

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-78-85>

Результаты исследования деформационных процессов при бурении изотропных горных пород алмазным буровым инструментом

© П.С. Пушмин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данной статьи – анализ результатов проведенных аналитических и экспериментальных исследований процесса бурения изотропной горной породы алмазным породоразрушающим инструментом для представления в виде графических зависимостей взаимосвязи между основными параметрами процесса алмазного бурения и прочностными характеристиками твердых горных пород. В качестве исходного материала для работы приняты во внимание гипотезы, подкрепленные аналитическими расчетами и многочисленными экспериментальными исследованиями по разбурированию в стендовых условиях кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета блоков горных пород различной твердости алмазным породоразрушающим инструментом. Результаты исследований обработаны при помощи пакета MS Office Excel и представлены в виде графических зависимостей. В результате построены и проанализированы графические зависимости, позволяющие наглядно оценить взаимосвязи между основными техническими (диаметр породоразрушающего инструмента, число одновременно работающих резцов), технологическими (усилие резания-скалывания, осевая нагрузка, механическая скорость бурения, тип очистного агента и др.) параметрами процесса бурения и основными прочностными характеристиками (разрушающее напряжение, общий коэффициент сопротивления) твердых изотропных горных пород. Экспериментально доказана эффективность применения очистного агента, содержащего поверхностно-активные вещества, при бурении твердых горных пород алмазным инструментом. Проведенный анализ позволяет расширить имеющиеся представления о деформационных процессах, происходящих при бурении изотропных горных пород алмазным породоразрушающим инструментом. На основании представленных результатов могут быть составлены рекомендации по повышению эффективности алмазного бурения твердых пород. Результаты работы могут быть полезны для производственных геологоразведочных организаций, а также применены в учебном процессе.

Ключевые слова: горная порода, процесс разрушения, алмазный инструмент, механическая скорость бурения

Информация о статье: Дата поступления 13 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Пушмин П.С. Результаты исследования деформационных процессов при бурении изотропных горных пород алмазным буровым инструментом. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 78–85. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-78-85.

Research results of deformation processes when drilling isotropic rocks by diamond drilling tools

© Pavel S. Pushmin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this article is to analyze the results of the conducted analytical and experimental studies of the drilling process of isotropic rock with diamond rock cutting tools and present the relationships between the main parameters of diamond drilling and strength characteristics of solid rocks in the form of curves. The input material for the research is hypotheses supported by analytical calculations and numerous experimental studies on drilling-out the blocks of rocks of different hardness by the diamond rock cutting tool in the test conditions of the Department of Oil and Gas Business of the Irkutsk National Research Technical University. The research results

have been processed using the MS Office Excel package and presented in the form of graphical dependencies. The constructed and analyzed curves allow visual estimation of the relationship between the main technical (diameter of the rock-cutting tool, number of simultaneously working cutters), technological (cutting-shearing force, axial load, mechanical drilling speed, type of a cleaning agent, etc.) drilling parameters and the main strength characteristics (breaking stress, total resistance coefficient) of solid isotropic rocks. The effectiveness of the cleaning agent containing surfactants in the drilling of solid rocks with diamond tools has been experimentally proved. The performed analysis allows to widen the existing understanding of the deformation processes occurring when drilling isotropic rocks with diamond rock-cutting tools. On the basis of the presented results recommendations can be made to improve the efficiency of diamond drilling of solid materials. The obtained results can be useful for industrial exploration organizations, as well as applied in the educational process.

Keywords: rock, destruction process, diamond tools, mechanical drilling speed

Information about the article: Received February 13, 2019; accepted for publication March 12, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Pushmin P.S. Research results of deformation processes when drilling isotropic rocks by diamond drilling tools. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 78–85. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-78-85.

Введение

Настоящее исследование базируется на опубликованной ранее схеме деформации твердой горной породы алмазным резцом породоразрушающего инструмента [1]. Аналитические зависимости, основанные на анализе механики деформирования горной породы, а также некоторые результаты экспериментальных исследований, полученные при разбурировании блоков горных пород алмазным инструментом, представлены в работе [2].

Методы исследования

Результаты многочисленных экспериментальных работ по разбурированию в стендовых условиях блоков горных пород различной твердости алмазным породоразрушающим инструментом, подкрепленные аналитическим исследованием механики деформирования твердых изотропных пород, обработаны при помощи пакета MS Office Excel и представлены в данной работе в виде графических зависимостей.

Результаты

Как известно, механическая скорость углубки породоразрушающего

инструмента является одним из основных показателей эффективности процесса разрушения горной породы в процессе бурения. В свою очередь, разрушение породы – не что иное как последовательная совокупность деформационных процессов, происходящих в твердом теле (горной породе) в результате внешних силовых воздействий и, соответственно, возникновения и роста в теле разрушающих напряжений¹.

Взаимосвязь между скоростью протекания деформационных процессов, происходящих в изотропной горной породе, и механической скоростью бурения представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, рост интенсивности деформационных процессов (скорости деформации) в твердой горной породе приводит к повышению механической скорости бурения. При этом интенсивность развития деформационных процессов в породе в процессе бурения напрямую связана с типом применяемого очистного агента [3, 4]. В частности, использование в качестве очистного агента жидкости с добавлением поверхностно-активных веществ приводит к повышению

¹Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 297 с. /

Neskoromnykh V.V. Rock destruction at exploration works. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ., 2012. 297 p.



Рис. 1. Зависимости между механической скоростью бурения, усилием резания-скалывания и скоростью деформации твердой горной породы
Fig. 1. Relationship between the mechanical speed of drilling, cutting-shearing force and the strain rate of the solid rock

интенсивности развития деформаций в породе. В условиях роста разрушающего усилия (усилия резания-скалывания) со стороны резцов породоразрушающего инструмента и соответствующего повышения интенсивности деформационных процессов наблюдаются максимальные (в пределах исследования) значения механической скорости бурения вследствие снижения прочностных характеристик горной породы.

Согласно известной схеме деформирования твердой горной породы алмазным резцом, суммарное воздействие на резец осевого и тангенциального усилий приводит к образованию результирующей нагрузки, направление вектора которой определяется геометрическим сложением двух векторов названных сил. В связи с этим алмазный резец начинает контактировать с горной породой своей передней гранью. Данное обстоятельство вызывает смещение области максимальных касательных напряжений на переднюю грань алмазного резца на некоторый угол, определенный вектором результирующего усилия [5].

Повышение осевого усилия на алмазный резец при определенном значении тангенциального усилия приводит к увеличению глубины его внедрения в породу, а соответственно, и глубины борозды разрушения, что сопровождается повышением усилия сопротивления породы разрушению со стороны передней грани резца и приводит к увеличению усилия резания-скалывания горной породы. При этом повышению усилия резания-скалывания и уменьшению линейной скорости перемещения резца способствует увеличение общего коэффициента сопротивления горной породы. Данные зависимости приведены на рис. 2.

При нагружении работающих на забое алмазных резцов разных размеров равной нагрузкой величина напряжений под торцом единичного алмаза снижается по мере уменьшения его диаметра, что может способствовать эффективности разрушения твердой изотропной горной породы.

Применение в качестве очистного агента жидкостей, содержащих поверхностно-активные вещества, приводит к

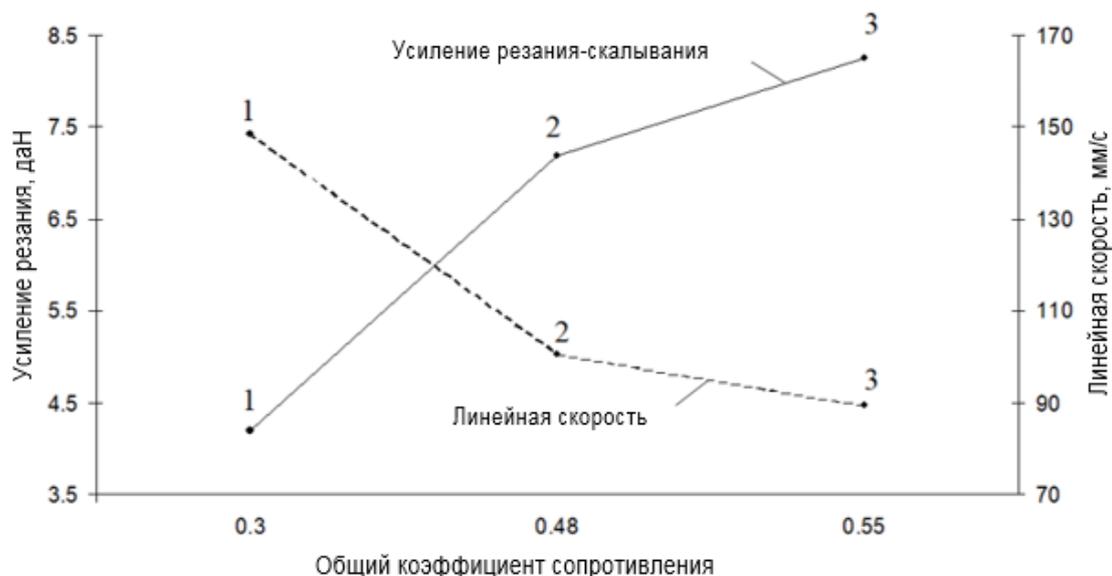


Рис. 2. Зависимости усилия резания-скалывания и линейной скорости перемещения реза от коэффициента сопротивления:

1 – активный очистной агент; 2 – техническая вода; 3 – сухое состояние

Fig. 2. Dependences of the cutting-shearing force and linear speed of the cutter travel on the resistance coefficient:

1 – active cleaning agent; 2 – process water; 3 – dry state

увеличению скорости резания-скалывания, особенно при больших диаметрах резцов, что объясняется способностью молекул активных веществ, проникая в микротрещины породы, снижать твердость и жесткость породы на микроуровне и увеличивать пластические свойства породы [6]. При этом глубина борозды разрушения будет тем больше, чем выше линейная скорость перемещения реза. В частности, согласно графикам, приведенным на рис. 3, повышение осевой нагрузки на единственный алмазный резец от 6 до 15 даН способствует росту его линейной скорости.

Как отмечено в работах [7, 8], механическая скорость бурения как показатель эффективности протекания деформационных процессов зависит не только от внешних силовых факторов разрушения, но и от числа одновременно работающих алмазных резцов в линии резания породоразрушающего инструмента. Проведенные аналитические расчеты позволяют представить данное соотношение в виде графиков на рис. 4.

Очевидно, при работе алмазного инструмента, оснащенного большим количеством резцов (коронки и долота большего диаметра), число лидирующих алмазов в линии резания будет соответственно больше, чем у коронок меньшего размера [9, 10]. При этом можно наблюдать интересную зависимость между механической скоростью бурения и числом одновременно работающих алмазных резцов (см. рис. 4).

С увеличением числа одновременно работающих резцов породоразрушающего инструмента до определенного значения механическая скорость повышается практически пропорционально, после чего происходит медленный спад скорости до первоначального значения в пределах исследования. Следовательно, рациональными можно считать значения механической скорости бурения, полученные при небольшой интенсивности повышения мощности на разрушение горной породы коронками малого диаметра (46, 59 мм) со средними для данных инструментов размерами разрушающих элементов.

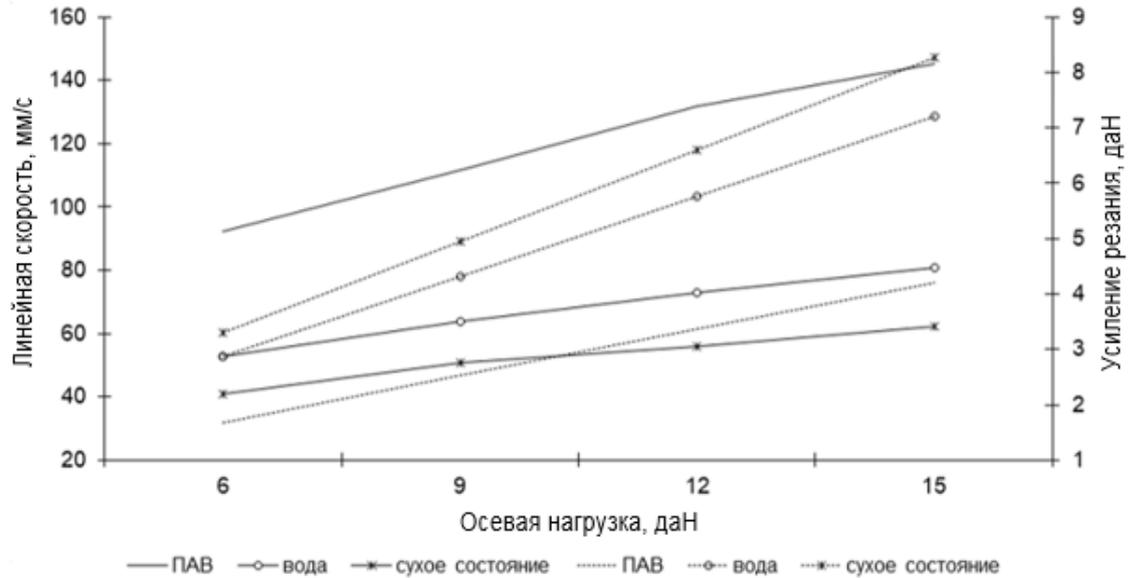


Рис. 3. Зависимости усилия резания-скалывания и линейной скорости перемещения резца от осевого усилия в различных средах
Сплошные линии – линейная скорость перемещения резца;
пунктирные линии – усилие резания-скалывания
Fig. 3. Dependences of the cutting-shearing force and linear speed of the cutter travel on the axial force in different environments
Continuous lines – linear speed of the cutter travel;
dashed lines – cutting-shearing force

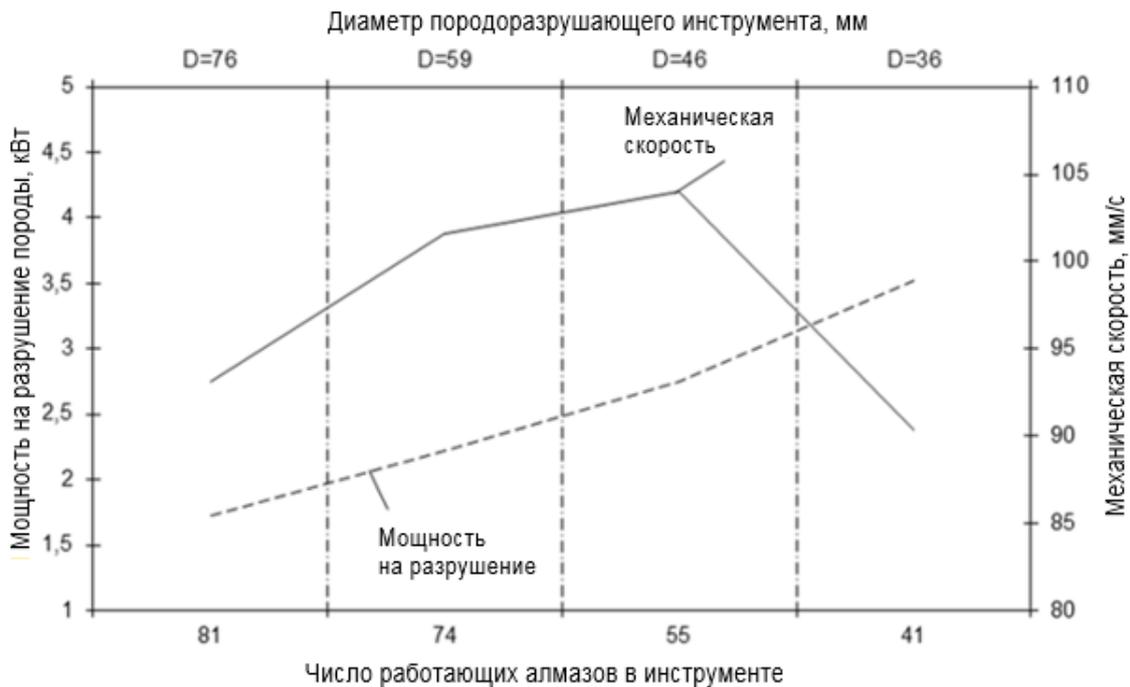


Рис. 4. Зависимости между мощностью на разрушение твердой горной породы, механической скоростью бурения и числом работающих алмазных резцов в инструменте различного диаметра
Fig. 4. Dependences between the power of solid rock destruction, mechanical speed of drilling and the number of diamond cutters in operation in the tools of various diameter

Зависимости напряжения в горной породе при ее деформировании и механической скорости бурения от глубины борозды разрушения в разных средах (вода, жидкость с поверхностно-активным веществом) приведены на рис. 5. Как видно из приведенных зависимостей, в процессе деформирования породы в среде с поверхностно-активным веществом по мере увеличения результирующего усилия и глубины борозды разрушения напряжения в горной породе на начальном интервале уменьшаются, затем при определенном усилии напряжения в породе начинают увеличиваться. При этом механическая скорость непрерывно возрастает.

При использовании в качестве промывочного агента воды напряжения, имеющие большие, чем в первом случае, величины, до определенного момента уве-

личиваются, затем уменьшаются. Механическая скорость также имеет тенденцию к возрастанию.

Интенсивность увеличения механической скорости при повышении глубины борозды разрушения (см. рис. 5) будет выше при использовании в качестве очистного агента жидкости с поверхностно-активным веществом. Меньшие величины механической скорости можно наблюдать при использовании в качестве очистного агента технической воды.

Неоднозначность зависимости напряжения при деформировании изотропной горной породы от величины результирующего усилия (см. рис. 5), очевидно, можно объяснить скачкообразностью процесса разрушения породы, связанной с цикличностью процесса нагружения – разгрузки в деформируемой области породы [11].

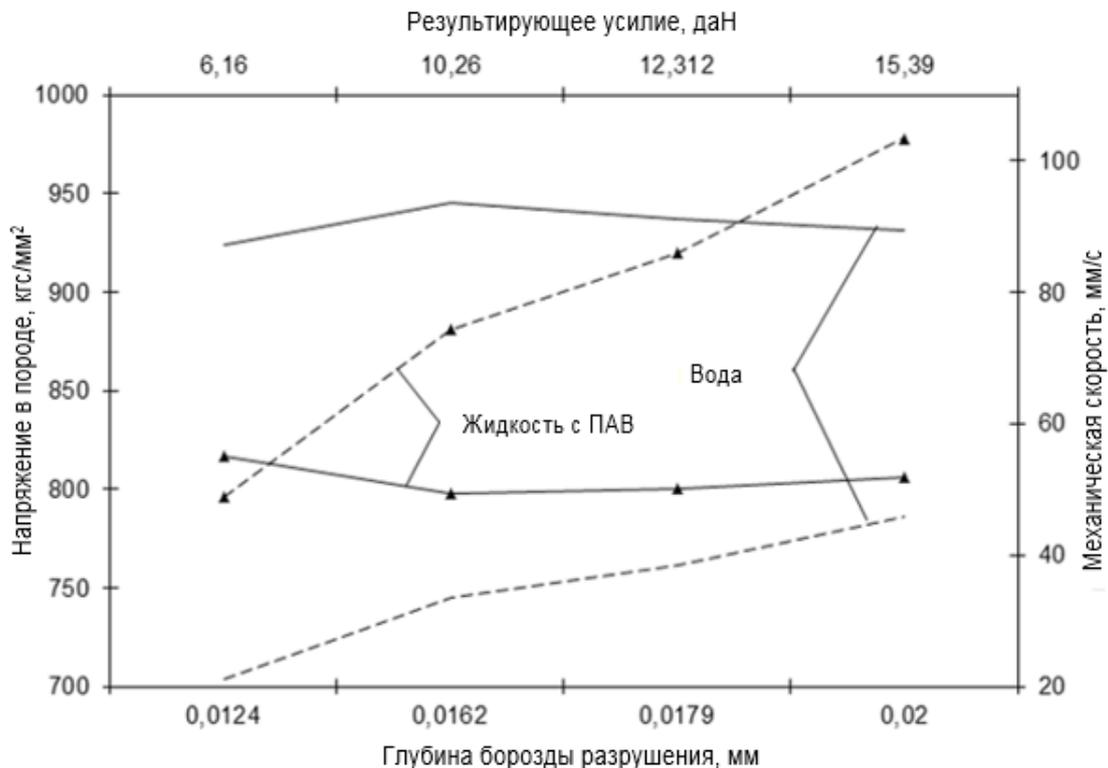


Рис. 5. Зависимости напряжения в горной породе (сплошные линии) и механической скорости бурения (пунктирные линии) от глубины борозды разрушения и результирующего усилия в различных средах
Fig. 5. Dependences of rock stress (continuous lines) and mechanical speed of drilling (dashed lines) on the depth of the destruction furrow and the resultant force in various environments

Заключение

Представленные в работе зависимости между основными техническими, технологическими параметрами процесса бурения и прочностными характеристиками изотропных горных пород, полученные на основании аналитических и экспериментальных исследований, поз-

воляют расширить знания о деформационных процессах, происходящих при бурении твердых пород, а также могут являться основой для составления рекомендаций по повышению эффективности бурения алмазным породоразрушающим инструментом.

Библиографический список

1. Пушмин П.С., Нескоромных В.В. Аналитическое исследование влияния усилия резания-скалывания и коэффициента сопротивления на процесс разрушения горной породы алмазным резцом // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. стат. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2003». Вып. 3. Иркутск, 2003. С. 212–217.
2. Пушмин П.С., Нескоромных В.В., Ламбин А.И. Экспериментальные исследования буримости анизотропной горной породы // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. стат. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2005». Вып. 5. Иркутск, 2005. С. 310–316.
3. Пушмин П.С., Романов Г.Р. Особенности механизма разрушения твердой горной породы алмазным породоразрушающим инструментом // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 5 (48). С. 59–64.
4. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.
5. Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. Некоторые представления механизма работы алмазного резца буровой коронки // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые: межвуз. науч. темат. сб. Вып. 25. Екатеринбург: Изд-во УГ-ГГА, 2003. С. 71–80.
6. Евсеев В.Д., Петухов М.В., Самохвалов М.А. Импульсные токи с забоя скважины –

- источник информации о свойствах горных пород // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 6. С. 39–43.
7. Зайцев В.И., Карпиков А.В., Че В.В. Эффективность использования долот PDC // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 5 (48). С. 58–66.
8. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225–230.
9. Спиринов В.И., Будюков Ю.Е., Кубасов В.В. Алмазный породоразрушающий инструмент для бурения скважин предельно малого диаметра на нефть и газ // Инженер-нефтяник. 2013. № 4. С. 24–26.
10. Пушмин П.С. Некоторые причины нарушения устойчивости стенок скважин // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2 (55). С. 61–65.
11. Буглов Н.А., Карпиков А.В., Гриб П.С. Стендовые исследования характера закрепления на забое нижней части буровой колонны при алмазном бурении геологоразведочных скважин // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. № 2 (39). С. 197–205.

References

1. Pushmin P.S., Neskromnykh V.V. *Analytical study of the effect of the cutting-shearing force and the resistance coefficient of the rock destruction by a diamond cutter*. Sb. stat. Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. "Geonauki-2003" "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy"

- [Collection of articles of the all-Russian scientific and technical conference with international participation "Geosciences-2003" "Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research"]. Iss. 3. Irkutsk, 2003, pp. 212–217. (In Russ.).
2. Pushmin P.S., Neskromnykh V.V., Lambin A.I. *Experimental study of anisotropic rock drillability*. Sb. stat. Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. "Geonauki-

2005" "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy" [Collection of articles of the all-Russian scientific and technical conference with international participation "Geosciences-2005" "Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research"]. Iss. 5. Irkutsk, 2005, pp. 310–316. (In Russ.).

3. Pushmin P.S., Romanov G.R. Features of the mechanism of solid rock breaking by a diamond rock-cutting tool. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 5 (48), pp. 59–64. (In Russ.).

4. Ryazanov Y.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg: Letopis' Publ., 2005, 664 p. (In Russ.).

5. Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. *Nekotorye predstavleniya mekhanizma raboty almaznogo reztsa burovoi koronki* [Some representations of the operation mechanism of the drill bit diamond cutter]. *Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii bureniya skvazhin na tverdye poleznye iskopaemye* [Improving equipment and technology of drilling wells for solid minerals]. Iss. 25. Ekaterinburg: Ural State Mining University Publ., 2003, pp. 71–80. (In Russ.).

6. Evseev V.D., Petukhov M.V., Samokhvalov M.A. Pulse currents with the hole bottom as the source of information about rock properties. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2005, vol. 308, no. 6, pp. 39–43. (In Russ.).

7. Zaitsev V.I., Karpikov A.V., Che V.V. Application efficiency of PDC bits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii*

estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 5 (48), pp. 58–66. (In Russ.).

8. Tret'yak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to designing highly efficient rock-breaking tool. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.).

9. Spirin V.I., Budyukov Yu.E., Kubasov V.V. *Almaznyi porodorazrushayushchii instrument dlya bureniya skvazhin predel'no malogo diametra na nef' i gaz* [Diamond rock breaking tool for drilling wells of a very small diameter for oil and gas]. *Inzhenerneftyanik* [Petroleum Engineer], 2013, no. 4, pp. 24–26. (In Russ.).

10. Pushmin P.S. Some causes of well wall stability loss. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 2 (55), pp. 61–65. (In Russ.).

11. Buglov N.A., Karpikov A.V., Grib P.S. The results of experimental-theoretical studies on establishing conditions for fastening bottom section of string when using series diamond bits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2011, no. 2 (39), pp. 197–205. (In Russ.).

Критерии авторства

Пушмин П.С. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Пушмин Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: pps@istu.edu

Authorship criteria

Pavel S. Pushmin has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Pavel S. Pushmin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: pps@istu.edu