

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ БЕЗЛЕЗВИЙНОГО БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМ ЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Алиева Л., Жуков И.А.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: бурение, удар, безлезвийный буровой инструмент, штыревая буровая коронка, разрушение горной породы.

Аннотация. При механическом способе бурения горных пород средней и высокой крепости разрушение осуществляется с применением бурового инструмента, оснащенного твердосплавными вставками безлезвийного типа. Современные тенденции развития бурильных машин, связанные с нарастающими объемами разрушения породы, требованиями экологичности и безопасности, обуславливают несомненную актуальность исследований, направленных на поиск и обоснование рациональных конструктивных параметров породоразрушающего инструмента. Настоящая статья содержит перечень известных запатентованных буровых коронок безлезвийного (штыревого) типа. Дается краткое описание каждого из найденных технических решений с указанием их отличительных особенностей и уникальностей. На основе результатов критического анализа конструкций буровых коронок ставятся новые для науки и практики задачи исследований, выполнение которых позволит получить новые научные знания в области применения безлезвийного бурового инструмента в машинах ударного действия, предназначенных для разрушения горной породы.

ANALYSIS OF THE DESIGNS OF A BLADE-LESS DRILLING TOOL AND FORMULATION OF PROBLEMS OF ITS IMPROVEMENT

Aliева L., Zhukov I.A.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: drilling, impact, bladed drilling tool, pin drill bit, rock destruction.

Abstract. With the mechanical method of drilling rocks of medium and high strength, the destruction is carried out using a drilling tool equipped with carbide inserts of a blunt type. Modern trends in the development of drilling machines associated with the increasing volumes of rock destruction, environmental friendliness and safety requirements, determine the undoubted relevance of research aimed at finding and substantiating rational design parameters of a rock-breaking tool. This article contains a list of well-known patented drill bits of the blade-free (pin) type. A brief description of each of the found technical solutions is given, indicating their distinctive features and uniqueness. Based on the results of a critical analysis of drill bit designs, new research tasks are being set for science and practice, the implementation of which will allow obtaining new scientific knowledge in the field of using a blade-free drilling tool in impact machines designed to destroy rock.

Введение

Работы, связанные с разрушением и транспортировкой больших объемов горных пород, являются неотъемлемой составляющей добычи твердых полезных ископаемых [1-4]. В настоящее время одним из наиболее широко распространенных в практике способов разрушения и отделения массивов горных пород является механический, основанный на прямом воздействии буровым инструментом на разрушаемый объект. Основными способами бурения горных пород высокой и средней крепости являются ударный, ударно-поворотный и вращательно-ударный [5-8]. С этой целью проектируются и создаются разнообразные по структуре и технологическому назначению машины и механизмы [9-13], однако возможности бурения ударными воздействиями использованы не полностью, до сих пор не определены оптимальные конструктивные параметры породоразрушающего инструмента. Для бурения крепких и средней крепости горных пород применяют штыревой – безлезвийный инструмент [14-17], представленный широким многообразием конструкций (рис. 1), отличающихся типоразмером, применяемой машиной и областью назначения. В связи с этим наряду с изысканием и разработкой новых способов бурения необходимо совершенствовать буровой

инструмент с целью максимального использования мощности машин и, следовательно, снижения энергоемкости и повышения производительности буровых работ. Исследованию процессов и режимов разрушения горных пород ударом [18-21], а также разработке конструкций бурильных машин и их элементов посвящено большое количество работ [22-25], однако, несмотря на этот факт, у исследователей и производителей нет общего мнения по ряду вопросов, в том числе связанных с обоснованием рациональных и оптимальных конструктивных параметров бурового безлезвийного инструмента.

История применения бурения ударным или ударно-поворотным способами – это прежде всего история поиска конструкций породоразрушающего инструмента – безлезвийных или штыревых буровых коронок. В результате проведенного поиска накоплен оригинальный материал, требующий систематизации и обобщения.



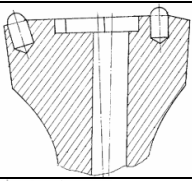
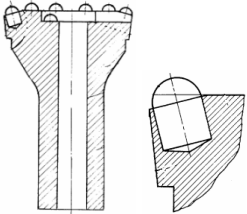
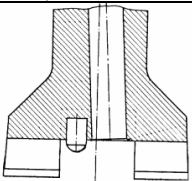
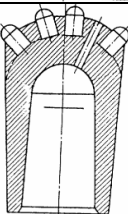
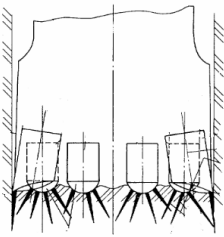
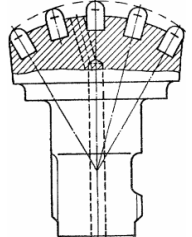
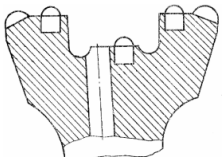
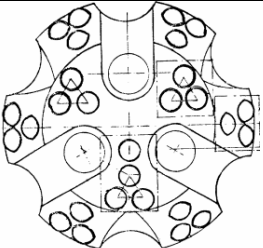
Рис. 1. Буровой инструмент безлезвийного типа

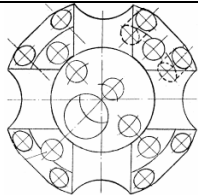
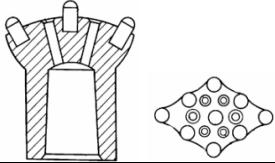
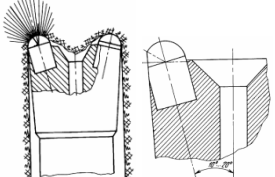
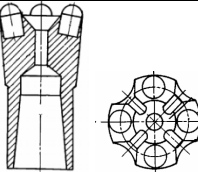
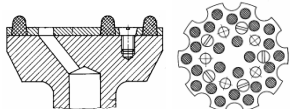
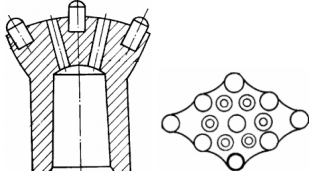
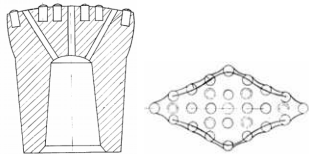
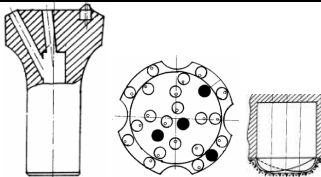
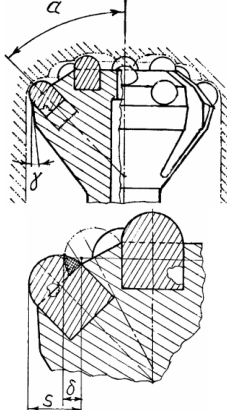
Анализ известных технических решений

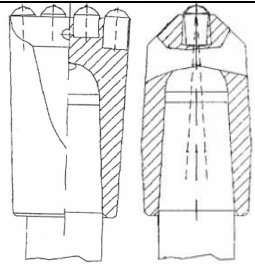
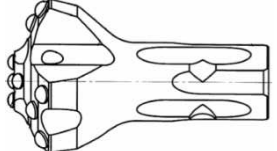
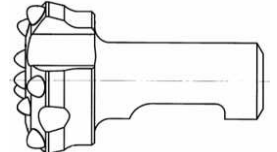
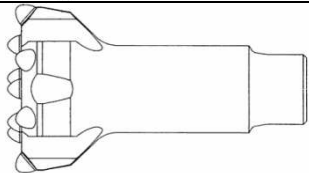
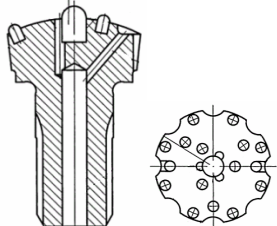
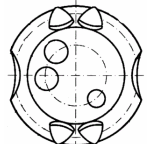
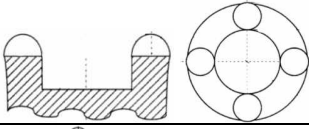
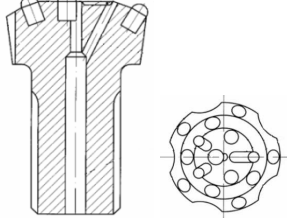
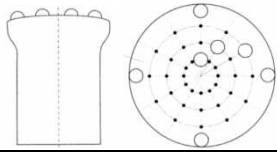
Типовая конструкция выпускаемых сегодня серийно безлезвийных буровых коронок состоит из корпуса, рабочая часть которого армирована твердосплавными вставками – инденторами. Для удаления разрушенных частиц породы в корпусе выполнены шламоотводящие пазы и каналы. Основными параметрами, характеризующими конструкцию коронки, являются диаметр рабочей части, диаметр и форма инденторов, их количество и схема расположения. Изменяя эти параметры, можно создать практически неограниченное число вариантов безлезвийного бурового инструмента. При этом, необходимо отметить, что поиск и обоснование оптимальных параметров коронок, соответствующих современным тенденциям повышения производительности буровых работ, продолжается непрерывно. Обратимся к некоторым результатам патентного поиска конструкций безлезвийного породоразрушающего инструмента (табл. 1) и анализу подходов к их созданию с целью отыскания общих принципов и методик совершенствования, связанных с обоснованием рациональных или оптимальных параметров конструктивных элементов.

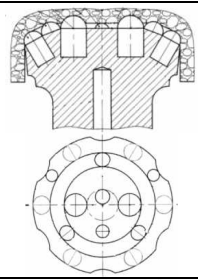
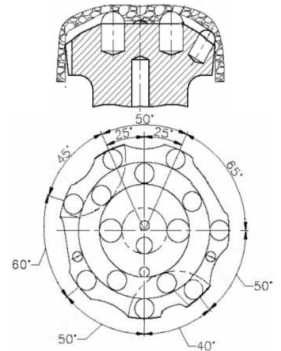
Табл. 1. Избранные результаты патентного поиска

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
1	Буровая коронка, №276858	Кожевников Л.П., Белагин Л.В., Авдонин Ю.Ф., Глазков А.П., Моржаретто А.А., Зарубин М.С., Мхоткин М.В., Клочко Н.А.	08.05.1969; 22.08.1970	

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
2	Коронка для ударно-вращательного бурения, №1209821	Алферов В.А., Костин А.Ф., Курдюков А.С., Плеханов И.Д.	03.08.1984; 07.02.1986	
3	Коронка для ударно-вращательного бурения, №1266954	Рогач М.С., Курдюков А.С., Плеханов И.Д.	06.03.1985; 30.10.1986	
4	Буровая коронка для ударно-вращательного бурения, №1348489	Резник Л.А., Рогач М.С., Курдюков А.С., Плеханов И.Д.	28.03.1986; 30.10.1987	
5	Буровая коронка, №1355685	Рудерфер В.И., Медовый Ю.А., Гопен А.М., Шарапов В.И., Прядко Ю.А., Гудимов С.Н.	29.12.1984; 31.11.1987	
6	Буровая коронка, №1404631	Новиков Н.В., Линенко-Мельников Ю.П., Свешников И.А., Арцимович Г.В., Заболотный С.Д., Смекаленков С.В., Аптов Э.Г., Медовый Ю.А., Карасик И.Л., Гиренко В.Н., Третьяченко А.Н.	16.04.1985; 23.06.1988	
7	Долото для ударно-вращательного бурения, №1652503	Беляев Н.А., Гаун В.А., Зарубин М.С.	29.03.1988; 30.05.1991	
8	Буровая коронка для ударно-вращательного бурения, №1696667	Курдюков А.С., Плеханов И.Д., Глазков В.В., Костин А.Ф., Якимов В.П., Дайбов С.В., Галицков Г.А., Астахов Б.В.	19.06.1989; 07.12.1991	
9	Буровая коронка, №1789645	Липин А.А., Костин Ю.С., Федоров В.В.	24.01.1991; 23.01.1993	

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
10	Долото для ударно-вращательного бурения, №1803517	Минеров Г.М., Галицков Г.А., Дайбов С.В., Авдонин Ю.Ф.	06.03.1990; 23.03.1993	
11	Буровая коронка для ударного бурения, №2065022	Дворников Л.Т., Прядко Ю.А., Губанов Е.Ф.	12.08.1993; 10.08.1996	
12	Буровая коронка для перфораторного бурения, №2067151	Линенко-Мельников Ю.П.	15.09.1994; 27.09.1996	
13	Буровая коронка для ударно-поворотного бурения, №2077650	Линенко-Мельников Ю.П., Лисовский А.Ф.	12.05.1994; 20.04.1997	
14	Буровая коронка, №2080447	Дворников Л.Т., Куклин С.А.	09.04.1992; 27.05.1997	
15	Способ отделения строительного камня от массива, №2083840	Дворников Л.Т., Губанов Е.Ф.	30.12.1993; 10.07.1997	
16	Буровая коронка, №2105123	Дворников Л.Т., Губанов Е.Ф.	01.02.1996; 20.02.1998	
17	Буровая коронка, №2164283	Павлов Ю.А., Соломахин А.В., Воробьев В.Н., Блинков О.Г., Поланский Г.А., Козлов О.А.	24.02.1999; 20.03.2001	
18	Коронка для ударно-вращательного бурения, №19082	Дашин И.А., Постников В.И., Шевчук С.П., Горбатов В.П.	04.01.2001; 10.08.2001	

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
19	Безлезвийная буровая коронка, №2212511	Дворников Л.Т., Прокушенко С.И., Куклин С.А., Вечужанин Д.С., Полинцев Н.А.	06.12.2001; 20.09.2003	
20	Буровая коронка, №79609	Канцуров А.Н., Глазков В.В., Быков С.П., Фоминых А.В., Попов А.В., Сомов К.В.	19.09.2008; 10.01.2009	
21	Буровая коронка, №79925	Канцуров А.Н., Глазков В.В., Быков С.П., Попов А.В., Фоминых А.В., Сомов К.В.	19.09.2008; 20.01.2009	
22	Буровая коронка, №107268	Горбрых В.Г.	01.04.2011; 10.08.2011	
23	Буровая коронка, №2535314	Белоусов А.В., Тимонин В.В.	16.07.2013; 10.12.2014	
24	Буровая коронка штыревого типа, №169571	Реготунов А.С., Зарубин В.А.	08.11.2016; 23.03.2017	
25	Буровая коронка №2646637	Дворников Л.Т., Никитенко С.М., Жуков И.А., Корнеев В.А.	16.11.2016; 06.03.2018	
26	Буровая коронка №2649210	Тимонин В.В., Белоусов А.В.	24.01.2017; 30.03.2018	
27	Буровая коронка №2655455	Дворников Л.Т., Никитенко С.М., Жуков И.А., Корнеев В.А.	24.08.2017; 28.05.2018	

№	Название, номер патента или авторского свидетельства	Авторы	Даты приоритета; опубликования	Схема
28	Буровая коронка №2666386	Тимонин В.В., Белоусов А.В.	09.11.2017; 07.09.2018	
29	Буровая коронка, №2759137	Белоусов А.В., Примычкин А.Ю., Заболоцкая Н.Н.	06.04.2021; 09.11.2021	

Такое разнообразие конструктивных решений свидетельствует о весьма широком поиске методов совершенствования безлезвийного инструмента для бурения ударными воздействиями и о стремлении максимально расширить область применения этого бесспорно перспективного способа. Естественно, это выдвигает задачу поиска объективной методики оценки нововведений и отбора лучших решений.

Одной из первых в результатах патентного поиска представлена буровая коронка (№1, табл. 1) с твердосплавными вставками, имеющая вогнутую породоразрушающую полость, выполненную в форме усеченного конуса с углом между образующей и торцом коронки, равным 11-45°. При этом с целью равномерного распределения нагрузки по вставкам устанавливается условие, заключающееся в том, что на единицу площади количество периферийных вставок должно превышать количество вставок, расположенных в вогнутой части. Принятые конструктивные требования позволяют повысить производительность бурения и улучшить процесс очистки забоя скважины от разрушенной породы.

Следующей в результатах патентного поиска представлена буровая коронка для ударно-вращательного бурения (№2, табл. 1), рабочая часть которой содержит перья с размещенными в них твердосплавными вставками. При этом вставки посажены в отверстия, глубина которых больше высоты перьев, что позволяет снизить вибрацию и деформацию перьев в процессе бурения.

В очередной буровой коронке (№3, табл. 1) штыревые твердосплавные вставки закреплены на рабочей части таким образом, что по периферии вставки расположены под углом к продольной оси коронки на участке с конической поверхностью и уступом. Предложенный вариант исполнения коронки обеспечивает повышение скорости бурения и увеличение стойкости коронки за счет уменьшения изнашивания периферийности части ее корпуса.

Примечательной особенностью буровой коронки, приведенной под №4 в таблице 1, является то, что наряду с лезвийными режущими пластинами коронка оснащена твердосплавной вставкой, установленной в углубленной по отношению к торцу центральной части. Такое решение повышает эффективность удаления продуктов разрушения из скважины.

С целью повышения циклической прочности твердосплавных вставок и корпуса бурового инструмента была предложена конструкция буровой коронки (№5, табл. 1), отличающаяся тем, что концевая часть отверстия для соединения со штангой выполнена в форме полусферы и торцы инденторов также расположены на поверхности полусферы, эквидистантной полусфере отверстия. Описанный способ размещения вставок позволяет оптимально распределить ударные контактные напряжения в рабочей части коронки.

Особенность буровой коронки, показанной в таблице 1 под №6, заключается в ее оснащении не только цилиндросферическими вставками, но и цилиндрическими хвостовиками с рабочими частями, выполненными в виде выпуклой криволинейной поверхности вращения. При этом хвостовики расположены по периферии коронки, что позволяет при нанесении удара образовать кольцевую зону предразрушения, являющуюся продолжением стенок скважины. Такой способ воздействия на разрушаемую породу ведет к совместному образованию и развитию трещин от удара каждой вставкой, что позволяет направить всю подводимую энергию удара на разрушение, обеспечивая тем самым увеличение скорости бурения.

С целью повышения эффективности и надежности работы инструмента за счет обеспечения равнопрочности инденторов было предложено вылет твердосплавных вставок над рабочим торцом коронки увеличивать от периферии к центру, располагая их так, чтобы вершины лежали на сферической поверхности, радиус которой меньше радиуса сферы рабочего торца коронки (№7, табл. 1).

Буровая коронка, приведенная под №8 в таблице 1, имеет технический признак, схожий с буровым инструментом, показанным под №4, но отличающаяся тем, что все породоразрушающие элементы выполнены в виде цилиндросферических инденторов, причем периферийные вставки расположены под углом к торцу коронки. Применение такой коронки позволяет не только повысить скорость бурения, но и облегчить процесс удаления буровой мелочи из скважины.

Показанная под №9 в таблице 1 коронка, предназначенная для ударно-вращательного бурения, армирована группами твердосплавных вставок преимущественно из трех штук, расположенных в вершинах равностороннего треугольника с длиной сторон, определяемой в интервале от 1 до 1,3 от диаметра вставки. Применение такой схемы расположения инденторов позволяет за счет взаимного влияния полей напряжений от каждой вставки снизить энергоемкость разрушения породы.

Отличительной особенностью буровой коронки, приведенной в таблице 1 под №10, является тот факт, что периферийные вставки расположены попарно, причем оси этих вставок в каждой паре между собой параллельны, а следующий ряд и диаметр вставок задаются таким образом, чтобы обеспечить перекрытие неразрушенной части породы. Благодаря таким условиям стойкость коронки повышается на 10-15%.

Весьма уникальной является коронка (№11, табл. 1), запатентованная в 1996 году, выделяющаяся тем, что периферийные вставки расположены по геометрическим фигурам с прямолинейными сторонами типа ромб, треугольник. Инструмент такого типа обеспечивает возможность бурения шпуров некруглого поперечного сечения, создавая при этом концентрацию напряжений в острых углах поперечного сечения пробуренного шпура, облегчающую отделение блоков горных пород от массива. Продолжением работ авторского коллектива в поиске конструкций инструмента, позволяющего бурить некруглые шпуры, являются коронки, приведенные в таблице 1 под №№ 15 и 16.

Следующие изобретение (№12, табл. 1) демонстрирует буровую коронку с конической боковой поверхностью головной части с твердосплавными вставками, установленными по периферии под углом 10-20° к продольной оси коронки, причем на каждой из вставок выполнен участок, являющийся продолжением конической боковой поверхности коронки. Наличие конической поверхности и малая площадь зоны контакта коронки с породой снижают износ вставок и уменьшают вероятность заклинивания коронки.

Очередное изобретение (№13, табл. 1) основано на введении соотношения между диаметром коронки и диаметром инденторов. Исходя из условия обеспечения снижения расхода твердого сплава и уменьшения энергоемкости процесса разрушения, авторы устанавливают, что диаметр вставок должен быть в 3-4 раза меньше диаметра коронки. Кроме этого, в процессе бурения горной породы такой коронкой принимать участие в воздействии на породу будут не только инденторы, но и корпус коронки, что приведет к снижению переизмельчения разрушаемой породы.

Задачей изобретения коронки, показанной в таблице 1 под №14, является обеспечение возможности легкой замены изношенных твердосплавных вставок, повышение надежности и технологичности изготовления бурового инструмента. Достигается это, благодаря установке инденторов через сепаратор, жестко и достаточно просто закрепляемый на корпусе коронки.

В 2001 году была запатентована буровая коронка (№17, табл. 1), в которой применены твердосплавные вставки со смещенными вершинами рабочих участков. Причем в пределах кольцевой зоны разрушения вставки расположены поочередно с противоположной ориентацией вершин. По заявлению авторов такой способ армирования коронки позволяет повысить эффективность бурения.

Следующим оригинальным буровым инструментом (№18, табл. 1) является коронка с твердосплавными коронками, расположенными концентрическими рядами. Согласно полезной модели периферийные инденторы наклонены от геометрической оси коронки на угол 30-50°, а инденторы следующего ряда смещены так, чтобы перекрывать траекторию контуров периферийных вставок, причем ширина δ зоны перекрытия устанавливается в пределах от 1,5 до 0,45 от ширины S в радиальном направлении проекции рабочей части периферийной вставки в плоскости, перпендикулярной оси коронки. А оси вставок ряда, следующего за периферийным, наклонены к оси коронки под углом 0-30°. Применение такой коронки при ударно-вращательном бурении позволяет повысить ее ресурс за счет увеличения размеров корпуса в зоне установки периферийных инденторов, а также увеличить время их изнашивания.

Эффект от смещения вершин вставок также был применен при разработке коронки согласно патенту №2212511 (№19, табл. 1). В ней цилиндросферические вставки установлены под углом, равным углу конусности соединения коронки с буровой штангой, причем наклон выполнен противоположно направлению вращения инструмента. Наклон вставок обеспечивает разрушение породы как непосредственно под вставкой, так и путем скола, за счет появления тангенциальной составляющей ударного усилия.

В буровой коронке, показанной в таблице 1 под №20, реализован технический эффект, заключающийся в том, что рабочая часть коронки содержит выступающую центральную часть, которая при забуливании первой контактирует с породой. Похожим вариантом усовершенствования конструкции коронки является расположение инденторов на конических ступенях рабочей части коронки и разным углом конусности, выбираемым из условия подъема вершин вставок от периферии к центру коронки (№21, табл. 1). Такой способ размещения инденторов упрощает процесс забуливания, уменьшает отклонение скважины от необходимого направления, а также позволяет увеличить срок службы инструмента и скорость бурения. В следующем патенте (№22, табл. 1) представлена буровая коронка, периферийные вставки которой также расположены на конической поверхности. Причем установлено, что угол между осью вставки и торцом коронки должен быть в интервале 36-40°, что облегчает процесс забуливания и снижает нагрузку на инденторы.

С целью повышения эффективности бурения скважин в крепких горных породах была разработана коронка (№23, табл. 1), оснащенная цилиндросферическими вставками разного размера. Диаметр центральной вставки существенно преобладает над диаметрами остальных вставок. Причем в средней части между периферийными и центральным индентором добавлены дополнительные вставки, названные авторами врубными. В продолжение идеи совершенствования данной коронки авторами была предложена и запатентована новая

конструкция (№26, табл. 1), отличающаяся от предыдущей тем, что в ней центральный индентор смещен относительно центральной оси коронки.

По заявлению авторов полезной модели под №24 в таблице 1 интенсификация процесса бурения может быть достигнута при установке на инструменте инденторов с расстоянием между ними, равным 1,06 от диаметра индентора, а соседний ряд вставок размещается на расстоянии 1,02 от диаметра индентора.

С целью снижения энергоемкости процесса бурения и уменьшения трудоемкости при изготовлении буровой коронки было предложено новое техническое решение безлезвийного бурового инструмента (№25, табл. 1), заключающееся в выполнении на ударной поверхности корпуса буровой коронки концентрического углубления, глубина которого не менее величины рабочего выступа индентора, а диаметр – не менее двух диаметров индентора. При таких геометрических соотношениях не только упрощается конструкция коронки, но и устраняется переизмельчение разрушенной горной породы. Для достижения аналогичных целей авторами была предложена еще одна конструкция бурового инструмента (№27, табл. 1), в которой на ударной поверхности не являющиеся периферийными инденторы размещены на разных радиусах от центра ударной поверхности корпуса по лучам, проведенным из этого центра через заданный угол.

Предпоследней в результатах патентного поиска представлена буровая коронка (№28, табл. 1), в центральной части которой симметрично установлены два врубовых индентора, а перпендикулярно вблизи оси коронки им добавлена керновая вставка, при этом врубовые инденторы выступают выше остальных относительно торца коронки. Конструкция следующей коронки (№29, табл. 1) повторяет предыдущую с тем отличием, что все вставки, расположенные за пределами врубовых, устанавливаются неравномерно с изменением каждого очередного угла установки на 5°.

Стоит отметить, что в таблице 1 приведены только российские разработки.

Результаты анализа. Заключение

Анализ известных конструктивных исполнений буровых коронок, оснащенных безлезвийными твердосплавными вставками, позволил установить основные проблемы совершенствования инструмента такого типа, решение которых позволит повысить эффективность разрушения горных пород при бурении ударно-поворотным и ударным способами.

1. Выбор и обоснование геометрической формы рабочей поверхности коронки

Геометрия породоразрушающей части буровой коронки должна способствовать решению следующих проблем:

- упрощение процесса забуривания;
- снижение вероятности отклонения скважины от заданного направления;
- равномерное распределение ударной нагрузки по инденторам;
- повышение эффективности процесса очистки скважины от разрушенной породы.

Среди представленных результатов патентного поиска лишь некоторые изобретения создавались с целью нахождения рациональной геометрии рабочей части коронки. Нетрудно заметить, что в качестве решения поставленных проблем были предложены коронки содержащие центральный выступ, вогнутый и выпуклый профиль, трапециoidalную и полусферическую форму.

Логично предположить, что для упрощения забуривания и регулировки направления бурения коронка должна содержать ряд равномерно расположенных инденторов, выступающих в сравнении с остальными вставками. Очистка забоя скважины от шлама может быть упрощена за счет наличия в корпусе коронки «карманов» или вогнутых полостей. При этом в силу наличия шламоотводящих каналов и отверстий характер распределения нагрузки по инденторам с достаточной для практики степенью точности может быть установлен лишь при анализе напряженно-деформированного состояния коронки методом конечных элементов.

С учетом изложенного можно сделать предположение о том, что рабочий профиль коронки должен быть выполнен выпукло-вогнутым, а установление более детальных геометрических параметров и соотношений требует проведения как минимум вычислительных экспериментов.

2. Подбор и обоснование геометрической формы твердосплавных вставок

Эффективность и динамика процесса бурения во многом определяются формой и размерами инденторов бурового инструмента [26-29]. В представленных результатах патентного поиска большинство буровых коронок армированы твердосплавными вставками, рабочая поверхность которых представляет собой полусферу (рис. 1,а). Размеры таких вставок регламентированы ГОСТ 880-75 «Изделия твердосплавные для горного инструмента», в котором они означены как Г26. Среди буровых коронок, представленных сегодня на рынке горного инструмента, преобладающая часть изделий содержит инденторы полубаллистической (Ballistic) формы (рис. 1,б).



Рис. 2. Наиболее распространенные типы инденторов

Остальные типы инденторов, приведенные на рисунке 2, имеют не столь широкое распространение в сравнении с двумя первыми. Однако предварительные результаты патентного поиска различных форм инденторов позволяют утверждать, что задача отыскания оптимальной геометрии индентора не теряет своей актуальности со временем. Причиной этому служит отсутствие научно обоснованных теоретических подходов к изучению влияния геометрии индентора на энергоемкость процесса разрушения горной породы. Отыскание рациональных форм инденторов позволит не только увеличить производительность буровых работ, но и уменьшить уровень напряжений в буровом инструменте.

3. Глубина посадки индентора в корпус буровой коронки

Установка твердосплавных вставок, как правило, осуществляется в натяг посредством запрессовки, или с применением операции пайки. Слишком малая глубина посадки индентора приведет к его вылету и потере в процессе бурения, а слишком большая – к соприкосновению корпуса коронки с забоем скважины, и, следовательно, к заклиниванию инструмента или его чрезмерному износу. Очевидно, что глубина посадки индентора должна определяться величиной внедрения инструмента за единичный удар. В работе [2] приводится дифференциальное уравнение для определения скорости внедрения инструмента в породу

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho a} \left[2 \cdot \sigma_{\text{умн}}(t) - \frac{F(h)}{S} \right], \quad (1)$$

где dh – перемещение коронки за время dt ; $\sigma_{\text{умн}}(t)$ – напряжение в ударном импульсе как функция от времени; $F(h)$ – сила сопротивления породы внедрению в нее инструмента как функция перемещения; S – площадь поперечного сечения буровой штанги; ρ – плотность материала штанги; a – скорость распространения импульса в материале штанги.

Решение уравнения (1) для ударных импульсов любой формы имеет вид

$$h = e^{-Pt} \frac{2}{\rho a} \int_0^t \sigma_{\text{умн}}(t) e^{Pt} dt, \quad (2)$$

где $P = \frac{F(h)}{S \rho a}$.

Из формулы (2) видно, что глубина внедрения является функцией, зависящей от ударного импульса. В связи с этим авторы работы [2] делают вывод о том, что определить функциональную связь между глубиной внедрения и энергией удара невозможно, т.к. при одном и том же количественном значении импульса силы при разной его форме энергия удара, идущая на разрушение, будет различной. Однако современные результаты исследований динамических процессов в ударных системах свидетельствуют о том, что зависимость «сила – внедрение» может быть установлена экспериментальным путем [30], и ее характер будет определяться крепостью разрушаемой горной породы, а ударный импульс может быть найден в численном виде для любых исходных параметров элементов ударной системы [31]. Благодаря этому, функциональная зависимость (2) вполне имеет разрешение численными методами. Подтверждение выдвигаемой гипотезы установления зависимости между глубиной посадки индентора и скоростью внедрения инструмента может быть достигнуто экспериментальным путем.

4. Установление оптимального расстояния между инденторами и подбор рациональной схемы размещения инденторов на корпусе буровой коронки

Ранними исследованиями [32] было установлено, что если два индентора установить на достаточно близком расстоянии относительно друг друга и внедрять их одновременно, то разрушение породы происходит с образованием лунки выкола с плоским дном. Обоснованием такого эффекта является суперпозиция полей напряжений породного массива в пространстве между вставками. Анализ литературных источников [5, 8, 9, 16 и др.] свидетельствует о том, что эта задача была предметом исследований различных ученых, в том числе и современных. Но нельзя не заметить, что однозначных сведений об оптимальном расстоянии между инденторами, обеспечивающим максимум объема разрушенной породы, так и нет. Среди приведенных в таблице 1 изобретений лишь под №№ 9 и 24 присутствуют коронки, в которых задается расстояние между двумя соседними инденторами, причем в обоих случаях это расстояние близко к 1 от диаметра вставки. Стоит отметить, что при таком расстоянии толщина стенки корпуса между вставками будет иметь весьма малую толщину – 0,3-2мм, что неизбежно приведет к повышению напряжений в корпусе коронки и к сложностям запрессовки инденторов. Однако в работе Л.И. Барона [32] приведены результаты экспериментального исследования при пошаговом вдавливании инденторов с изменением расстояния, в которых отмечено, что оптимальным является расстояние, равное $\approx 1,7$ от диаметра индентора. Противоречивые цифры, а также методика экспериментов, свидетельствуют о том, что вопрос нахождения оптимального расстояния между двумя соседними вставками остается открытым и требует безотлагательного решения.

Практический интерес с точки зрения рационального размещения твердосплавных вставок на ударном торце буровой коронки представляют теоретические и экспериментальные исследования процесса одновременного внедрения в горную породу группы инденторов – так называемый эффект симультанности (фр. *simul tane* – одновременный, от лат. *si mul* – одновременно). Рациональная схема расположения инденторов позволяет снизить энергоемкость разрушения за счет образования крупного скола в пространстве между инденторами. В представленном анализе известных патентов единственным изобретением, в котором описывается схема размещения инденторов, является коронка под №9 (табл. 1), оснащенная инденторами, расположенными по схеме равностороннего треугольника. Такая же схема размещения инденторов замечена в рекомендациях, приведенным по результатам диссертационных исследований Прядко Ю.А., Жуковым И.А., Тимониным В.В. Однако предварительные результаты вычислительных экспериментов по внедрению группы инденторов свидетельствуют о необходимости введения в рассмотрения четвертого индентора, образующего с тремя соседними схему типа «ромб». Предлагаемая схема обеспечивает возможность уйти от расположения соседних вставок на одинаковом расстоянии друг от друга без потерь в глубине внедрения инструмента и объеме разрушенной породы, что для некоторых конструкций безлезвийных коронок является совершенно необходимым.

Всё вышеизложенное позволяет сделать вывод, что решение поставленных проблем обеспечит развитие теоретических основ исследования безлезвийного бурового инструмента, позволит разработать научно-практические подходы к рациональному проектированию буровых коронок, а также найти новые технические решения, обеспечивающие повышение производительности работ, связанных с разрушением горных пород средней и высокой крепости.

Список литературы

1. Мавлютов М.Р. Разрушение горных пород при бурении скважин. – М.: Недра, 1978. – 215 с.
2. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
3. Нескормных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701.
4. Литвиненко В.С., Двойников М.В. Методика определения параметров режима бурения наклонно-прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – DOI: 10.31897/pmi.2020.1.105.
5. Реготунов А.С., Антонов В.А. Экспериментальное исследование режимов ударного бурения горных пород // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 61-69.
6. Опарин В.Н., Тимонин В.В., Карпов В.Н., Смоляницкий Б.Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №6. – С. 81-104. – DOI: 10.15372/FTPRPI20170609.
7. Нескормных В.В., Головченко А.Е. Экспериментальное исследование процесса разрушения горных пород внецентренными ударными импульсами при ударно-вращательном бурении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – №1. – С. 135-147. – DOI 10.18799/24131830/2020/1/2455.
8. Карпов В.Н., Петреев А.М. Метод определения рациональных режимов ударно-вращательного бурения скважин в прочных горных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – №3. – С. 96-109. – DOI 10.15372/FTPRPI20210310.
9. Смоляницкий Б.Н., Репин А.А., Данилов Б.Б. и др. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б.Ф. Симонов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. – 204с.
10. Павлов Е.В. Исследование конструкторско-технологических особенностей базовых деталей пневмоударников и породоразрушающего инструмента // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – №. 3. – С. 68-76.
11. Шадрина А.В., Саруев Л.А. Анализ и научное обобщение результатов исследований ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – №.8. – С. 120-136.
12. Юнгмейстер Д.А., Крупенский И., Лавренко С.А. Анализ вариантов модернизации станков шарошечного бурения с погружным пневмоударником // Записки Горного института. – 2018. – Т. 231. – С. 321-325. – DOI: 10.25515/PMI.2018.3.321.
13. Реготунов А.С. О влиянии некоторых факторов на величину показателя энергоемкости разрушения горных пород в процессе шарошечного бурения взрывных скважин // Проблемы недропользования. – 2020. – №3(26). – С. 41-51. – DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.041.
14. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 8. – С. 225-230. – DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230.
15. Караманиц Ф.И., Громадский А.С., Кузьменко Д.И. Создание и исследование новых коронок для бурения компенсационных шпуров и скважин в скальных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 2. – С. 175-184. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-175-184.
16. Liu S., Chang H., Li H., Cheng G. Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, vol. 91, pp. 18-28. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.11.006.
17. Kang H., Cho J.W., Jeong M.S., Cho Y.J., Lee S.K., Lee J.W. Evaluation of a Drill Bit Button Arrangement for Enhanced Drilling Efficiency // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 2015, no. 39, vol. 6, pp. 575-581. DOI: 10.3795/KSME-A.2015.39.6.575.
18. Perneder L., Detournay E., Downton G. Bit/rock interface laws in directional drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012, vol. 51, pp. 81-90. DOI:10.1016/j.ijrmms.2012.01.008.
19. Болобов В.И., Ле Т.Б. Закономерности разрушения материала ударника при повторяющихся единичных ударах // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 525-533. – DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525.

20. Губанов С.Г., Секретов М.В. Анализ форм зубьев рабочих органов буровых установок ударного типа // Евразийский Союз Ученых. – 2019. – №4-3(61). – С. 16-22. – DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.3.61.19.
21. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – №1. – С. 71-79. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.
22. Гилев А.В., Шигин А.О., Доронин С.В., Гилева Н.Н. Методы расчетов прочности при проектировании рабочих органов буровых станков // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 1. – С. 132-134.
23. Su O., Yarali O., Akcin N.A. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller // Rock Mech Rock Eng. 2013, vol. 46, pp. 1577-1587. DOI: 10.1007/s00603-012-0358-3.
24. Gorelikov V.G., Lykov Yu.V., Baatarkhuu G. Analytical and experimental study of the mechanisms of diamond bits interaction with rocks in the wellbore during sinking processes // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, no. 10, pp. 7012-7016.
25. Болобов В.И., Плащинский В.А. Влияние продолжительности удара на эффективность разрушения горных пород и пластического деформирования металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №3. – С. 78-96. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_78.
26. Куклин С.А. Оценка формы породоразрушающего инструмента // МашиноСтроение. – 2014. – №23. – С. 113-120.
27. Kwon K.B., Song C.H., Park J.Y., Oh J.Y., Lee J.W., Cho J.W. Evaluation of drilling efficiency by percussion testing of a drill bit with new button arrangement // International journal of precision engineering and manufacturing. 2014, vol. 15, pp. 1063-1068. DOI 10.1007/s12541-014-0437-3.
28. Kang H., Park J.Y., Cho J.W., Jang J.S., Kim K.W., Lee J.W. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018, vol. 232, iss. 16, pp. 2887-2898. DOI: 10.1177/0954406217726563.
29. Capik M., Yilmaz A.O. Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 139, p. 104633. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2021.104633.
30. Zhukov I.A., Dvornikov L.T., Nikitenko S.M. About creation of machines for destruction of rock with formation of apertures of various cross-section // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 124, no. 1, p. 012171. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012171.
31. Тимофеев Е.Г., Жуков И.А., Теплякова А.В. Комплекс программ для автоматизированного расчета геометрии ударных узлов машин // Программная инженерия. – 2021. – Т. 12, №8. – С. 404-412. – doi.org/10.17875/prin.12.404-412.
32. Барон Л.И., Веселов Г.М., Коняшин Ю.Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1962. – 219 с.

References

1. Mavlyutov M.R. Destruction of rocks when drilling wells. – М.: Nedra, 1978. – 215 p.
2. Ivanov K.I., Latyshev V.A., Andreev V.D. Drilling technique in the development of mineral deposits. – М.: Nedra, 1987. – 272 p.
3. Neskromnykh V.V., Popova M.S. Development of a methodology for managing the drilling process based on a comprehensive analysis of criteria // Journal of the Mining Institute. 2019, vol. 240. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701.
4. Litvinenko V.S., Dvoynikov M.V. Methodology for determining the parameters of the drilling mode of obliquely rectilinear sections of a well with screw downhole engines // Journal of the Mining Institute. 2020, Vol. 241. DOI: 10.31897/pmi.20.105
5. Regotunov A.S., Antonov V.A. Experimental study of shock drilling modes of rocks // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2015, no. 8, pp. 61-69.
6. Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N., Smolyanitsky B.N. Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary-percussion drilling technology improvement // Journal of Mining Science. 2017, vol. 53, no. 6, pp. 1043-1064. DOI: 10.1134/S1062739117063114.
7. Neskromnykh V.V., Golovchenko A.E. Experimental study of the process of destruction of rocks by off-center shock pulses during impact-rotational drilling // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020, vol. 331, no. 1, pp. 135-147. DOI: 10.18799/24131830/2020/1/2455.
8. Karpov V.N., Petreev A.M. Method for determining rational modes of impact-rotational drilling of wells in solid rocks // Physico-technical problems of mineral development. 2021, no. 3, pp. 96-109. DOI: 10.15372/FTPRPI20210310.
9. Smolyanitsky B.N., Repin A.A., Danilov B.B. Improving the efficiency and durability of pulse machines for the construction of extended wells in rock massifs / ed. by B.F. Simonov. – Novosibirsk: Publ. house of SB RAS, 2013. – 204 p.
10. Pavlov E.V. Research of design and technological features of basic parts of pneumatic hammers and rock-breaking tools // Bulletin of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology. 2013, no. 3, pp. 68-76.
11. Shadrina A.V., Saruev L. A. Analysis and scientific generalization of the results of studies of the impact-rotational method of drilling small-diameter wells from underground mining // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University.

- Georesource engineering. 2015, vol. 326, no. 8, pp. 120-136.
12. Yungmeister D.A., Krupensky I., Lavrenko S.A. Analysis of modernization options for roller drilling machines with a submersible pneumatic hammer // Journal of Mining Institute. 2018, vol. 231, pp. 321-325. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.321.
 13. Regotunov A.S. On the influence of some factors on the value of the energy intensity index of rock destruction in the process of ball drilling of blast wells // Problems of subsurface use. 2020, no. 3(26), pp. 41-51. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.041.
 14. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of a highly efficient rock-destroying tool // Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2017, no. 8, pp. 225-230. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230.
 15. Karamanits F.I., Gromadsky A.S., Kuzmenko D.I. Creation and the study of new crowns for drilling compensation holes and boreholes in rocks // Mining information and analytical Bulletin. 2018, no. 2, pp. 175-184. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-2-0-175-184.
 16. Liu S., Chang H., Li H., Cheng G. Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, vol. 91, pp. 18-28. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2016.11.006.
 17. Kang H., Cho J.W., Jeong M.S., Cho Y.J., Lee S.K., Lee J.W. Evaluation of a Drill Bit Button Arrangement for Enhanced Drilling Efficiency // Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A. 2015, no. 39, vol. 6, pp. 575-581. DOI: 10.3795/KSME-A.2015.39.6.575.
 18. Perneder L., Detournay E., Downton G. Bit/rock interface laws in directional drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2012, vol. 51, pp. 81-90. DOI:10.1016/j.ijrmms.2012.01.008.
 19. Bolobov V.I., Le T.B. Regularities of destruction of the drummer material with repeated single impacts // Journal of Mining Institute. 2018, vol. 233, pp. 525-533. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.525.
 20. Gubanov S.G., Sekretov M.V. Analysis of tooth shapes of working bodies of drilling rigs of impact type // Eurasian Union of Scientists. 2019, no. 4-3(61), pp. 16-22. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2019.3.61.19.
 21. Simonov P.S. Experimental study of rock crushing by a single blow // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2020, no. 1, pp. 71-79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.
 22. Gilev A.V., Shigin A.O., Doronin S.V., Gileva N.N. Methods of strength calculations in the design of working bodies of drilling rigs // Modern high-tech technologies. 2011, no. 1, pp. 132-134.
 23. Su O., Yarali O., Akcin N.A. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller // Rock Mech Rock Eng. 2013, vol. 46, pp. 1577-1587. DOI: 10.1007/s00603-012-0358-3.
 24. Gorelikov V.G., Lykov Yu.V., Baatarkhuu G. Analytical and experimental study of the mechanisms of diamond bits interaction with rocks in the wellbore during sinking processes // International Journal of Applied Engineering Research. 2016, vol. 11, no. 10, pp. 7012-7016.
 25. Bolobov V.I., Plashchinsky V.A. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 3, pp. 78-96. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_78.
 26. Kuklin S.A. Evaluation of the form of a rock-breaking tool // Mechanical engineering. 2014, no.23, pp. 113-120.
 27. Kwon K.B., Song C.H., Park J.Y., Oh J.Y., Lee J.W., Cho J.W. Evaluation of drilling efficiency by percussion testing of a drill bit with new button arrangement // International journal of precision engineering and manufacturing. 2014, vol. 15, pp. 1063-1068. DOI 10.1007/s12541-014-0437-3.
 28. Kang H., Park J.Y., Cho J.W., Jang J.S., Kim K.W., Lee J.W. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2018, vol. 232, iss. 16, pp. 2887-2898. DOI: 10.1177/0954406217726563.
 29. Capik M., Yilmaz A.O. Development models for the drill bit lifetime prediction and bit wear types // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021, vol. 139, p. 104633. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104633.
 30. Zhukov I.A., Dvornikov L.T., Nikitenko S.M. About creation of machines for destruction of rock with formation of apertures of various cross-section // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016, vol. 124, no. 1, p. 012171. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012171.
 31. Timofeev E.G., Zhukov I.A., Teplyakova A.V. A set of programs for automated calculation of geometry of impact units of machines // Software engineering. 2021, vol. 12, no. 8, pp. 404-412. doi.org/10.17875/prin.12.404-412.
 32. Baron L.I., Veselov G.M., Konyashin Yu.G. Experimental studies of the processes of destruction of rocks by impact. – M.: Publ. house of the Academy of Sciences of the USSR, 1962. – 219 p.

Сведения об авторах:

Алиева Лейла – аспирант	Alieva Leila – graduate student
Жуков Иван Алексеевич – д.т.н., доцент, профессор кафедры машиностроения	Zhukov Ivan Alekseevich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of Department of mechanical engineering
tmmiok@yandex.ru	

Получена 06.06.2022