

УДК 622.241.8

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН С ПРОДУВКОЙ ВОЗДУХОМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Р. У. ДЖУРАЕВ¹, доцент, канд. техн. наук, strong0185@mail.ru

М. В. МЕРКУЛОВ², проф., д-р техн. наук

В. А. КОСЬЯНОВ², проф., д-р техн. наук

А. М. ЛИМИТОВСКИЙ², проф., д-р техн. наук

¹Навоийский государственный горный институт, Навои, Узбекистан

²Российский государственный геологоразведочный университет, Москва, Россия

Введение

Бурение с продувкой воздухом является эффективным в самых неблагоприятных для использования промывочных жидкостей условиях: при бурении в зонах значительных потерь циркуляции, затруднениях с водоснабжением, в высокогорной или труднопроходимой местности или в районах с суровым климатом [1].

При бурении скважин в скальных массивах разрушение породы сопровождается значительным выделением тепла, так как на собственном процессе разрушения расходуется около 1 % подводимой к забою механической энергии, остальная же ее часть рассеивается в форме тепла [2–5].

Высокие температуры бурового инструмента создают аварийные ситуации в виде прижога алмазных коронок, затраты времени на ликвидацию которых составляют 8–10 % [6–8]. Очевидно, что повышение эффективности непосредственно связано с обеспечением оптимального температурного режима при бурении скважин.

Условия охлаждения долот при бурении с продувкой существенно хуже, чем при использовании газожидкостных систем. Поэтому нормализация температурного режима породоразрушающего инструмента при бурении с продувкой возможна, во-первых, за счет увеличения массового расхода при умеренных скоростях движения воздуха при расширении проходных каналов и кольцевых зазоров и, во-вторых, вследствие принудительного охлаждения продувочного воздуха [9, 10].

Первое направление потребует увеличения массового расхода компрессора при повышении его мощности, что малоэффективно. Второй способ является более приемлемым, но при условии разработки эффективного охладителя.

Разработка конструкции вихревой трубы для бурения с продувкой воздухом

В работе [9] приведены результаты исследований по использованию в качестве охладителя воздуха вихревой трубы. Данные проведенных экспериментальных исследований позволили обосновать возможность получения отрицательных температур продувочного воздуха без необходимости увеличения мощности компрессора. Это дает возможность утверждать, что применение вихревых труб в бурении является достаточно энергоэффективным.

Вихревой эффект, или эффект Ранка, заключается в том, что если в трубу подать тангенциально закрученный поток газа, то в ней при определенных условиях будет происходить температурное разделение газа. В центре образуется более холодный поток, чем на периферии, и через центральное отверстие одного из концов трубы будет выходить газ, температура которого окажется

Рассмотрены возможности нормализации температурного режима породоразрушающего инструмента за счет принудительного охлаждения очистного воздуха на забое скважины до отрицательных температур, разработана новая конструкция бурового снаряжения для бурения с продувкой воздухом. Приведены предварительные результаты экспериментальных исследований разработанной конструкции бурового снаряжения.

Ключевые слова: продувка воздухом, бурение, эффект Ранка, скважина, вихревая труба, компрессор, буровой снаряд, промывочная жидкость, забой, температурный режим.

DOI: 10.17580/gzh.2020.12.16

значительно ниже, чем на входе. Периферийные слои газа, имеющие более высокую температуру, будут выходить через дроссельное отверстие с другого конца трубы [11–17].

На основе выполненных расчетов предложена конструкция вихревой трубы, представленная на **рис. 1**.

В общем виде вихревая труба состоит из корпуса 3, в кольцевой полости которого выполнен тангенциальный прямоугольный канал. С внешней стороны прямоугольного канала к корпусу прикреплен штуцер для подвода сжатого воздуха. В кольцевой полости корпуса установлены отбортованная трубка 1 строго цилиндрической формы с полированной внутренней поверхностью диаметром D , а затем улитка 4 таким образом, что ее отверстие (размеры которого соответствуют прямоугольному каналу корпуса) совпадает с каналом, образуя сопловый вход. В ту же полость корпуса вставлены диафрагма 5 с отверстием D_g и герметизирующая прокладка 10 с гайкой 6. В противоположном конце трубки 1 на расстоянии L от улитки плотно установлены четырехлопастная крестовина 9 и дроссель 8.

Вихревая труба отличается малыми размерами и не имеет подвижных частей, что позволяет использовать ее в качестве призабойного генератора холода при бурении скважин.

Современные горно-геологические условия требуют совершенствования технологии бурения и повышения показателей буровых работ за счет создания новых высокоэффективных буровых снарядов для проходки скважин. Внедрение новых буровых инструментов с высокой стойкостью и повышенной механической

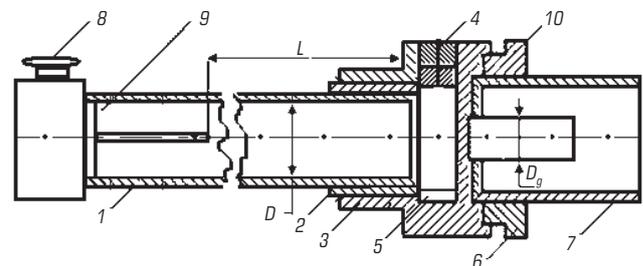


Рис. 1. Конструкция вихревой трубы:

1, 7 – трубки; 2, 6 – гайки; 3 – корпус; 4 – улитка;

5 – диафрагма; 8 – дроссель; 9 – крестовина; 10 – прокладка

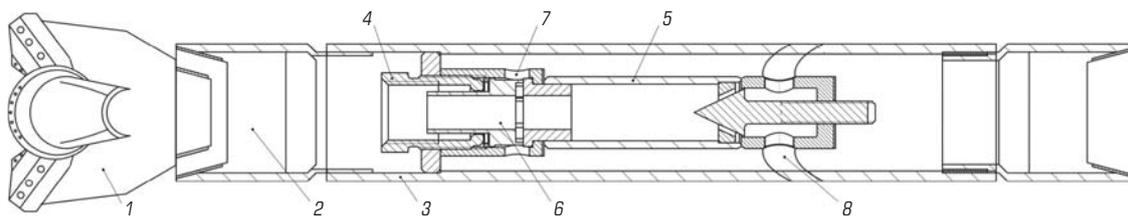


Рис. 2. Буровой снаряд с вихревой трубой для очистки забоя воздухом:

1 – шарошечное долото; 2 – переходник; 3 – наружная труба; 4 – гайка; 5 – вихревая труба; 6 – генератор холодной фракции на холодном выходе; 7 – входное отверстие; 8 – тангенциальное отверстие для выхода горячего воздуха

скоростью бурения повышает эксплуатационную эффективность буровых установок. Наилучшие результаты дает использование вихревой трубы непосредственно на забое.

С целью повышения эффективности работы породоразрушающего инструмента на основе нормализации температурных режимов при бурении скважин с очисткой забоя воздухом разработана новая конструкция бурового снаряда, включающая в себя вихревую трубу (рис. 2).

Буровой снаряд с вихревой трубой работает следующим образом. При бурении скважины сжатый воздух по наружной трубе 3 через входные отверстия 7 подается на генератор холодной фракции 6 вихревой трубы 5 и закручивается в ней. Поток сжатого воздуха при прохождении через вихревую трубу разделяется на два потока: поток холодного и горячего воздуха. Поток холодного воздуха вытекает из отверстия гайки 4 и через переходник 2 и буровое долото 1 поступает на забой скважины для выноса продуктов разрушения в затрубное пространство с одновременным охлаждением бурового долота. Генератор холодной фракции в данном устройстве выполнен съемным, что позволяет заменить его на другой тип и при необходимости изменить режим охлаждения в зависимости от режима бурения.

Горячий воздух из вихревой трубы 5 через тангенциальное отверстие для выхода горячего потока воздуха 8 поступает в затрубное пространство. Поскольку отверстие 8 выполнено тангенциально, то создается вихревое движение в затрубном кольцевом зазоре, что позволяет эжектировать холодный поток с продуктами разрушения. Это улучшает очистку забоя и благоприятно сказывается на охлаждении долота, так как уменьшаются затраты энергии на повторное переизмельчение частиц породы. Такое исполнение бурового снаряда для бурения с продувкой воздухом позволяет подать охлажденный воздух непосредственно на забой, нормализовать температурный режим и повысить стойкость породоразрушающего инструмента. Применение охлажденного продувочного воздуха значительно снижает температуру в скважине, что создает благоприятные температурные условия для работы породоразрушающего инструмента.

Экспериментальные исследования бурового снаряда с вихревой трубой

Для оценки эффективности применения разработанной конструкции бурового инструмента и влияния низких начальных температур очистного воздуха на его работу на базе Центральной геологоразведочной партии ГРЭ Навоийского горно-металлургического комбината были проведены опытно-промышленные испытания.

Схема экспериментальной установки для испытания бурового снаряда с вихревым охладителем приведена на рис. 3.

Экспериментальные работы проводили следующим образом: на разбуриваемый блок 3 породы с коэффициентом крепости

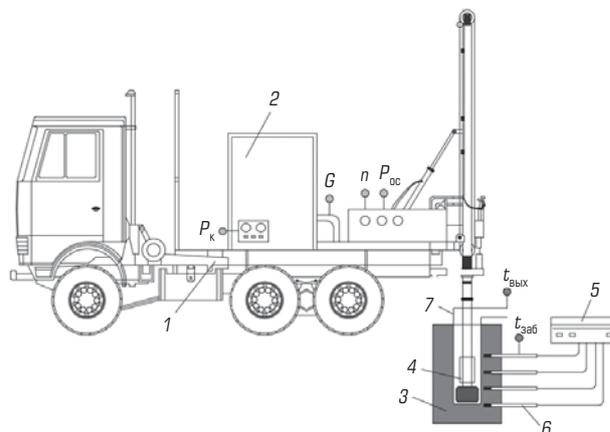


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для испытания бурового снаряда с вихревым охладителем:

1 – буровая установка, 2 – компрессор, 3 – разбуриваемый искусственный блок; 4 – буровой снаряд, содержащий вихревую трубу; 5 – многоканальный измеритель температуры; 6 – термопары; 7 – патрубок для отвода очистного воздуха со шламом; n – точка замера частоты вращения буровой колонны, мин⁻¹; P_{oc} – точка замера осевой нагрузки, кН; P_k – точка замера давления воздуха на выходе из компрессора, мПа; G – точка замера расхода воздуха на выходе из компрессора, кг/с; $t_{заб}$ – точка замера температуры на забое, °С; $t_{вых}$ – точка замера температуры очистного воздуха на выходе из скважины, °С

$f = 7$ установили термопары 6 и подключили их к многоканальному измерителю температуры 5. В верхней части разбуриваемого блока смонтировали патрубок 7 для отвода очистного воздуха со шламом. Буровой снаряд с вихревой трубой 4 присоединили к вращателю буровой установки 1, далее запустили компрессор 2, затем буровую установку 1, задали давление сжатого воздуха P_k на компрессоре, частоту вращения n и осевую нагрузку P_{oc} . После стабилизации режима работы замеряли расход воздуха G на выходе из компрессора, температуру на забое $t_{заб}$ и температуру $t_{вых}$ очистного воздуха на выходе из скважины. Длительность экспериментального бурения T для заданных параметров в каждом случае составляла 10 мин, после чего замеряли длину проходки L . Экспериментальные работы выполняли в несколько этапов с различными частотой вращения n , осевой нагрузкой P_{oc} , давлением P_k и расходом G сжатого воздуха.

Результаты экспериментальных исследований конструкции бурового инструмента с вихревой трубой позволили установить изменение температуры на забое скважины $t_{заб}$ в зависимости от температуры продувочного воздуха, подаваемого в скважину $t_{охл}$, изменение температуры потока продувочного воздуха t_x – от

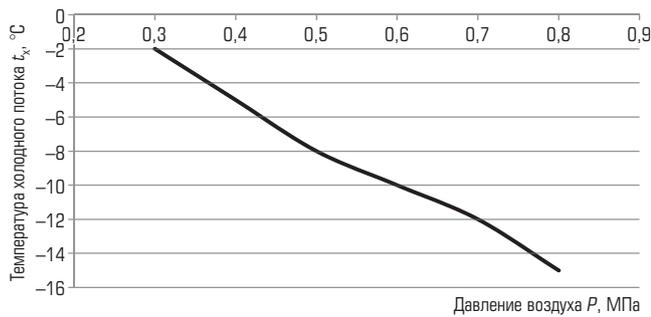


Рис. 4. Зависимость температуры охлажденного потока t_x воздуха от давления P , создаваемого компрессором

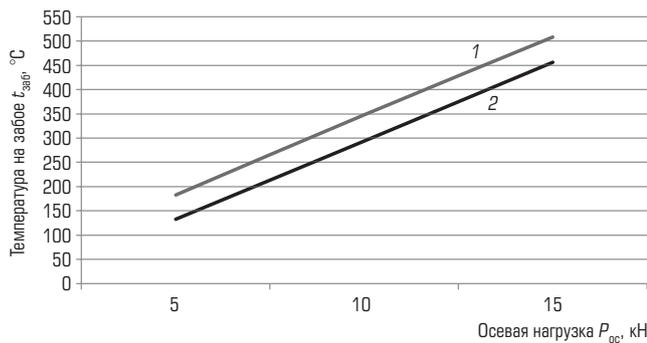


Рис. 5. Зависимость изменения температуры на забое $t_{заб}$ при частоте вращения бурильной колонны $n = 200 \text{ мин}^{-1}$ от осевой нагрузки $P_{ос}$ при различной температуре продувочного воздуха $t_{охл}$:
1, 2 – $t_{охл}$ соответственно 40 и 12 °C

давления воздуха P , а также колебания скорости проходки – от температуры продувочного воздуха, подаваемого в скважину $t_{охл}$.

Изменение температуры потока продувочного воздуха от его давления представлено на **рис. 4**.

При давлении сжатого воздуха 0,3 МПа температура охлажденного потока воздуха составила -2 °C , а при давлении 0,8 МПа -15 °C . С увеличением давления сжатого воздуха на каждые 0,1 МПа наблюдалось снижение температуры охлажденного воздуха на $2-3 \text{ °C}$.

Изменение температуры на забое от осевой нагрузки при различных температурах очистного воздуха имеет зависимость, близкую к линейной, которая представлена на **рис. 5**.

Бурение с частотой вращения бурильной колонны 200 мин^{-1} , осевой нагрузкой 10 кН и начальной температурой очистного воздуха 40 °C соответствовало температуре на забое скважины 348 °C . Снижение температуры очистного воздуха до -12 °C при тех же параметрах бурения привело к уменьшению температуры на забое на 54 °C .

Результаты экспериментальных испытаний подтверждают возможность применения охлажденного до отрицательных температур воздуха для снижения температуры на забое скважины. При бурении скважин с очисткой забоя воздухом низкие температуры на забое способствуют улучшению работы породоразрушающего инструмента, что ведет к ускорению темпов проходки.

Механическая скорость проходки скважины в первую очередь зависит от режимных параметров бурения, вида и объема очистного агента, однако при бурении с очисткой забоя воздухом

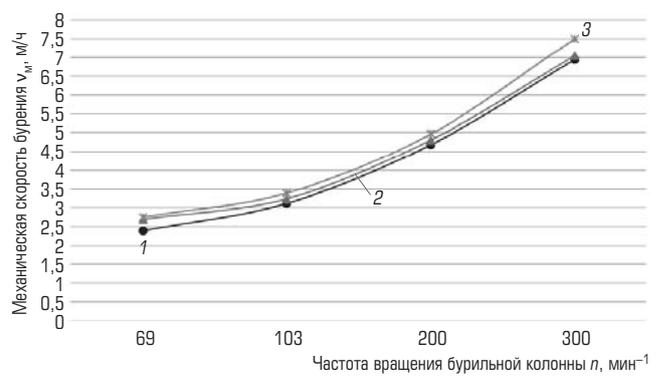


Рис. 6. Зависимость изменения механической скорости бурения от частоты вращения бурильной колонны n при осевой нагрузке 10 кН и различных температурах очистного воздуха $t_{охл}$:
1, 2, 3 – $t_{охл}$ соответственно 40; -8 и -12 °C

охлаждение бурового снаряда оказывает существенное влияние на величину скорости проходки. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований (**рис. 6**).

Зависимость изменения механической скорости проходки от частоты вращения бурильной колонны показывает, что при начальной температуре очистного воздуха 40 °C , осевой нагрузке 10 кН и частоте вращения бурильной колонны 69 мин^{-1} механическая скорость проходки составляет 2,6 м/ч. С повышением частоты вращения бурильной колонны наблюдается увеличение механической скорости. При частоте вращения 300 мин^{-1} она составляет 6,8 м/ч. Применение охлажденного воздуха для очистки забоя с температурой -12 °C в аналогичных условиях бурения приводит к повышению механической скорости проходки. При частоте вращения бурильной колонны 69 мин^{-1} механическая скорость проходки составляет уже 2,76 м/ч, а при частоте вращения 300 мин^{-1} достигает 7,6 м/ч.

Таким образом, в зависимости от режимов бурения скорость проходки за счет применения охлажденного до отрицательных температур очистного воздуха увеличивается в среднем на 6–7 %. Кроме того, низкие температуры на забое скважины способствуют повышению износостойкости породоразрушающего инструмента за счет предотвращения деформации матриц и разрушения алмазов.

Заключение

Практическими исследованиями доказано, что разработанная конструкция бурового снаряда с вихревым охладителем является работоспособной и эффективной. Ее применение позволяет снизить температуру породоразрушающего инструмента в среднем на $50-60 \text{ °C}$ и увеличить механическую скорость проходки.

Внедрение предлагаемой конструкции бурового снаряда с вихревым охладителем при проведении работ в Центральной геологоразведочной партии ГРЗ Навоийского горно-металлургического комбината обеспечило низкие температуры продувочного воздуха на забое скважины, что, в свою очередь, способствовало повышению эффективности бурения и механической скорости проходки.

Библиографический список

См. англ. блок. **ГЖ**

Improvement of rock-cutting tool efficiency in drilling with air purging using vortex tube

Information about authors

R. U. Dzhuraev¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, strong0185@mail.ru

M. V. Merkulov², Professor, Doctor of Engineering Sciences

V. A. Kosyanov², Professor, Doctor of Engineering Sciences

A. M. Limitovsky², Professor, Doctor of Engineering Sciences

¹Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan

²Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Abstract

The practice of drilling has proven that the use of compressed air as a cleaning agent provides a significant increase in ROP (rate of penetration) and reduces the time spent on eliminating geological complications, which sharply increases the productivity and economy of drilling operations. However, air has a low heat capacity compared to liquid flushing solutions. This affects the operation of rock cutting tools through high contact temperatures with irreversible consequences such as deformation of matrices, destruction of diamonds, grinding, reduction of diamond hardness and tool burns. The current geological conditions of drilling require improvement of the technology and enhancement of drilling performance via engineering of new and highly effective drilling tools. The introduction of new drilling tools having high durability and increased penetration rate improves performance of drilling rigs. The best results are obtained with a vortex tube placed directly at the well bottom.

This article discusses the possibility of normalizing and regulating the temperature regime of the rock-cutting tool due to forced cooling of the cleaning air to negative temperatures at the bottom hole. A new design of the drilling assembly with air purging is developed. The pilot tests of the designed drilling assembly are carried out. The tests proved efficiency and serviceability of the drilling assembly design with vortex cooler. The rock-drilling tool temperature is decreased by 50–60 °C and the drilling penetration rate is increased.

Keywords: air purging, drilling, Rank effect, well, vortex tube, compressor, drill string, flushing fluid, bottom hole, temperature mode.

References

1. Dzhuraev R. U., Khaydarova M. E. Features of geological exploration drilling and the temperature impact on drilling efficiency with air purging. *Molodoy uchenyi*. 2016. No. 14(118). pp. 137–139.
2. Gorshkov L. K., Gorelikov V. G. Temperature conditions of diamond drilling. Moscow : Nedra, 1992. 172 p.
3. Beshenkov P. S., Polushin N. I., Gkhorbani S., Sorokin E. N. Stress distribution analysis of PDC drill bits by computer modeling. *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. pp. 25–28. DOI: 10.17580/em.2017.02.06
4. Sklyanov V. I., Eremenko V. A., Kondratenko A. S., Timonin V. V. Analysis of gearing-up devices for high-speed diamond bit drilling of long exploration holes. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 25–28. DOI: 10.17580/em.2018.02.07
5. Soares C., Daigle H., Gray K. Evaluation of PDC bit ROP models and the effect of rock strength on model coefficients. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 34. pp. 1225–1236.
6. Kudryashov B. B., Kirsanov A. I. Air-aided exploration drilling. Moscow : Nedra, 1990. 263 p.
7. Kudryashov B. B., Chistyakov V. K., Litvinenko V. S. Drilling under conditions of change of physical state of rocks. Leningrad : Nedra, 1991. 295 p.
8. Kudryashov B. B., Yakovlev A. M. Drilling in complicated conditions : Teaching aid. Moscow : Nedra, 1987. 268 p.
9. Dzhuraev R. U., Merkulov M. V. Normalization of thermal conditions in drilling with air purging. Navoiy : Izdatelstvo imeni Navoi, 2016. 128 p.
10. Dzhuraev R. U., Merkulov M. V. Applicability of vortex tubes in geological exploration drilling. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. 2013. No. 3. pp. 76–78.
11. Dzhuraev R. U., Merkulov M. V. The results of experimental investigations the vortex tube applied to the drilling of exploration wells. *G/AB*. 2015. No. 4. pp. 349–352.
12. Merkulov A. P. Vortex effect and applications in engineering. Moscow : Mashinostroenie, 1969. 183 p.
13. Talalay P. G. Thermal Ice Drilling Technology. Singapore : Springer, 2020. 278 p.
14. Lyons W. C. Working Guide to Drilling Equipment and Operations. Amsterdam : Elsevier, 2010. 352 p.
15. Mitchell R. F., Miska S. Z. Fundamentals of Drilling Engineering. Richardson : Society of Petroleum Engineers, 2011. 710 p.
16. Bridges S., Robinson L. A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing. Cambridge : Gulf Professional Publishing, 2020. 622 p.
17. Caenn R., Darley H. C. H., Gray G. R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 7th ed. Cambridge : Gulf Professional Publishing, 2017. 748 p.

УДК 622.271.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАНАТНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ

К. Ю. АНИСТРАТОВ¹, главный научный сотрудник, д-р техн. наук

С. В. ЛУКИЧЁВ¹, директор, д-р техн. наук, s.lukichev@ksc.ru

А. Б. ИСАЙЧЕНКОВ², руководитель проектов, канд. техн. наук

¹Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

²АО «СУЭК», Москва, Россия

Введение

ООО «ИЗ КАРТЭКС им. П. Г. Коробкова», входящее в группу промышленных активов ГПБ (АО) под управлением ООО УК «УЗТМ-КАРТЭКС», является одним из двух производителей карьерных экскаваторов в России. Его продуктовая линейка включает экскаваторы с ковшом вместимостью 10–35 м³, полезной весовой нагрузкой до 63 т и традиционным для завода канатным напором. В общей сложности за период работы завода (1958–2019 гг.) выпущено 3913 экскаваторов. В настоящее время на карьерах России и других стран СНГ эксплуатируются более 1200 ед. техники со сроком службы до 30 лет.

Экскаватор ЭКГ-12К был разработан для замены машины ЭКГ-10 в парках горных предприятий. Он имеет высокую степень унификации с экскаваторами ЭКГ-10 и ЭКГ-8И, успешно

Выполнено обоснование области применения различных типов карьерных канатных и гидравлических экскаваторов. Приведена методика оценки эффективности использования карьерной техники по удельным накопленным затратам на владение в течение срока эксплуатации машин. Представлены технико-экономические расчеты и фактические данные применения карьерных экскаваторов.

Ключевые слова: карьерные канатные и гидравлические экскаваторы, эффективность использования, условные накопленные затраты, технико-экономические расчеты.

DOI: 10.17580/gzh.2020.12.17

зареккомендовавшими себя в процессе длительной эксплуатации на крупнейших горнодобывающих предприятиях нашей страны и мира.

В связи с широким распространением гидравлических экскаваторов остро встает вопрос о конкурентоспособности канатных машин и условиях их эффективного применения. Для ответа на этот вопрос в статье представлены результаты сравнительного анализа экономических показателей эксплуатации канатных и гидравлических экскаваторов с ковшом вместимостью 11–12 м³, в основу которого положены фактические данные об их использовании на горнодобывающих предприятиях России.