

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ
GEOLOGICAL EXPLORATION TECHNIQUE

УДК 622.24.051

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ УДАРНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО БУРЕНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО
ВНЕЦЕНТРЕННОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ***

V.V. NESKOROMNYKH, A.E. GOLOVCHENKO, M.S. POPOVA

*Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета
79, Свободный пр., Красноярск 660041, Россия
email: antong77@yandex.ru*

Ударно-вращательное бурение скважин пневмоударниками — перспективный, высокопроизводительный способ, широко используемый в практике геолого-разведочных работ, производительность которого определяется в основном давлением и количеством подаваемого компрессором очистного агента. Параметры серийно выпускаемых компрессоров высокого давления не позволяют производить бурение на глубине более 300 м, что является одним из главных сдерживающих факторов практического применения в производственных условиях. Одним из способов повышения производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин, а вместе с тем и предельной глубины буримых скважин является совершенствование механизма разрушения горных пород приложением внецентренных ударных импульсов к буровому инструменту, что позволит более активно реализовать тангенциальную составляющую ударного импульса, оказывающую влияние на форму и объёмы формируемых лунок разрушения, обеспечивая дополнительное скалывание породы в направлении плоскости забоя. Рассмотрены пути совершенствования известных конструкций долот для ударно-вращательного бурения скважин, реализующих внецентренное приложение ударных импульсов, вопросы геометрического обоснования формы эксцентричного выступа на торовой шайбе бурового долота для ударно-вращательного бурения и колебаний торовой шайбы при передаче внецентренных ударных импульсов с точки зрения повышения долговечности конструкции и точности передачи внецентренных ударных импульсов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бурение; производительность; эксцентриситет; удар; разрушение; горная порода.

DOI:10.32454/0016-7762-2019-5-64-69

**MODERNIZATION OF ROCK-CUTTING TOOL
FOR ROTARY-PERCUSSION DRILLING THAT IMPLEMENTS
ECCENTRIC APPLICATION OF IMPACT PULSES**

V.V. NESKOROMNYKH, A.E. GOLOVCHENKO, M.S. POPOVA

*School of Mining, Geology and Geotechnology of the Siberian Federal University
79, Svobodnyj pr., Krasnoyarsk 660041, Russia,
email: antong77@yandex.ru*

Rotary percussion drilling with pneumatic hammers is a promising, high-performance method widely used in the practice of geological exploration, the performance of which is determined mainly by pressure and the amount of cleaning agent supplied by the compressor. The parameters of commercially available high-pressure compressors do not allow drilling at a depth of more than 300 meters, which is one of the main limiting factors of its practical application in production conditions. One of the ways to improve the performance of the rotary-percussion drilling of wells, and at the same time the maximum depth of drilled wells is to improve the mechanism of rock destruction by applying eccentric impact pulses to the drilling tool, which will make it possible to implement more actively the tangential component of the impact pulse that affects the shape and the volumes of the fracture holes being formed, providing additional splitting of the rock in the direction of the rock face. The paper discusses the ways



to perfect the known designs of bits for rotary-percussion drilling of wells implementing eccentric application of impact impulses, issues of geometric substantiation of the shape of an eccentric protrusion on a drill bit torus shim for rotary-percussion drilling and oscillations of torus shim when transmitting eccentric impact pulses from the point of view of enhancement durability of a construction and accuracy of transfer of eccentric impact pulses.

К е y w o r d s: drilling; productivity; eccentricity; impact; destruction; rock.

Одним из наиболее перспективных способов бурения скважин различного назначения является ударно-вращательный с применением погружных пневмоударных машин — способ, широко используемый в горном деле, геологоразведке, бурении скважин на воду, строительстве дорог и других буровых работах по всему миру [5, 8, 13]. По критерию механической скорости ударно-вращательного бурения является одним из наиболее перспективных способов благодаря высоким скоростям проходки скважин. Оптимальная область применения ударно-вращательного бурения — скважины различного целевого назначения глубиной до трёхсот метров, что является одним из главных сдерживающих факторов его практического применения в производственных условиях [7, 9, 12].

Производительность пневмоударного бурения определяется давлением и количеством нагнетаемого воздуха или газожидкостной смеси, частотой ударов забойной пневмоударной машины, частотой вращения бурового снаряда и осевой нагрузкой. Осевая нагрузка при ударно-вращательном бурении довольно пассивный параметр, мало влияющий на механическую скорость и в большей степени предотвращающий отскакивание долота от забоя скважины, а частота вращения обеспечивает определенную схему поражения забоя. Разрушение горных пород при пневмоударном бурении является сложным многофакторным параметром [1, 6, 10, 11].

Одним из способов повышения производительности ударно-вращательного бурения скважин является изменение реализуемого механизма разрушения горных пород — нанесение не осевых ударных импульсов, а внецентренных (смещённых от осевого положения на некоторое расстояние).

В [4] приведены первые результаты опытного определения объёма разрушаемой внецентренными ударными импульсами горной породы, где показана возможность повышения производительности при применении данного способа разрушения горных пород.

При нанесении удара с эксцентриситетом к осевому внедрению индентора добавляется его тангенциальное смещение под действием формирующейся суммарной тангенциальной составляющей наносимого ударного импульса, в то время как при нанесении центрального ударного импульса тангенциальные составляющие компенсируют один другой и реализуются нормальные, перпендикулярные к плоскости забоя напряжения

[2]. Схема передачи ударных импульсов и создания напряжений под породоразрушающими вставками при точечном ударе представлена на рис. 1. Следует отметить, что с увеличением эксцентриситета приложения удара нормальное напряжение, создающее задел для скалывания породы забоя, падает пропорционально квадрату косинуса угла дельта. Согласно полученным экспериментальным данным оптимальные величины эксцентриситета приложения удара, как правило, не превышают 1 мм, соответственно выше обозначенное падение не составляет более 1,5% и не оказывает существенного негативного влияния на получаемые объёмы разрушения горных пород.

С целью практической реализации механизма разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами ведётся разработка породоразрушающего инструмента и забойной ударной машины, способных реализовывать механизм с целью повышения производительности разрушения горных пород и управления направлением скважин [2, 3].

Для бурения в горных породах средней твёрдости, с применением серийно выпускаемых погружных пневмоударных машин, разработана конструкция долота, реализующего передачу внецентренных ударных импульсов, защищённая патентом РФ 2682824 [3].

Для передачи внецентренных ударных импульсов конструкция долота оснащена торовой шайбой 1, преобразующей центральный ударный импульс, воспринимаемый шайбой верхним торцом, во внецентренный, передаваемый эксцентричным выступом 2, расположенным на нижнем торце торовой шайбы, далее хвостовику долота 5. Фиксация торовой шайбы на хвостовике долота производится путём навинчивания фиксирующей шайбы 3.

Важно отметить, что наряду с положительным влиянием внецентренного нанесения ударных импульсов на производительность процесса разрушения горных пород, существует и отрицательное, заключающееся в формировании деструктивного изгибающего момента, отрицательно влияющего на долговечность конструкции:

$$M = P \cdot e,$$

где P — сила удара, Н; e — эксцентриситет приложения удара (расположения выступа 2 на нижнем торце торовой шайбы 1), м.

Наличие торовой шайбы в конструкции долота, выполненной с возможностью поворота относи-

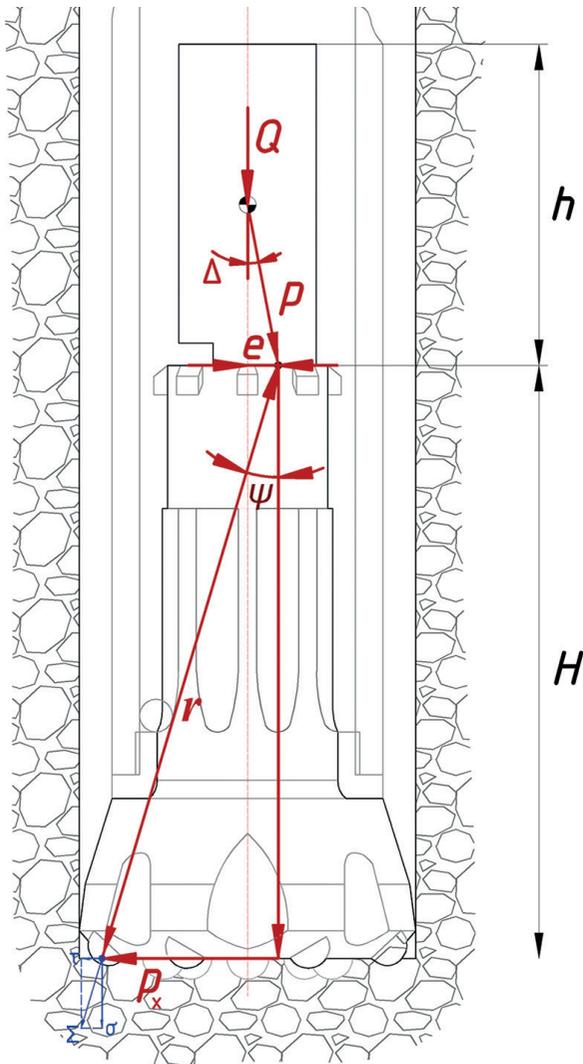


Рис. 1. Схема передачи ударных импульсов и создания напряжений под породоразрушающими вставками при точечном ударе: Q – вес ударника, Н; P – сила удара, Н; e – эксцентриситет приложения удара, м; Δ – угол между осью инструмента и направлением ударного импульса, передаваемого от ударника к породоразрушающему инструменту, град.; h – высота ударника, м; ψ – угол между осью инструмента и направлением движения ударного импульса от точки его приложения к породоразрушающему инструменту к породоразрушающей вставке, град.; r – расстояние от точки приложения ударного импульса к породоразрушающему инструменту до породоразрушающей вставки, м; H – высота породоразрушающего инструмента, м; P_x – суммарная составляющая тангенциального сдвигового усилия, Н; σ – нормальные напряжения, Па; τ – касательные напряжения, Па; Σ – суммарные напряжения, Па

тельно оси, перпендикулярной оси долота, снимает деструктивный изгибающий момент с хвостовика долота, тем самым исключая деструктивную функцию внецентренного приложения ударных импульсов.

Внецентренный ударный импульс, сообщённый хвостовику торовой шайбой, передаётся головке долота, состоящей из подвижной 12 и не-

подвижной 7 частей, вызывая поворот подвижной полусферической части головки долота в плоскости нанесения внецентренного удара на некоторый угол β (зависящий от физико-механических свойств разрушаемых горных пород). Подвижная и неподвижная части головки долота связаны шарнирным элементом 8, а поддержание подвижной части головки долота в исходном положении и её возврат в него после окончания цикла разрушения производится с помощью упругого элемента 10. Для разрушения горных пород на забое подвижная часть головки долота содержит породоразрушающие элементы 13. Поскольку породоразрушающие элементы, которыми оснащена разрабатываемая конструкция долота, должны эффективно работать как при воздействии на горные породы с помощью удара высокой мощности, так и при некотором проскальзывании в плоскости забоя скважины, предположительно одной из оптимальных геометрических форм породоразрушающих элементов будет являться полусферическая.

Сборка подвижной и неподвижной частей головки бурового долота производится с помощью закрепления цилиндрической шайбы 9 на неподвижной части головки долота болтами 11. Поворот подвижной полусферической части головки долота увеличивает амплитуду тангенциальных смещений породоразрушающих элементов, реализуя тангенциальные ударные усилия, приводящие к изменению формы лунок разрушения, повышению их размеров и обеспечивающие отделение от забоя части массива горной породы, которая испытала разрушающее действие, разделена трещинами, но ещё удерживается в лунках разрушения силами своих внутренних связей. Величина тангенциального смещения породоразрушающих элементов 13 задается величиной угла β (рис. 2).

Оптимальной областью применения бурового долота для ударно-вращательного бурения (рис. 2) среднетвёрдые, в особенности пластичные горные породы. Данное обстоятельство связано главным образом с низкой эффективностью разрушения пластичных горных пород с использованием осевого удара, приводящего по большей части к уплотнению пород. При разрушении горных пород внецентренными ударными импульсами к нормальному осевому усилию добавляется тангенциальная составляющая, обуславливающая тангенциальное смещение породоразрушающих элементов, создавая подобие резания или скалывания горных пород (рис. 3).

В то же время, если мы говорим о породах, имеющих несколько более высокие прочностные показатели (оказывающих более значительное сопротивление тангенциальному смещению породоразрушаю-

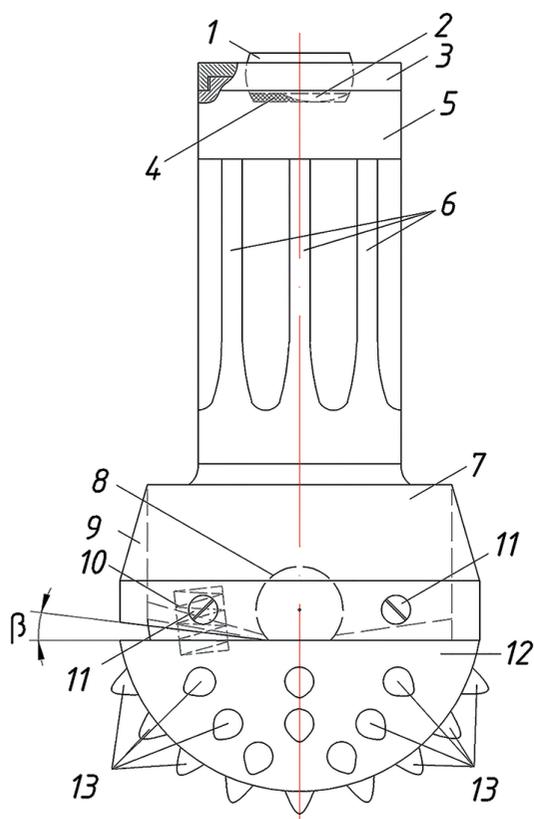


Рис. 2. Конструкция долота для ударно-вращательного бурения, реализующего передачу внецентренных ударных импульсов: 1 – торовая шайба; 2 – эксцентричный выступ; 3 – шайба фиксирующая; 4 – упругий материал; 5 – хвостовик; 6 – соединительные шлицы; 7 – неподвижная часть головки долота; 8 – шарнирный элемент; 9 – цилиндрическая шайба; 10 – упругий элемент; 11 – болты; 12 – подвижная часть головки долота; 13 – породоразрушающие элементы

щих элементов), то, вероятно, при их разрушении нет необходимости в больших тангенциальных смещениях породоразрушающих элементов. В таком случае конструкция долота, представленная на рис. 2, значительно упрощается, лишаясь шарнирного элемен-

та, связывающего подвижную и неподвижную части головки долота, упругого элемента, цилиндрической шайбы, болтов. Головка долота становится монолитной, что положительно сказывается на её прочностных характеристиках, при этом тангенциальные смещения породоразрушающих элементов сохраняются, имея значительно меньшую, но достаточную для увеличения объёмов разрушения горных пород амплитуду.

Несмотря на преимущества представленной на рис. 2 конструкции долота для ударно-вращательного бурения, реализующего внецентренное приложение ударных импульсов, она также имеет ряд вопросов, требующих более детальной проработки. В частности, к ним относятся вопросы геометрического обоснования формы эксцентричного выступа на торовой шайбе и колебаний торовой шайбы при передаче внецентренных ударных импульсов.

Как уже сказано ранее, функция торовой шайбы заключается в исключении деструктивной функции внецентренного удара, вызванной возникающим в конструкции изгибающим моментом M . С этой целью торовая шайба выполнена с возможностью поворота относительно оси, перпендикулярной оси породоразрушающего инструмента, формируя отскок шайбы после цикла передачи внецентренного ударного импульса (рис. 4, б).

Колебательное движение торовой шайбы вследствие нанесения ударного импульса и её отскока описывается следующим выражением:

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{r \cdot t}{2 \cdot m}} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где A , t – координаты пространства и времени, A_0 – начальная амплитуда колебаний шайбы, ω – циклическая частота колебаний, r – сопротивление среды, m – масса шайбы.

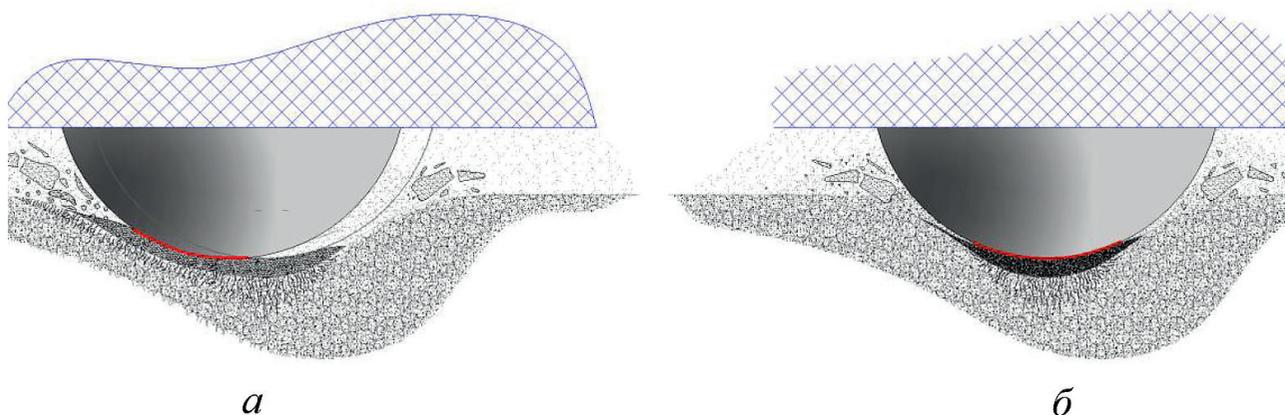


Рис. 3. Схема разрушения горных пород резцом при: а – внецентренном ударе; б – центральном ударе

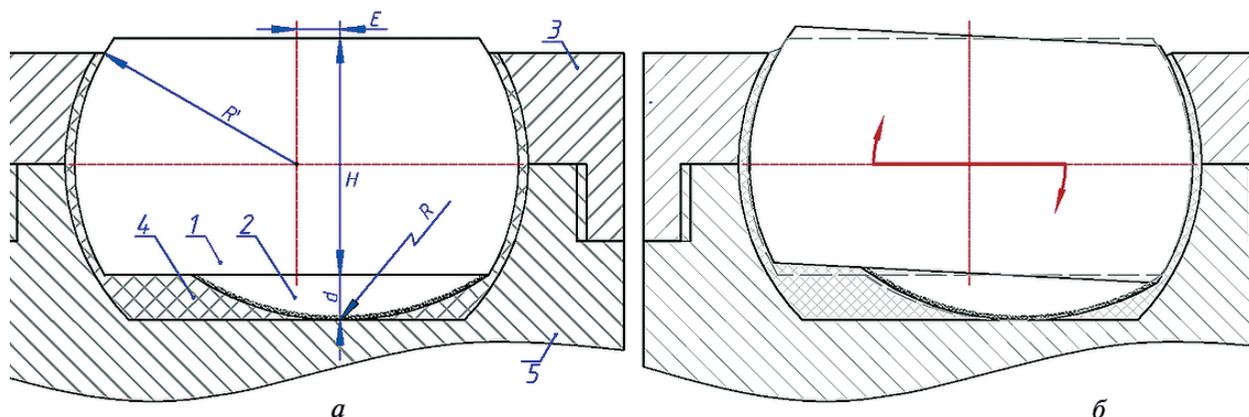


Рис. 4. Торговая шайба: а — основные геометрические характеристики; б — отскок шайбы после нанесения ударного импульса: 1 — торговая шайба; 2 — эксцентричный выступ; 3 — шайба фиксирующая; 4 — упругий материал; 5 — хвостовик

Согласно формуле (1), при повышении сопротивления среды r уменьшение амплитуды собственных колебаний торговой шайбы 1 (рис. 4, а) с течением времени будет проходить интенсивнее. С целью повышения эффективности гашения колебаний торговой шайбы долота зазор между торговой шайбой и её посадочным местом в хвостовике долота следует заполнять упругим материалом, предпочтительно резиной, не препятствующим отскоку шайбы при нанесении внецентренного удара (Положительное решение о выдаче патента на полезную модель от 14.06.2019, заявка 2019115771/03 от 22.05.2019). Также представленное техническое решение уменьшит вероятность перекоса торговой шайбы бурового долота после некоторого числа циклов передачи ударного импульса.

Геометрическое обоснование параметров эксцентричного выступа производится по критерию точности передачи внецентренного ударного импульса при износе выступа. Оптимально выполнение эксцентричного выступа на нижнем торце торговой шайбы долота в виде шарового сегмента радиусом (рис. 4, а):

$$R = \frac{\left(\sqrt{R'^2 - \left(\frac{H}{2}\right)^2} - E \right)^2 + d^2}{2d}$$

где R' — радиус шарового слоя торговой шайбы, м; H — высота торговой шайбы, м; E — эксцентриситет приложения удара, м; d — высота сегмента, м.

Выполнение эксцентричного выступа, согласно представленной геометрической зависимости, позволит добиться нанесения удара с заданной, неизменной при износе в ходе работы величиной эксцентриситета приложения точечного удара при различных величинах высоты и радиуса шарового слоя торговой шайбы и высоты сегмента.

Также с целью повышения твёрдости поверхности выступа рекомендуется поверхностное упрочнение эксцентричного выступа 2 на нижнем торце торговой шайбы 1 токами высокой частоты (рис. 4). При этом под твёрдой, закалённой поверхностью выступа останутся вязкие незакалённые слои металла, что уменьшит хрупкость детали, повысит износостойкость и циклическую прочность.

Разрушение горных пород внецентренными ударными импульсами — современный, прогрессивный механизм повышения производительности процесса ударно-вращательного бурения скважин. Практическая апробация механизма в лабораторных условиях показала малые величины оптимального эксцентриситета приложения удара — в большинстве случаев она не превышает 1 мм, находясь главным образом в зависимости от параметров ударной системы и физико-механических свойств горных пород. Последним препятствием перед практическим производственным испытанием долот, реализующих внецентренное приложение ударных импульсов, является анализ формируемых напряжений в конструкции при передаче эксцентричного удара с целью подбора оптимальных материалов изготовления долот, а также определения критических зон конструкции и их доработки.



ЛИТЕРАТУРА

1. В а с и л ь е в А.Н., Ш и ш л я е в В.В., К и р и л ь ч е н - к о А.В. Внедрение ударно-вращательного способа бурения и эффективных методов геолого-промысловых исследований при разведке метаноугольных месторождений // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 45–49.
2. Г о л о в ч е н к о А.Е. Исследование зависимости угла перекоса забоя от эксцентриситета приложения удара // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXII международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2018. Т. 2. С. 497–499.
3. Нескоромных В.В., Головченко А.Е. Патент 2682824 Российская Федерация, МПК E21B 10/36 (2006.01). Буровое долото для ударно-вращательного бурения: 2018118680: заявл. 21.05.2018; опублик. 21.03.2019; заявитель СФУ. 6 с. : ил. Текст: непосредственный.
4. Н е с к о р о м н ы х В.В. Результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1999. № 6. С. 115–120.
5. Рябчиков С.Я., Храменков В.И., Брылин В.И. Технология и техника бурения геологоразведочных и геотехнологических скважин: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. 514 с.
6. О п а р и н В.Н., Т и м о н и н В.В., К а р п о в В.Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 6. С. 60–74.
7. Т и м о н и н В.В., К а р п о в В.Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2016. Т. 2. № 3. С. 172–176.
8. B u C.G. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling // Journal of Earth Science. 2009. Vol. 20. N 5. P. 868–878.
9. K i v a d e S.B., M u r t h y Ch.S., V a r d h a n H. Laboratory Investigations on Percussive Drilling // Journal of The Institution of Engineers. 2013. Vol. 94. N 2.
10. S a a d a t i M. Granite rock fragmentation at percussive drilling — experimental and numerical investigation // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2014. Vol. 38. N 8. P. 562–569.
11. S a k s a l a T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2013. N 37. P. 309–324.
12. S o n g C., C h u n g J., C h o J., N a m Y. Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. N 1. P. 1–13.
13. Z h a n g X., Z h a n g S., L u o Y., W u a D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer — an innovative rotary-percussion drilling tool // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. N 4. P. 362–370.

REFERENCES

1. Vasil'ev A.N., Shishljaev V.V., Kiril'chenko A.V. The introduction of rotary-percussion drilling method and effective methods of geological and field research in the exploration of methane-coal deposits. *Razvedka i ohrana nedr — Mineral exploration and protection*, 2014, no. 7, pp. 45–49. (in Russian)
2. Golovchenko A.E. The study of the dependence of the skew angle of the face on the eccentricity of the impact application. *Theses of XXIId session of International symposium Problems of geology and subsoil development*. Tomsk Publ., 2018, pp. 497–499. (in Russian)
3. Neskormnyh V.V., Golovchenko A.E. *Burovoe doloto dlja udarno-vrashhatel'nogo burenija* [Drill bit for rotary-percussion drilling]. Patent RF, no. 2682824, 2018. (in Russian)
4. Neskormnyh V.V. The results of experimental studies of the destruction of rocks by eccentric impact pulses. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Geologija i razvedka — Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1999, no. 6, pp. 115–120. (in Russian)
5. Rjabchikov S.Ja., Hramenkov V.I., Brylin V.I. *Technology and technique for drilling exploration and geotechnological wells*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2010, 514 p. (in Russian)
6. Oparin V.N. Timonin V.V., Karpov V.N. Quantitative assessment of the effectiveness of the process of destruction of rocks during rotary-percussion drilling of wells. *Fiziko-tehnicheskie problem razrabotki poleznyh iskopaemyh — Journal of Mining Science*, 2016, no. 6, pp. 60–74. (in Russian)
7. Timonin V.V., Karpov V.N. Assessment of the destruction of rocks during shock-rotary drilling. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk — Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*, 2016, T. 2, no. 3, pp. 172–176. (in Russian)
8. Bu C.G. Numerical simulation of impact on pneumatic DTH hammer percussive drilling. *Journal of Earth Science*, 2009, vol. 20, no. 5, pp. 868–878.
9. Kivade S.B., Murthy Ch.S., Vardhan H. Laboratory Investigations on Percussive Drilling. *Journal of The Institution of Engineers*. 2013, vol. 94, no. 2.
10. Saadati M. Granite rock fragmentation at percussive drilling — experimental and numerical investigation. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014, vol. 38, no. 8, pp. 562–569.
11. Saksala T. 3D numerical modelling of bit-rock fracture mechanisms in percussive drilling with a multiplebutton bit. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37, pp. 309–324.
12. Song C., Chung J., Cho J., Nam Y. Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, no. 1, pp. 1–13.
13. Zhang X., Zhang S., Luo Y., Wua D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer—an innovative rotary-percussion drilling tool. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 4, pp. 362–370.