

УДК 620.22+620.17

**ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ МАЛОГАБАРИТНЫХ  
ПОГРУЖНЫХ ПНЕВМОУДАРНИКОВ**

**А. А. Репин<sup>1</sup>, В. В. Тимонин<sup>1</sup>, С. Е. Алексеев<sup>1</sup>,  
Д. И. Кокоулин<sup>1</sup>, А. И. Попелюх<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела СО РАН им. Н. А. Чинакала, E-mail: repin@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
просп. К. Маркса, 20, 630092, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрены основные подходы к созданию малогабаритных пневмоударников. Обоснован путь увеличения их ударной мощности за счет повышения частоты ударов. Экспериментально определены характеристики пневмоударников с ударниками из стали и титана и приведены результаты их сравнения, свидетельствующие о возможности увеличения мощности за счет применения материалов малой плотности. Описана технология термообработки ударника, изготовленного из титанового сплава, и представлены результаты его лабораторных испытаний.

*Бурение, пневмоударник, мощность, рабочая площадь, термообработка, титановые сплавы, цементация*

Проходка скважин — важное звено технологического процесса работ в горном деле, строительстве и исследовательском бурении [1–4]. Ударный способ бурения, обладающий малой энергоемкостью разрушения породы, позволяет обеспечить низкие энергозатраты на бурение [5, 6] и высокую производительность при проходке пород средней и высокой крепости, а также дает возможность применения более легкого бурового оборудования [7, 8]. В середине прошлого века в России были разработаны и изготовлены первые образцы пневматических машин ударного действия, непосредственно воздействующих на забой буримой скважины, — погружные пневмоударники [9]. Они обеспечили наилучшую передачу энергии удара на забой, позволили увеличить скорость и глубину бурения [10]. В этих машинах сжатый воздух используется как энергоноситель и как очистной агент одновременно.

Размещение погружных пневмоударников в ограниченном пространстве скважины накладывает ограничение на диаметр их корпуса. Отсюда следует важная задача — достижение требуемых значений энергии удара и ударной мощности при упомянутом ограничении для разрушения породного массива и обеспечения высокой скорости проходки скважины [11].

Проведение работ по добыче полезных ископаемых определяет необходимость расширения диапазона диаметров буримых скважин в сторону их уменьшения [12]. Ввиду сужения пространства скважины проблема обеспечения высокой мощности малогабаритных погружных пневмоударников становится чрезвычайно актуальной. Поскольку энергия удара и максимально возможная частота ударов во многом обусловлены площадью ударника, находящейся под

давлением сжатого воздуха, при ограничениях на диаметр корпуса необходимо максимально эффективное использование площади его поперечного сечения для образования рабочих площадей ударника. Таким образом, резервом повышения мощности малогабаритных пневмоударников является конструктивное увеличение рабочей площади ударника для осуществления рабочего хода при работе в широком диапазоне давления энергоносителя (0.5 – 2.0 МПа).

Результаты анализа различных схем воздухораспределения показали, что в калибре до 76 мм наибольшими энергетическими параметрами, такими как энергия удара, скорость удара по инструменту, мощность ударного механизма, обладает беззолотниковая схема воздухораспределения [13]. В связи с этим в ИГД СО РАН разработана принципиальная схема погружного пневмоударника со сдвоенными камерами рабочего хода и промежуточной камерой холостого хода сетевого давления, которая в максимальной степени соответствует изложенным требованиям (рис. 1) [14–16]. К преимуществам рассматриваемой схемы можно отнести и то, что ударник не имеет внутренних каналов. Это обеспечивает его высокую прочность, позволяет создавать машины малого диаметра и использовать повышенное давление энергоносителя при их работе.

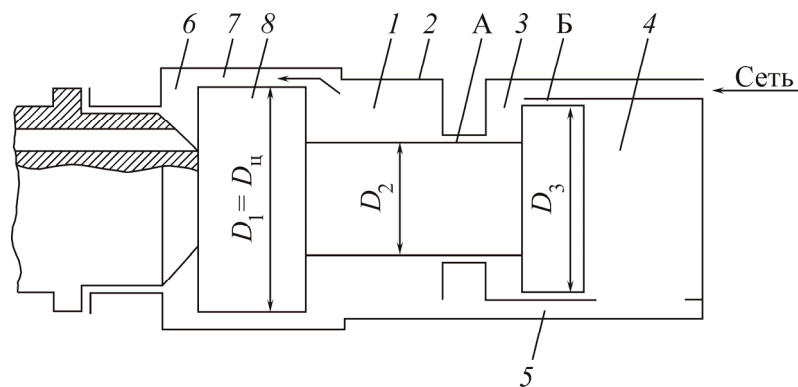


Рис. 1. Принципиальная схема погружного пневмоударника: 1 — кольцевая камера рабочего хода; 2 — цилиндр; 3 — камера холостого хода; 4 — торцевая камера рабочего хода; 5 — канал, соединяющий рабочие камеры; 6 — камера атмосферного давления; 7 — выхлопной канал; 8 — ударник;  $D_1 - D_3$  — диаметры ступеней ударника;  $D_{ц}$  — диаметр цилиндра; А и Б — зазоры в подвижных посадках

Камера рабочего хода состоит из управляемой кольцевой камеры 1 и управляемой торцевой камеры 4, соединенных каналом 5. Управление камерами осуществляется подачей воздуха в торцевую и выхлопом через кольцевую камеру. Между ними расположена камера холостого хода 3, имеющая постоянное сообщение с сетью сжатого воздуха. Выхлоп отработанного воздуха из рабочих камер осуществляется по каналу 7 в стенку цилиндра 2 в камеру атмосферного давления 6. Ударник 8 имеет три ступени с посадочными поверхностями диаметрами  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ . Диаметр большей ступени  $D_1$  равен диаметру полости цилиндра  $D_{ц}$ . Сжатый воздух из камеры холостого хода сетевого давления имеет возможность перетекать в камеры рабочего хода через зазоры в подвижных посадках А и Б, что требует более тщательного выбора посадок, при которых подвижность обеспечивается при минимальных зазорах. Для создания возвратно-поступательного движения ударника сжатый воздух периодически поступает в камеры рабочего хода и удаляется из них. В конце рабочего хода ударник наносит удар по торцу бурового инструмента.

Для получения высоких энергетических параметров большое значение имеют рабочие площади ударника со стороны камеры как рабочего, так и холостого хода. В данной схеме площадь ударника рабочего хода  $S_p$  складывается из рабочих площадей кольцевой и торцевой камер, а площадь ударника холостого хода  $S_x$  образована только камерой сетевого давления:

$$S_p = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2 + D_3^2), \quad S_x = \frac{\pi}{4}(D_3^2 - D_2^2). \quad (1)$$

Для обеспечения полноты использования площади поперечного сечения полости цилиндра должно соблюдаться условие

$$S_p - S_x = S_{\text{ц}} = \frac{\pi}{4}D_{\text{ц}}^2, \quad (2)$$

где  $S_{\text{ц}}$  — площадь поперечного сечения полости цилиндра.

В соответствии с формулой (1) при увеличении площади холостого хода ударника за счет уменьшения  $D_2$  увеличивается площадь ударника рабочего хода. Таким образом, представленная на рис. 1 схема пневмоударника позволяет наиболее полно использовать площадь поперечного сечения полости корпуса и увеличивать энергетические параметры машины.

Важной особенностью схемы разработанного погружного пневмоударника является то, что полость между ударником и коронкой всегда соединена с атмосферой и не требует дополнительной герметизации. Это позволяет минимизировать количество посадочных поверхностей на корпусе буровой коронки, снизить требования к точности и чистоте их изготовления, а следовательно, уменьшить затраты на производство бурового инструмента. Еще одно преимущество схемы заключается в возможности применения буксы-адаптера к буровым коронкам различного типа. Это обеспечивает установку как специальных, так и серийных буровых коронок разной конструкции, что расширяет возможности использования пневмоударников.

Мощность погружного пневмоударника определяется по формуле [13]:

$$N = Af = \frac{1}{2} \frac{1}{1+\beta} \frac{P_t^2 F^2 \tau_n}{m}, \quad (3)$$

где  $A$  — энергия единичного удара;  $f$  — частота ударов;  $P_t$  — результирующее среднее давление по времени в рабочей камере;  $F$  — рабочая площадь ударника;  $\tau_n$  — время прямого хода,  $m$  — масса ударника;  $\beta$  — отношение времени обратного хода к времени прямого.

Из формулы (3) следует, что увеличение мощности ударного механизма помимо максимального использования внутренней площади поперечного сечения пневмоударника и повышения давления энергоносителя возможно путем снижения массы ударника  $m$  за счет применения для его изготовления материалов с малой плотностью. В этом случае возрастает скорость соударения ударника с инструментом и частота ударов.

Для оценки перспективности пути увеличения мощности за счет снижения массы ударника спроектированы и изготовлены два экспериментальных образца малогабаритного пневмоударника АШ43. Пневмоударники конструктивно идентичны, но имеют различия в материале ударника. В пневмоударнике АШ43С ударник изготовлен из стали 12ХН3А с последующей его цементацией и закалкой с низким отпускком. В пневмоударнике АШ43Т для изготовления ударника использован титановый сплав марки ОТ4-1 (рис. 2). Механическая и термическая обработка титанового ударника выполнены на опытной базе кафедры материаловедения НГТУ. Проведенные исследования показали, что высокопрочные титановые сплавы являются одними из перспективных видов материалов, которые могут применяться для изготовления ответст-

венных деталей ударных механизмов, работающих в условиях многократного динамического нагружения. По сравнению со сталью титановые сплавы имеют более высокий коэффициент затухания акустических волн. Можно предполагать, что в ударных системах с титановыми деталями будет происходить быстрое затухание отраженных ударных импульсов, что положительно скажется на долговечности ударных машин. Сплав марки ОТ4-1 обладает высокой вязкостью разрушения ( $K_{1C} = 106 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ) и по этому показателю превосходит большинство высокопрочных титановых сплавов [17].



Рис. 2. Экспериментальный образец малогабаритного погружного пневмоударника АШ43Т (а) с ударником из сплава ОТ4-1 (б)

После изготовления экспериментальных образцов пневмоударника АШ43С и АШ43Т были осуществлены их доводка и эксперименты на лабораторном горизонтальном стенде для исследования пневматических машин ударного действия с записью диаграмм давлений в рабочих камерах (рис. 3).

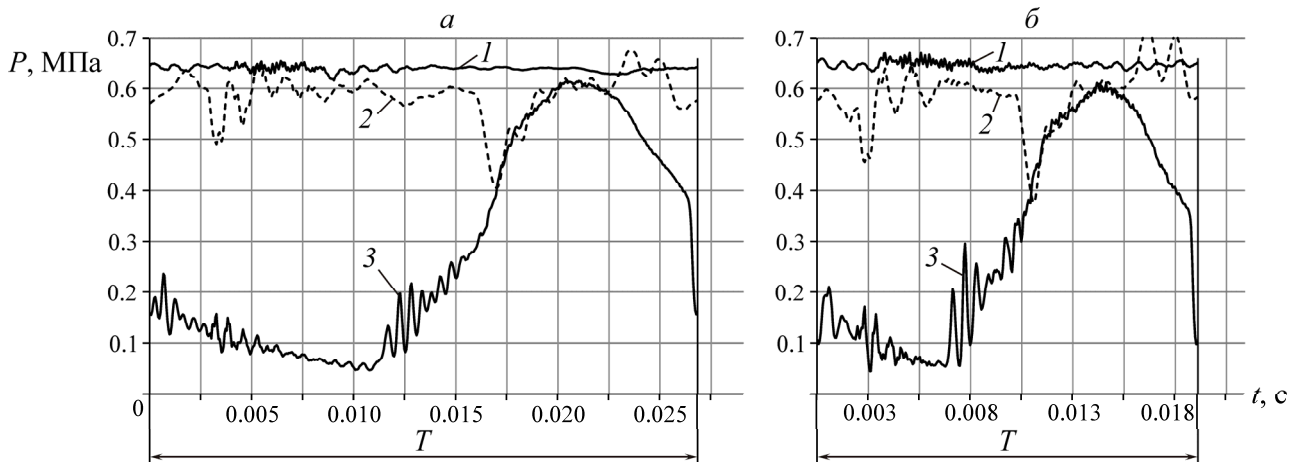


Рис. 3. Диаграммы давлений в камерах погружных пневмоударников: а — АШ43С; б — АШ43Т; 1 — давление в питающей магистрали; 2 — давление в камере холостого хода; 3 — давление в камере рабочего хода;  $T$  — время рабочего цикла

На диаграммах видно значительное различие времени рабочего цикла двух пневмоударников. Уменьшение времени рабочего цикла у пневмоударника с титановым ударником обусловлено увеличением частоты ударов и повышением ударной мощности.

Установлена зависимость ударной мощности пневмоударника от перетечек воздуха через зазоры А и Б в подвижных посадках ударника с сопрягаемыми поверхностями (см. рис. 1) [18]. В период холостого хода перед впуском сжатого воздуха в камеры рабочего хода перетечки отрицательно влияют на ударную мощность. При сокращении времени рабочего цикла уменьшается и время отрицательного воздействия перетечек, что повышает мощность пневмоударника.

В результате обработки диаграмм по известной методике [19, 20] определены основные энергетические параметры пневмоударников. На буровом станке СБП на испытательной площадке экспериментальной базы ИГД СО РАН “Зеленая горка” осуществлено пробное бурение пневмоударниками с целью определения механической скорости бурения. Результаты приведены в таблице. Для более наглядного представления специфики формирования ударной мощности малогабаритных пневмоударников в таблице представлены технические данные и показатели работы пневмоударника большого диаметра ПВ170, выполненного по той же принципиальной схеме. Данные о скорости бурения пневмоударника ПВ170 получены при промышленных испытаниях [7].

Результаты испытания пневмоударников

Параметр	АШ43С	АШ43Т	ПВ170
Диаметр скважины, мм	46	46	170
Наружный диаметр корпуса, мм	40	40	142
Рабочее давление, МПа	0.6	0.6	0.6
Материал ударника	Сталь 12ХН3А	Сплав титановый ОТ4-1	Сталь 40Х2Н2МА
Масса ударника, г	365	205	17100
Энергия удара, Дж	8.4	8.2	207
<b>Частота ударов, мин<sup>-1</sup></b>	<b>2136.7</b>	<b>3233.7</b>	<b>928</b>
Ударная мощность, Вт	299	444	3201
Масса без коронки, кг	3.13	2.97	54
Скорость бурения по граниту крепостью 140 МПа, мм/мин	70	90	150

При проектировании и изготовлении экспериментальных образцов пневмоударника с ударником малой плотности значительное внимание уделено вопросам обеспечения износостойкости пары трения “ударник – гильза”. Увеличение частоты ударов приводит к увеличению суммарного расстояния, проходимого ударником, а следовательно, к его повышенному износу. Сократить его можно рациональным выбором материала ответной детали — гильзы (например, из медных сплавов) или модифицированием поверхности ударника.

Наиболее эффективным методом упрочнения поверхности деталей ударных машин является химико-термическая обработка. В отличие от технологических процессов нанесения покрытий она обеспечивает высокие показатели адгезионной прочности поверхностных слоев и высокую надежность деталей в условиях воздействия на них динамической нагрузки. Для промышленного модифицирования поверхности титановых сплавов выбрана технология цементации, которая позволяет получать упрочненный диффузионный слой значительной толщины. Поверхность титанового сплава подвергали цементации по следующим режимам: нагрев образцов в закрытой емкости с твердым карбюризатором на основе древесного угля до температуры 900° с выдержкой при этой температуре в течение 3 ч и последующим охлаждением вместе с печью. Микроскопические и дюраметрические исследования показали, что в результате цементации на поверхности титанового сплава формируется упрочненный слой толщиной 350–400 мкм с максимальной микротвердостью вблизи поверхности 700–720 НВ.

Выбор материала гильзы основан на данных, полученных в результате предварительно проведенных исследований триботехнических свойств цементированного титанового сплава в паре трения со сталью и медным сплавом.

Триботехнические испытания осуществляли на машине трения ИИ 5018. Суть метода заключалась в изнашивании образца из исследуемого материала вращающимся диском (индентором) с периодическим определением объема лунки изнашивания. В качестве индентора использовали диски диаметром 50 и шириной 10 мм, изготовленные из закаленной стали 45 (HRC 50) или латуни марки Л63. Скорость вращения диска составляла 300 об/мин. В качестве эталона для сравнения триботехнических свойств модифицированного титанового сплава взяты образцы из стали 12ХН3А, широко применяемой для изготовления деталей ударных механизмов. Образцы из стали 12ХН3А подвергали цементации и закалке с отпуском до твердости HRC 40. По результатам испытаний построены зависимости объема лунки изнашивания от пути трения в различных материалах.

Результаты экспериментов показали, что цементация поверхности титанового сплава значительно увеличивает сопротивление изнашиванию (рис. 4). В паре трения со сталью износостойкость цементированного слоя на титановом сплаве сопоставима с износостойкостью закаленной стали 12ХН3А. Лучшими триботехническими свойствами обладает пара трения “цементированный титановый сплав – латунь”. В этом случае скорость изнашивания титанового сплава в 1.5 раза ниже, чем стали 12ХН3А, работающей в паре трения со сталью 45. Исследование топографии лунки изнашивания титанового сплава ОТ4-1 в исходном состоянии показало, что на поверхности формируется развитый рельеф с рисками глубиной до 7 мкм и локальными областями схватывания с материалом контртела (рис. 5).

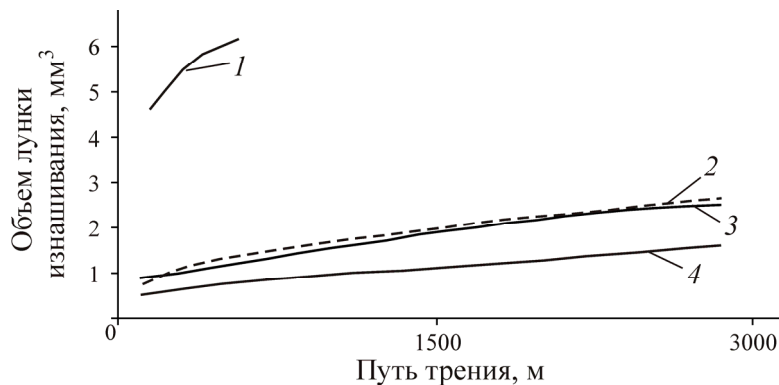


Рис. 4. Динамика роста лунки изнашивания в различных парах трения: 1 — “титановый сплав ОТ4-1 – сталь 45 (HRC 50)”; 2 — “сталь 12ХН3А (HRC 40) – сталь 45 (HRC 50)”; 3 — “титановый сплав ОТ4-1 (цементация) – сталь 45 (HRC 50)”; 4 — “титановый сплав ОТ4-1 (цементация) – латунь Л63”

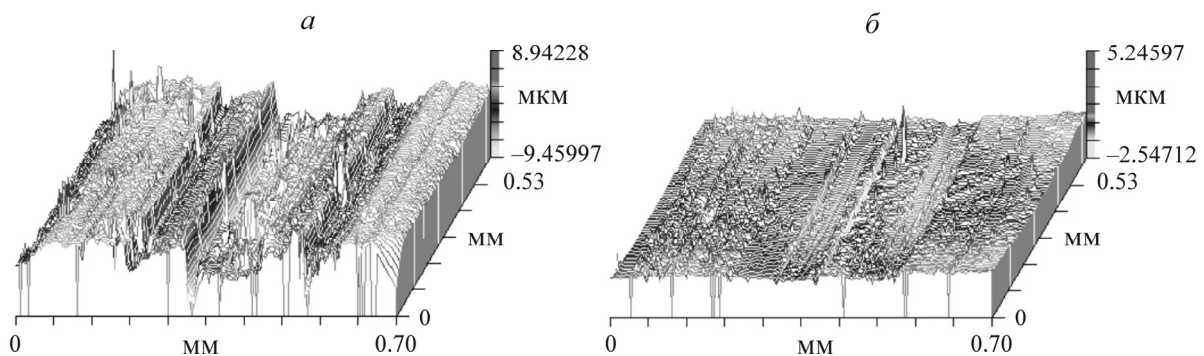


Рис. 5. Трехмерное изображение поверхности лунки изнашивания титанового сплава ОТ-4: а — без цементации; б — после цементации

Средняя шероховатость поверхности лунки изнашивания Ra, рассчитанная по результатам измерения в десяти точках, составляет 2.2 мкм. При аналогичном исследовании поверхности контртела (стального диска) на ней обнаружены значительные поверхностные повреждения, связанные с контактным налипанием и адгезионным привариванием частиц титанового сплава. Поверхность лунки изнашивания титанового сплава, подвергнутого цементации, имеет сглаженную форму со средней шероховатостью Ra=0.26. Значительных следов адгезионного изнашивания на поверхности стального диска не обнаружено.

Таким образом, можно предположить, что основной причиной повышения износостойкости титанового сплава после цементации является снижение его склонности к схватыванию.

#### ВЫВОДЫ

Эффективным способом повышения ударной мощности малогабаритных погружных пневмоударников является увеличение частоты ударов за счет уменьшения массы ударника, приходящейся на единицу его рабочей площади. При конструировании пневмоударников малого диаметра такой подход может быть реализован путем использования площади поперечного сечения полости корпуса для образования рабочих площадей ударника с одновременным применением для его изготовления высокопрочных материалов с малой плотностью.

Перспективными видами материалов для изготовления ударников служат высокопрочные титановые сплавы. Для обеспечения высоких показателей износостойкости пары трения “гильза–ударник” необходимо модифицирование поверхности титанового сплава.

Цементация поверхности титанового ударника — наилучший способ повышения показателей износостойкости в паре трения со сталью. В результате цементации на поверхности титанового сплава ОТ4-1 формируется упрочненный слой толщиной 350–400 мкм с максимальной микротвердостью вблизи поверхности 700–720 HV. В паре трения с гильзой, изготовленной из латуни Л63, износостойкость цементированного титанового сплава в 1.5 раза превосходит износостойкость закаленной стали 12ХН3А.

Результаты лабораторных испытаний пневмоударника АШ43 показали, что применение титановых сплавов для изготовления его ударников позволяет в 1.5 раза повысить ударную мощность и на 30 % увеличить скорость бурения по сравнению с пневмоударниками со стальными ударниками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Repin A. A, Alekseyev S. E. Air-percussion reamer: practical experience and future prospects, 21<sup>st</sup> Word Mining Congress & Expo 2008, Poland, Krakow-Katowice-Sosnowiec, 2008, Vol. 29. — 128 p.
2. Еременко В. А., Карпов В. Н., Тимонин В. В., Барнов Н. Г., Шахторин И. О. Основные направления развития бурового оборудования для системы разработки с этажным принудительным обрушением руды // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 49–64.
3. Петреев А. М., Примычкин А. Ю. Влияние типа системы воздухораспределения на энергетические показатели пневмоударного узла кольцевой ударной машины // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 117–123.
4. Алексеев С. Е., Тимонин В. В., Кокоулин Д. И., Шахторин И. О., Кубанычбек Б. Создание малогабаритного погружного пневмоударника для проходки исследовательских скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — № 2. — С. 187–193.
5. Тимонин В. В. Обоснование параметров породоразрушающего инструмента и гидравлической ударной машины для бурения скважин в породах средней и высокой крепости: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2009. — 22 с.

6. **Карпов В. Н., Тимонин В. В.** Методика оценки эффективности погружных ударных машин при бурении скважин на станках ударно-вращательного бурения в производственных условиях // Тез. докл. II Междунар. науч. шк. акад. К. Н. Трубецкого “Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр”. — М.: ИПКОН РАН, 2016. — С. 191–195.
7. **Репин А. А., Смоляницкий Б. Н., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Тимонин В. В., Карпов В. Н.** Погружные пневмоударники высокого давления для открытых горных работ // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 157–167.
8. **Тимонин В. В.** Погружные пневмоударники для подземных условий разработки // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 2(111). — С. 13–17.
9. **Иванов К. И., Глазунов В. Н., Надион М. Ф.** Современные методы бурения крепких пород. — М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по горному делу, 1963. — 192 с.
10. **Липин А. А., Тимонин В. В., Танайно А. С.** Современные погружные ударные машины для бурения скважин: каталог-справочник “Горная техника”. — СПб., 2006. — С. 116–123.
11. **Денисова Е. В., Коцурич А. И.** Геомеханическая модель взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом // ФТПРПИ. — 2013. — № 5. — С. 61–70.
12. **Шадрина А. В., Саруев Л. А.** Анализ и научное обобщение результатов исследований ударно-вращательного способа бурения скважин малого диаметра из подземных горных выработок [Электронный ресурс] // Изв. ТПУ. — 2015. — Т. 326. — № 8. — С. 120–136.
13. **Суднишников Б. В., Есин Н. Н., Тупицын К. К.** Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. — Новосибирск: Наука, 1985. — 134 с.
14. **Пат. 2090730 РФ.** Погружной пневматический ударный механизм / С. Е. Алексеев // Оpubл. в БИ. — 1997. — № 26. — 10 с.
15. **Пат. 2343266 РФ.** Погружной пневмоударник / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, Г. А. Пятнин // Оpubл. в БИ. — 2009. — № 1. — 6 с.
16. **П. м. 121854 РФ.** Погружной пневмоударник / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карпов // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 31. — 2 с.
17. **Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. — М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. — 520 с.
18. **Repin A. A., Alekseev S. E., Timonin V. V., Karpov V. N.** Analysis of the compressed air distribution in down-the-hole, Reports of the XXIII international scientific symposium “MINER'S WEEK – 2015”, 26-30 January, 2015. — P. 475–482.
19. **Есин Н. Н.** Методика исследования и доводки пневматических молотков / под ред. Н. А. Чинакала. — Новосибирск, 1965. — 76 с.
20. **Шахторин И. О., Тимонин В. В.** Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения // Электрон. сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием “Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых”. — Кемерово, 2015.

*Поступила в редакцию 21/IV 2016*