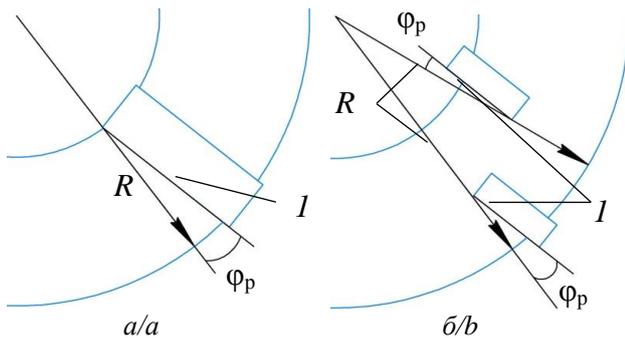


Рис. 2. Схема изменения фронтального угла резца PDC (вид с торца коронки): а) один резец; б) несколько резцов в матрице; 1 – режущая грань PDC; φ_p – фронтальный угол установки резца; R – наружный радиус буровой коронки
Fig. 2. Scheme of changing the frontal angle of a PDC incisor (view from the end of the crown): a) one incisor; b) several incisors in the matrix; 1 – PDC cutting edge; φ_p – front angle of cutter installation; R – outer radius of the drill bit

Воспользовавшись вышеописанным способом аналитического исследования, получим математическую модель (10), показывающую зависимость прироста температуры от параметров механизма разрушения горной породы буровым инструментом типа PDC:

$$\Delta t_3 = \frac{0,52\omega r N_p \left(\frac{\pi \sigma_{ск} h \sqrt{d} \cos \varphi_p (1 + tg \varphi)}{\sin \gamma_{ск}} + Pf \right)}{G}, \quad (10)$$

где φ_p – фронтальный угол установки резца.

Анализ полученной математической модели показывает, что ориентация резца типа PDC, а имен-

но фронтальный угол установки резца, при прочих равных условиях (режимах бурения и параметров очистного агента – воздуха) оказывает влияние на температурный режим работы инструмента и, как следствие, на возможную величину роста температуры забоя. При этом, как известно, повышение величины фронтального угла приводит к повышению глубины разрушения горной породы.

Для детального исследования влияния ориентации резца на температурный режим работы инструмента при отборе проб керна в мерзлых грунтах за основу принята конструкция коронки PDC (рис. 1, б), хорошо зарекомендовавшей себя при производственном бурении как инструмент с высокими показателями износостойкости. Для дальнейших расчетов величина фронтального угла принималась в пределах от 0 до 15°, прочность пород принималась согласно рекомендациям [29] (на рис. 3 представлены некоторые из полученных результатов). Согласно результатам аналитических расчетов, увеличение значения фронтального угла установки резца PDC на 1 градус при неизменных режимах бурения (значения P, G, ω оставались постоянными) приводит к снижению температуры забоя на 2–5 % (в зависимости от свойств горной породы и влажности среды), причем чем больше величина фронтального угла установки резца, тем больше степень влияния данного параметра на величину снижения температуры (рис. 3).

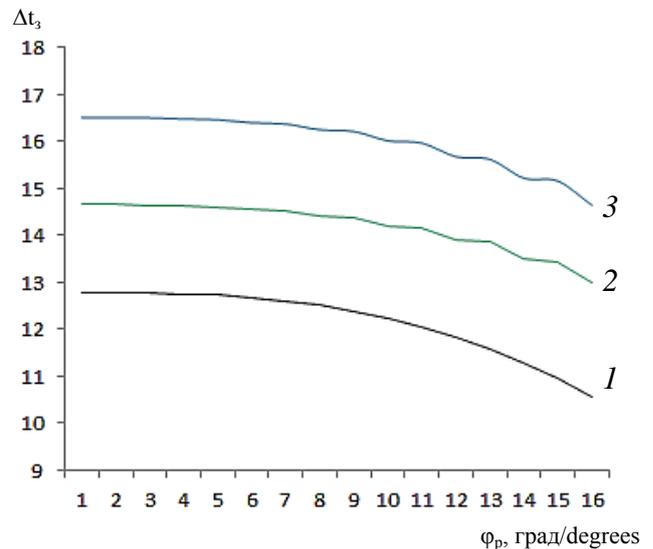


Рис. 3. График зависимости прироста температуры забоя (Δt_3) от величины фронтального угла установки PDC (φ_p) при бурении коронкой диаметром 112 мм с 8 резцами: 1 – мерзлый суглинок; 2 – песчаник; 3 – доломит
Fig. 3. Graph of the dependence of the increase in bottom-hole temperature (Δt_3) on the value of the front angle of the PDC installation when drilling with a bit with a diameter of 112 mm with 8 cutters: 1 – frozen loam; 2 – sandstone; 3 – dolomite

Полученный результат объясняется тем, что при увеличении фронтального угла снижается сопротивление со стороны забоя за счет лучшей очистки режущей грани от шлама (шлам не скапливается перед резцом) и снижения лобового сопротивления перемещению резца в горной породе, что, как следствие, приводит к снижению забойной мощности.

Заключение

Представленный подход позволяет оценивать влияние ориентации, типа и геометрии резцов, армирующих коронку, на возможность изменения прироста температуры на забое. Исходя из итогов проведенного исследования и производственного бурения в мерзлых грунтах, а также основываясь на известных данных и научных выводах, можно заключить, что выбор оптимальной геометрии режущей части бурового инструмента способствует повышению эффективности отбора керна при проведении инженерно-геологических изысканий в условиях отрицательных температур.

Для получения достоверной геологической информации о мерзлых грунтах отбор керна должен осуществляться в условиях сохранения температурного режима призабойной зоны, близкого к естественным условиям его залегания. Конструкция породоразрушающего инструмента, предназначенного для отбора проб мерзлых грунтов, должна способствовать снижению затрат мощности на разрушение горной породы, что позволит снизить приrost температуры забоя, возникающий от реализации механической работы инструмента. Снижение затрат мощности на разрушение горных

пород возможно, например, путем уменьшения сопротивления перемещению резцов, возникающего со стороны забоя. При этом проектирование режущей части коронки должно основываться на механизме разрушения горных пород с учетом возможной области применения инструмента и условий его эксплуатации.

Исходя из того, что для бурения в мерзлых породах породоразрушающий инструмент должен обладать высокой степенью износостойкости и при этом иметь вооружение, способствующее снижению сопротивления, возникающего со стороны забоя в процессе бурения, перспективным при разработке конструкций бурового инструмента для отбора проб мерзлых грунтов выступает инструмент, армированный резцами типа *PDC*. Резец *PDC* отличается своими прочностными показателями. Размеры, форма и возможность ориентации резцов *PDC* позволяют достигать достаточно высоких скоростей бурения при оптимальных показателях затрат мощности на разрушение горных пород и высоком ресурсе. Увеличение величины фронтального угла установки *PDC* способствует снижению сопротивления, возникающего со стороны забоя, и тем самым снижению затрат мощности, что, в свою очередь, отражается на температурном режиме работы инструмента. К тому же такой резец давно зарекомендовал себя как способный эффективно работать как при пластическом резании, так и при хрупком скалывании, что актуально, учитывая механизм разрушения мерзлых пород, легко изменяющих свои свойства в условиях перепада температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
2. Increasing annual and extreme precipitation in permafrost-dominated Siberia during 1959–2018 / P. Wang, Q. Huang, Q. Tang et al. // *Journal of Hydrology*. – 2021. – Vol. 603. – P. 126865. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126865.
3. New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere / Y. Ran, G. Cheng, H. Jin et al. // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14. – № 2. – P. 865–884. DOI: 10.5194/essd-14-865-2022.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2002. – Vol. 39 (1). – P. 41–58.
5. Control of the interactions between stream and groundwater by permafrost and seasonal frost in an Alpine Catchment, Northeastern Tibet Plateau, China / R. Ma, Z. Sun, Q. Chang et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2021. – Vol. 126. – № 5. – P. e2020JD033689. DOI: 10.1029/2020JD033689.
6. Попова М.С. Гидродинамические процессы при разработке конструкций алмазного бурового инструмента // *Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 159–171.
7. Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting. – San Francisco: ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. – Vol. 4. – 137 p.
8. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2008. – Vol. 45 (8). – P. 1347–1360.
9. 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.
10. Борисов К.И. Современные способы оценки эффективности разрушения горных пород резанием-скалыванием долотами типа *PDC* // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 103–121. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3756.
11. 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.

12. Su O., Akcin A. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Influence of freezing-thawing on shear strength of frozen soil in Northeast China / R. Chen, D.Z. Li, D.X. Hao, K.L. Wei // *Applied Mechanics and Materials*. – 2016. – Vol. 835. – P. 525–530.
18. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 10 (6). – P. 476–479.
19. 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.
20. Integrated hydrogeological and hydrogeochemical dataset of an alpine catchment in the northern Qinghai-Tibet Plateau / Z. Pan, R. Ma, Z. Sun et al. // *Earth System Science Data*. – 2022. – Vol. 14. – № 5. – P. 2147–2165. DOI: 10.5194/essd-14-2147-2022.
21. 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.
22. Зезюлин В.А., Линьков С.А. О физико-механических характеристиках разрушения мерзлых грунтов // *Омский научный вестник*. – 2006. – № 8 (44). – С. 75–77.
23. Литенко П.А., Маслов Н.А. Сравнительный анализ способов разработки горных пород и мерзлых грунтов // *Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы международной научно-практической конференции*. – Белгород, 22–25 сентября 2022. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 103–109.
24. Максимова М.А. Специфика подготовки многолетнемерзлых горных пород // *Инновации. Наука. Образование*. – 2022. – № 50. – С. 1889–1900.
25. Рочев В.Ф., Мельников А.Е. Исследование механизма разрушения мерзлых глинистых пород в водной среде // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 12-2. – С. 380–384.
26. Сверхтвердые материалы в геологоразведочном бурении: монография / П.В. Зыбинский, Р.К. Богданов, А.П. Загора, А.М. Исонкин. – Донецк: Норд-Пресс, 2007. – 244 с.
27. Нескоромных В.В. Анализ процесса разрушения анизотропной горной породы шарошечными долотами // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 80–89.
28. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах. – М.: Недра, 1983. – 286 с.
29. Нерадовский Л.Г. Сравнительный анализ прочности осадочных пород в криолитозоне Южной Якутии и на территории г. Нерюнгри // *Недропользование XXI век*. – 2022. – № 6 (98). – С. 49–57.

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>

Борис Васильевич Григорьев, старший преподаватель кафедры недропользования, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58; titrykt@gmail.com

Поступила в редакцию: 02.07.2024

Поступила после рецензирования: 24.07.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

REFERENCES

1. Neskromnih V.V., Popova M.S., Liu Baochang. *Destruction of rocks when drilling wells with diamond drilling tools: monograph*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p. (In Russ.)
2. Wang P., Huang Q., Tang Q. Increasing annual and extreme precipitation in permafrost-dominated Siberia during 1959–2018. *Journal of Hydrology*, 2021, vol. 603, pp. 126–865.
3. Ran Y., Cheng G., Jin H. New high-resolution estimates of the permafrost thermal state and hydrothermal conditions over the Northern Hemisphere. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 865–884.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
5. Ma R., Sun Z., Chang Q. Control of the interactions between stream and groundwater by permafrost and seasonal frost in an Alpine Catchment, Northeastern Tibet Plateau, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, no. 5, pp. e2020JD033689. DOI: 10.1029/2020JD033689.

6. Popova M.S. Hydrodynamic processes in designing diamond drilling tools. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 159–171. (In Russ.)
7. Vtorushin E.V., Dorovsky V.N. *Cutting forces estimation with non-Euclidean model of inelastic deformations applied to rock cutting*. San Francisco, ARMA, American Rock Mechanics Association, 2017. Vol. 4, 137 p.
8. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
9. 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.
10. Borisov K.I. Modern methods of evaluating the effectiveness of rock destruction by cutting with PDC bits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 103–121. (In Russ.)
11. 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.)
12. Su O., Akcin A. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.)
17. Chen R., Li D.Z., Hao D.X., Wei K.L. Influence of freezing-thawing on shear strength of frozen soil in Northeast China. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 835, pp. 525–530.
18. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
19. 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*, 2020, vol. 190, no. 107120.
20. Pan Z., Ma R., Sun Z. Integrated hydrogeological and hydrogeochemical dataset of an alpine catchment in the northern Qinghai-Tibet Plateau. *Earth System Science Data*, 2022, vol. 14, no. 5, pp. 2147–2165. DOI: 10.5194/essd-14-2147-2022.
21. 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.
22. Zezyulin V.A., Linkov S.A. On the physical and mechanical characteristics of the destruction of frozen soils. *Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 8 (44), pp. 75–77. (In Russ.)
23. Litenko P.A., Maslov N.A. Comparative analysis of methods for developing rocks and frozen soils. *Energy-resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries. Proc. of the international scientific and practical conference*. Belgorod, September 22–25, 2022. Belgorod, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University Publ., 2022. pp. 103–109. (In Russ.)
24. Maksimova M.A. Specifics of preparing permafrost rocks. *Innovation. Science. Education*, 2022, no. 50, pp. 1889–1900. (In Russ.)
25. Rochev V.F., Melnikov A. E. Study of the mechanism of destruction of frozen clay rocks in the aquatic environment. *Advances of modern natural science*, 2018, no. 12-2, pp. 380–384. (In Russ.)
26. Zybinsky P.V., Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. *Superhard materials in geological exploration drilling: monograph*. Donetsk, Nord-Press, 2007. 244 p. (In Russ.)
27. Neskromnih V.V. Analysis of the process of destruction of anisotropic rock with roller bits. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 80–89. (In Russ.)
28. Kudryashov B.B., Yakovlev A.M. *Drilling wells in frozen rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1983. 286 p. (In Russ.)
29. Neradovskii L.G. Comparative analysis of the strength of sedimentary rocks in the permafrost zone of south Yakutia and in the territory of the city of Neryungri. *Subsoil use XXI century*, 2022, no. 6 (98), pp. 49–57. (In Russ.)

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>

Boris V. Grigoriev, Senior Lecturer, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky street, Yakutsk, 677000, Russian Federation; titrykt@gmail.com

Received: 02.07.2024

Revised: 24.07.2024

Accepted: 02.04.2025