

УДК 620.22+620.17

**ОБОСНОВАНИЕ ТИПА И ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА  
ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОХОДКИ СКВАЖИН МАЛОГО ДИАМЕТРА**

**В. И. Клишин<sup>1</sup>, Д. И. Кокоулин<sup>2</sup>, Б. Кубанычбек<sup>2</sup>,  
С. Е. Алексеев<sup>2</sup>, И.О. Шахторин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт угля СО РАН, E-mail: vklishin@icc.kemsc.ru,  
Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: repin@misd.nsk.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Обоснована необходимость создания бурового оборудования вращательно-ударного действия, предназначенного для бурения скважин диаметром 40–60 мм на глубину до 50 м. Разработана конструкция и изготовлен буровой станок с погружным пневмоударником. Проведены аналитические и экспериментальные исследования по определению скорости бурения по породам различной крепости.

*Скважина, энергия удара, вращение, крепость пород, скорость бурения, погружной пневмоударник*

Новые технологии разработки угольных и рудных месторождений требуют проведения работ по созданию бурового оборудования для проходки скважин диаметром 45–50 мм на глубину до 50 м в крепких породах, предназначенных для осуществления работ как по дегазации угольных пластов, так и по разупрочнению тяжелых кровель с целью их управляемой посадки вслед за очистными комплексами [1, 2]. Существующие способы проходки скважин малого диаметра, использующие способ вращательного бурения при помощи отечественных буровых станков БЖ-45, анкероустановщиков СБР, а также ряда зарубежных анкероустановщиков, не отвечают современным требованиям как по производительности, так и по расходу бурового инструмента. Применение известных буровых установок, оснащенных перфораторами, ограничено глубиной бурения скважин 5–10 м из-за потерь энергии в буровом ставе. Таким образом, возникает необходимость в создании такого бурового оборудования, которое при малой массе и малых габаритах могло бы обеспечить проходку скважин диаметром 45–50 мм на глубину до 50 м в крепких породах [3].

Известно, что один из эффективных способов бурения скважин в крепких породах — способ вращательно-ударного бурения с применением погружных пневмоударников, позволяющих осуществлять динамическое воздействие на горный массив для его разрушения непосредственно

---

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.” по теме: Разработка экспериментальных конструкций комбинированного инструмента с применением сверхтвердых композиционных материалов для эффективного разрушения горных пород, Соглашение № 14.607.21.0028 от 05.06.2014 г.

у груди забоя [4, 5]. С использованием этого принципа бурения в ИГД СО РАН разработано буровое оборудование, включающее станок СБП (рис. 1) и модель погружного пневмоударника АШ-43 с наружным диаметром 37 мм, оснащенную резцом породным БИ 746 конструкции ООО “Буровой инструмент” (г. Новокузнецк) (рис. 2) [6, 7].



Рис. 1. Станок буровой СБП на испытательной площадке

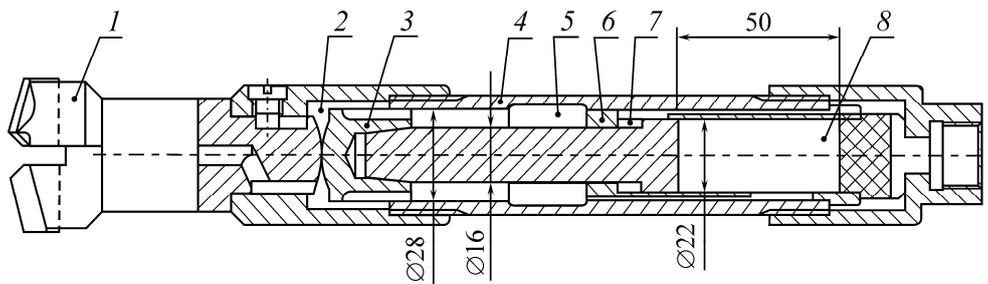


Рис. 2. Модель погружного пневмоударника АШ-43: 1 — корпус; 2 — ударник; 3 — воздухораспределительная гильза; 4 — кольцевая полость камеры рабочего хода; 5 — торцевая камера рабочего хода; 6 — камера холостого хода постоянного давления; 7 — расточка; 8 — буровая коронка

Аналитическое решение задачи проводилось с учетом того, что глубина внедрения бурового инструмента в горный массив за один оборот бурового става при вращательно ударном способе бурения складывается из углубления от действия статической и ударной нагрузок [9]: в первом случае от воздействия сил прижатия буровых коронок к забою скважины при помощи средств подачи бурового става на забой, во втором — от воздействия динамических нагрузок от погружного пневмоударника. Таким образом можно допустить, что общая скорость проходки скважин этим способом будет равна сумме скоростей, полученных вращательным и ударным воздействием на разрушаемые породы.

На основании результатов проведенных исследований [10] получены формулы по определению скорости бурения вращательным и ударно-поворотным способами, см/мин:

при вращательном способе бурения

$$V_{вр} = \frac{4mnp(1 + \beta) \cos \gamma}{d \cdot \sigma}, \quad (1)$$

при ударно-поворотном способе бурения

$$V_{уд} = \frac{2.85zT \sin \alpha / 2}{d^2 \cdot \sigma(f + \operatorname{tg} \alpha / 2)}, \quad (2)$$

где  $n$  — скорость вращения бурового става, об/мин;  $m$  — коэффициент формы лезвий бурового инструмента;  $p$  — осевое усилие на буровой став, кг;  $\gamma$  — угол установки лезвия относительно забоя, град;  $d$  — диаметр скважины, см;  $\alpha$  — угол заострения лезвия, град;  $\beta$  — коэффициент формы среза стружки при бурении;  $z$  — частота ударов ударника, уд/мин;  $T$  — энергия удара, кгм;  $f$  — коэффициент трения;  $\sigma$  — предел прочности горного массива, МПа.

Просуммировав (1) и (2), получим скорость бурения, соответствующую вращательно-ударному способу бурения, см/мин:

$$V_{\Sigma} = V_{\text{вр}} + V_{\text{уд}} = \frac{2}{d \cdot \sigma} \left[ nmp(1 + \beta) \cos \gamma + \frac{0.71zT \sin \alpha / 2}{d(f + \text{tg} \alpha / 2)} \right]. \quad (3)$$

В 2014 г. буровое оборудование испытано на натурном стенде, расположенном на территории экспериментальной базы ИГД СО РАН “Зеленая горка”. Цель испытаний — подтверждение результатов аналитических исследований по определению силовых параметров комплектующих, входящих в буровое оборудование, путем проведения экспериментальных работ на натурном стенде [8].

В процессе экспериментальных исследований, проводимых на натурном стенде [8] пневмоударником АШ-43 (см. рис. 2), бурились скважины диаметром 46 мм в породах различной крепости. При этом скорость бурения в зависимости от крепости пород изменялась от 0.18 до 0.67 м/мин. Испытаниями установлено, что скорость бурения, полученная в ходе проведения экспериментальных работ, превышает скорость, определенную в результате аналитического решения задачи. Это объясняется тем, что разрушение горного массива при вращательно-ударном способе бурения происходит как от динамического воздействия на него буровым инструментом, так и от вращательного резания. При этом в результате удара лезвия бурового инструмента не только внедряются в массив на соответствующую глубину, но и способствуют возникновению в нем микротрещин, нарушающих целостность структуры массива и уменьшающих его допускаемое напряжение на сжатие, что облегчает дальнейший процесс разрушения массива уже методом вращательного резания.

Для согласования значений скорости, полученных экспериментальным и аналитическим способами, в формулу (3) введен поправочный коэффициент  $k$ . Окончательный вариант формулы по определению скорости бурения скважин в крепких породах методом вращательно-ударного бурения с притупленными лезвиями имеет вид, см/мин:

$$V_{\Sigma} = \frac{2k}{d \cdot \sigma} \left[ nmp(1 + \beta) \cos \gamma + \frac{0.71zT \sin \alpha / 2}{d(f + \text{tg} \alpha / 2)} \right]. \quad (4)$$

Испытаниями установлено, что поправочный коэффициент  $k$  меняется в зависимости от величины предела прочности горного массива на сжатие. Однако эти изменения незначительны. Так, для пород крепостью  $\mu = 4$  ед.  $k = 1.14$ , а для пород крепостью  $\mu = 11$  ед.  $k = 1.1$ . Можно допустить, что в среднем поправочный коэффициент составит  $k = 1.12$ .

Из формулы (4) следует, что дальнейшее увеличение скорости бурения при использовании станка СБП возможно только за счет увеличения энергетических возможностей пневмоударника, так как усилие подачи бурового става на забой (по характеристике станка СБП) уже достигло своего максимального значения 7.5 кН. Поэтому было принято решение о необходимости создания нового пневмоударника с более высокими энергетическими показателями.

На основании рекомендаций, полученных в результате испытаний, спроектирован и изготовлен пневмоударник АШ-46А (рис. 3) с повышенными энергетическими возможностями за счет увеличения как диаметра ударника до 30 мм, так и объема рабочих камер. Проведенное

экспериментальное исследование пневмоударника с получением и обработкой диаграмм давления в рабочих камерах позволило определить его реальные параметры при номинальном давлении 0.6 МПа по известной методике [14]:

Диаметр буримой скважины, мм	46	Рабочее давление, МПа	0.6
Диаметр корпуса, мм	40	Энергия удара, Дж	9.7
Масса ударника, кг	0.365	Частота ударов, мин <sup>-1</sup>	2083

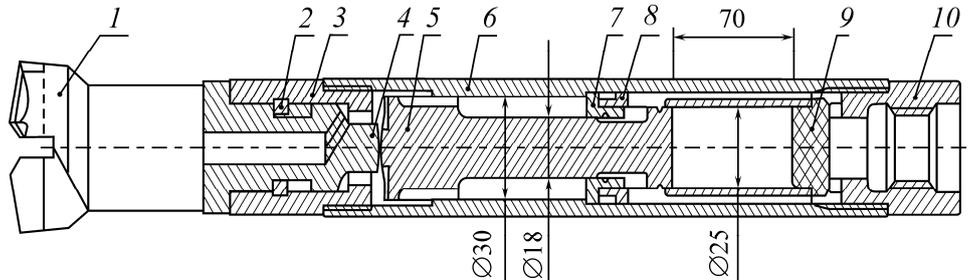


Рис. 3. Пневмоударник АШ-46А: 1 — буровая коронка; 2 — кольцо; 3 — гайка передняя; 4 — бусса; 5 — ударник; 6 — корпус; 7 — втулка разрезная; 8 — гильза; 9 — пробка; 10 — гайка задняя

Из диаграмм видно, что время рабочего цикла уменьшается в сравнении с пневмоударниками больших диаметров. Это объясняется тем, что в малогабаритных пневмоударниках под влиянием масштабного фактора уменьшение рабочей площади ударника происходит в меньшей степени, чем уменьшение его объема. Ввиду этого масса ударника, приходящаяся на единицу его рабочей площади, уменьшается, что приводит к более быстрому движению ударника и сокращению времени рабочего цикла при ограниченной прочностью материала деталей значении предударной скорости. В результате у малогабаритных пневмоударников требуемое значение ударной мощности целесообразно получать за счет изменения частоты ударов.

При сокращении времени рабочего цикла уменьшается и время выхлопа, выпуска и расширения сжатого воздуха. Однако достаточные площади проходных сечений питающей и выхлопной магистралей, что следует из диаграмм на рис. 4, позволяют обеспечить полный выхлоп из камеры рабочего хода и нормальное ее наполнение в период выпуска.

Поэтому для увеличения энергетических параметров перспективно использовать энергоноситель повышенного давления, позволяющий увеличивать как энергию, так и частоту ударов [13].

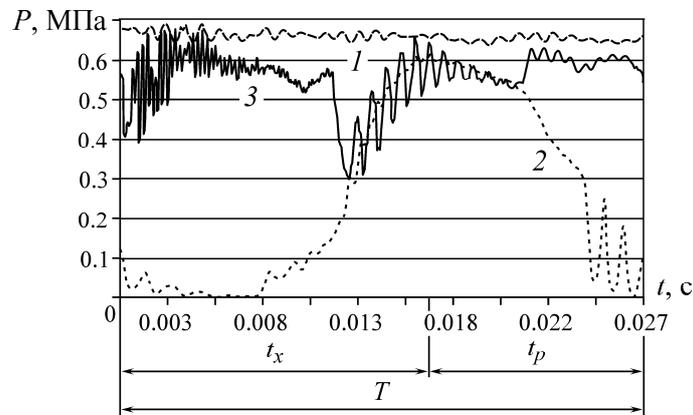


Рис. 4. Диаграммы давлений в камерах погружного пневмоударника АШ-43А: 1 — давление в питающей магистрали; 2 — давление в камере рабочего хода; 3 — давление в камере холостого хода;  $T$  — время рабочего цикла;  $t_x$ ,  $t_p$  — время холостого и рабочего хода соответственно

В ходе испытаний бурение скважин в породах различной крепости сопровождалось замерами давления в поршневых полостях пневмоцилиндров и в рабочих зонах пневмодвигателя вращателя бурового става. Кроме того, выполнялись замеры скорости вращения и подачи бурового става на забой (скорости бурения), а также частоты ударов. Все замеры проводились одновременно. Замеры давления и частоты ударов осуществлялись при помощи датчиков давления с последующей обработкой полученных диаграмм и записью результатов на компьютер.

При испытаниях использовалась измерительная аппаратура швейцарской фирмы Kistler instrumente AG и немецкой фирмы RF. Трехканальный измерительный тракт для регистрации давления в камерах пневмоударника, а также в магистралях домкратов подачи и в пневмодвигателе вращателя бурового станка состоял из первичных преобразователей (датчиков) давления и согласующих усилителей. Регистрация сигналов велась на компьютере с соответствующим программным обеспечением. Использовались пьезодатчики фирмы Kistler instrumente AG типа 701A со следующими характеристиками:

Диапазон измерения, бар	0 – 250
Чувствительность, пК/бар	~ 80
Линейность, %	≤ 0.4
Рабочий температурный диапазон, °С	– 150 ... + 240

В качестве усилителей применялись одноканальные усилители заряда фирмы Kistler instrumente AG типа 5011 с характеристиками:

Диапазон измерения, пК	± 10 ... 999000
Чувствительность датчика, пК/бар	0.01 ... 999
Точность, %	до ± 99.9 пК ≤ ± 3 до ± 100 пК ≤ ± 1
Ошибка частотной характеристики, %	– 150 ... + 240
	до 50 кГц – 1 ... + 2
	до 200 кГц – 30 ... + 3

В соответствии с технической документацией и рекомендациями фирмы, для присоединения датчиков использовались специальные кабели с низким уровнем помех. Перед измерением они проходили процедуру короткого замыкания для снятия накопившегося заряда. Длина соединительных кабелей ~ 10 м. Одновременно с измерением параметров давления проводилась регистрация момента удара с помощью акселерометра типа КД.

Результаты испытаний после обработки сводились в таблицу, в которой приведены обработанные данные замеров, полученные в процессе бурения горных пород крепостью от 4 до 14 ед. по шкале Протодяконова.

#### Результаты испытаний

Буримая порода	$\sigma$ , МПа	$n$ , об/мин	$V_{расч}$ , м/мин	$V_{эксп}$ , м/мин	$P_{эксп}$ , МПа	$K$ $V_{эксп}/V_{расч}$	$P_{расч}$ , МПа	$V_{расч}$ , м/мин	$V_{эксп}$ , м/мин
Аргиллит	40	160	0.67	0.81	0.4	1.21	0.6	0.96	1.16
Бетон	60	170	0.6	0.72	0.5	1.2	0.6	0.66	0.79
Песчаник	75	165	0.4	0.47	0.5	1.18	0.6	0.44	0.52
Мрамор	90	160	0.19	0.219	0.5	1.15	0.6	0.21	0.25
Известняк	110	150	0.118	0.13	0.4	1.1	0.6	0.17	0.18
Гранит	140	100	0.09	0.092	0.5	1.01	0.6	0.13	0.131

Подстановкой в формулу (1) силовых параметров пневмоударника АШ-46А определялась скорость бурения скважин диаметром 46 мм в породах различной крепости. В результате аналитических подсчетов и экспериментальных исследований получены зависимости скорости бурения скважин от предела прочности обуриваемой среды  $v = f(\sigma)$  (рис. 5а).

Проведенные исследования процессов бурения скважин станком СБП с пневмоударником АШ-46А подтвердили возможность применения формулы (4) для расчета скорости проходки скважины. При этом скорость бурения, полученная экспериментальным путем, превосходила скорость бурения, подсчитанную аналитическим способом на величину коэффициента  $k$ . Исследованиями установлено, что поправочный коэффициент  $k$  меняется в зависимости от изменения предела прочности горного массива на сжатие. Зависимость  $k = f(\sigma)$  представлена на рис 5б.

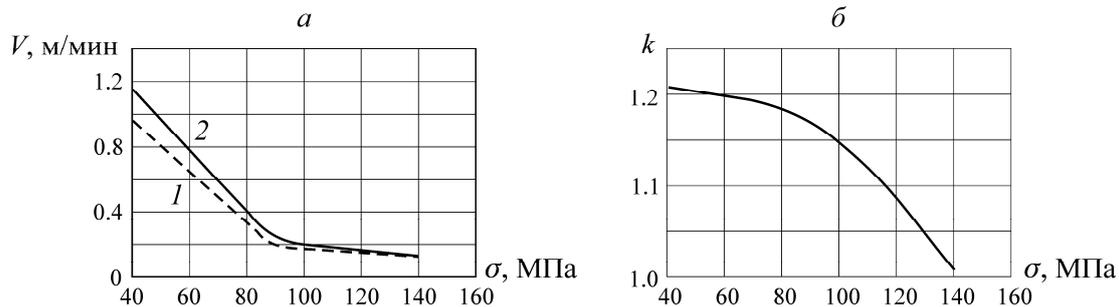


Рис. 5. Зависимости: а — скорости бурения  $V = f(\sigma)$ ; б — поправочного коэффициента  $k = f(\sigma)$  от предела прочности; 1 — полученные аналитическим путем; 2 — экспериментально

Таким образом, подставляя значение коэффициента  $k$ , соответствующего определенной крепости обуриваемой горной среды, в формулу (2), можно аналитическим путем находить скорость бурения скважин в породах различной крепости.

Проведенными исследованиями установлено также, что использование в комплекте оборудования, предназначенного для бурения скважин диаметром 46 мм в крепких породах, пневмоударника АШ-46А позволило увеличить скорость бурения в среднем на 40 %.

#### ВЫВОДЫ

Применение погружного пневмоударника АШ-46А при проходке скважин диаметром 46 мм обеспечивает увеличение скорости бурения по породам различной крепости. Это способствует повышению производительности работ как по дегазации угольных пластов, так и по разупрочнению тяжелых кровель.

Установлена возможность определения скорости бурения скважин по породам различной крепости аналитическим путем, что позволяет прогнозировать ожидаемую производительность этих работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В. И., Леконцев Ю. М., Клишин С. В. Создание технологии и оборудования для добычи породного камня методом направленного гидроразрыва // Наука, оборудование, техника. — 2009. — № 1.
2. Клишин В. И. Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. — Новосибирск: Наука, 2002.

3. **Клишин В. И., Кокоулин Д. И., Фокин Ю. С.** Развитие бурового оборудования для угольных шахт // Уголь. — 2007. — № 4.
4. **Клишин В. И., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б., Гуртенко А. П.** Создание буровых станков для угольных шахт // Рудник будущего: сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. — Пермь, 2010.
5. **Клишин В. И., Репин А. А., Кокоулин Д. И., Алексеев С. Е., Кубанычбек Б., Шахторин И. О.** Создание бурового оборудования для проходки скважин малого диаметра в крепких породах // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: сб. тр. — Прокопьевск, 2014.
6. **Пат. 2282009 РФ.** Станок буровой / В. И. Клишин, Ю. С. Фокин, Д. И. Кокоулин, А. А. Репин // Оpubл. в БИ. — 2003. — № 23.
7. **Клишин В. И., Репин А. А., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б.** Создание специальных буровых станков для бурения скважин диаметром 45 мм в крепких породах // Теория машин и рабочих процессов: сб. тр. — Бишкек, 2013.
8. **Репин А. А., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б., Алексеев С. Е. Шахторин И. О.** Испытание на натурном стенде бурового оборудования вращательно-ударного действия для бурения скважин малого диаметра // Фундаментальные и прикладные вопросы горноведов: Режимы бурения и выбор буровых машин. — М.: Недра, 1986.
9. **Медведев И. Ф.** Режимы бурения и выбор буровых машин. — М.: Недра, 1986.
10. **Царицын В. В.** Бурение горных пород. — Киев: Гостехиздат УССР, 1959.
11. **Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Теплых А. М.** Влияние неметаллических включений на долговечность ударных машин // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
12. **Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И.** Методы повышения надежности деталей ударных машин // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
13. **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.
14. **Есин Н. Н.** Методика исследования и доводки пневматических молотков. — Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1965.

*Поступила в редакцию 5/IX 2015*