

**А.П. Комиссаров, Г.В. Прокопович,  
В.И. Бахарева**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

Рассмотрен рабочий процесс машин ударного действия как процесс воздействия на горную породу волн деформаций, генерируемых при соударении ударника с элементом ударной системы (породоразрушающим инструментом, хвостовиком буровой штанги и т.п.). Показано, что степень передачи энергии удара к породе зависит, главным образом, от следующих факторов: физико-механических свойств горной породы, в частности, от сопротивляемости породе образованию волны деформаций (т.е. волнового сопротивления породы); ударной жесткости контактного сечения инструмента с породой, т.е. конструкции инструмента и вида инденторов. Установлено, что с ростом ударной жесткости контактного сечения рабочего инструмента с породой степень передачи энергии удара в породу возрастает.

Ключевые слова: машина ударного действия, волновое сопротивление, ударная жесткость контактного сечения инструмент-порода, энергия удара.

### **Введение**

**М**ашины ударного действия широко применяются в горнодобывающей и других отраслях промышленности, что обусловлено рядом их преимуществ — реализация значительных по величине ударных сил на контакте инструмент-порода при малой массе и габаритах машины.

Основной недостаток машин ударного действия заключается в значительных потерях энергии удара как при прохождении волн деформаций по элементам ударной системы (волноводам) вследствие внутреннего трения в волноводах и рассеяния в окружающую среду, так и, в основном, в результате отражения волн от контактного сечения рабочего инструмента с породой.

При разработке новых высокопроизводительных машин ударного действия все большее значение приобретают вопросы энергосбережения и энергоэффективности рабочего процесса.

## Постановка цели и задач работы

Цель – обоснование рациональных параметров породоразрушающего инструмента, обеспечивающих повышение степени использования энергии удара.

Задачи работы:

- оценка влияния конструктивных параметров инструмента на процесс передачи энергии удара в породу;
- установление зависимостей между параметрами инструмента и коэффициентом передачи энергии волн деформаций в породу.

## Решение задач работы

Метод решения задач работы основан на применении положений теории удара и теории колебаний упругих тел (волновой теории).

Объектом исследования является буровая машина ударного действия с погружным ударным механизмом, ударная система которой включает ударник и породоразрушающий инструмент.

Принимаем следующие допущения:

- ударник и инструмент изготовлены из одинакового материала и имеют равные и постоянные по длине поперечные сечения, что справедливо для гидравлических ударных механизмов [1];
- инструмент снабжен цилиндрическими инденторами.

В этом случае при соударении ударника с инструментом формируется ударный импульс прямоугольной формы, величина ударной силы которого равна [1, 2]:

$$F_{y\partial} = 0,5\rho_{y\partial}a_{y\partial}S_{y\partial}V_{y\partial}, \quad (1)$$

где  $\rho_{y\partial}$  – плотность материала ударника (и инструмента);

$a_{y\partial} = \left(\frac{E_{y\partial}}{\rho_{y\partial}}\right)^{0,5}$  – скорость распространения упругих волн в материале ударника;  $S_{y\partial}$  – площадь поперечного сечения ударника;  $V_{y\partial}$  – предударная скорость ударника;  $E_{y\partial}$  – модуль упругости материала ударника.

В результате удара возникают волны деформаций, при этом частицы материала ударника и инструмента совершают колебания около положения равновесия.

Колебательная скорость частиц равна:

$$V_{кол. y\partial} = \frac{F_{y\partial}}{C_{y\partial}}, \quad (2)$$

где  $C_{y\partial} = R_{y\partial} S_{y\partial}$  – ударная жесткость поперечного сечения ударника;  $R_{y\partial} = \rho_{y\partial} a_{y\partial}$  – волновое сопротивление материала ударника, характеризующее его (материала) способность сопротивляться образованию упругих деформаций.

После преобразований выражений (1) и (2) получим:

$$F_{y\partial} = 0,5 C_{y\partial} V_{y\partial} \quad (3)$$

и

$$V_{\text{кол.}y\partial} = 0,5 V_{y\partial}. \quad (4)$$

Энергия начальной волны деформаций равна [1]:

$$A_{\text{нод}} = \frac{F_{y\partial}^2 t_{y\partial}}{C_{y\partial}} = A_{y\partial}, \quad (5)$$

где  $t_{y\partial} = 2l_{y\partial} / a_{y\partial}$  – длительность удара;  $l_{y\partial}$  – длина ударника;  $A_{y\partial}$  – энергия удара.

С учетом выражения (3) имеем:

$$A_{\text{нод}} = 0,25 C_{y\partial} V_{y\partial}^2 t_{y\partial}. \quad (6)$$

При взаимодействии начальной волны деформаций, распространяющейся по инструменту, с горной породой она разделяется на две части – волну деформаций, проходящую в породе, и отраженную от породы волну.

Сила в прошедшей в породу волне деформаций, действующая на контакте инструмент-порода, равна [3]:

$$F_{\kappa} = \frac{F_{y\partial} 2C_n}{C_{y\partial} + C_n}, \quad (7)$$

где  $C_n = R_n S_{\kappa}$  – ударная жесткость площади контакта инструмент-порода (далее – ударная жесткость породы);  $R_n = \rho_n a_n$  – волновое сопротивление породы;  $S_{\kappa}$  – площадь контакта инденторов с породой (для цилиндрических инденторов  $S_{\kappa} = \text{const}$ );  $\rho_n$  – плотность породы;

$a_n = \left( \frac{E_n}{\rho_n} \right)^{0,5}$  – скорость распространения упругой волны в породе;  $E_n$  – модуль упругости породы.

С учетом выражения (3) имеем:

$$F_{\kappa} = \frac{C_{y\partial} V_{y\partial} C_n}{C_{y\partial} + C_n} = \frac{V_{y\partial} C_n}{1 + \frac{C_n}{C_{y\partial}}}. \quad (8)$$

Колебательная скорость частиц породы составит:

$$V_{\text{кол.п}} = \frac{F_{\text{к}}}{C_n} = \frac{V_{\text{уд}}}{1 + \frac{C_n}{C_{\text{уд}}}} = \frac{2V_{\text{кол.уд}}}{1 + \frac{C_n}{C_{\text{уд}}}}. \quad (9)$$

Энергия волны деформаций, прошедшей в породу, составит:

$$A_{\text{вд.п}} = \frac{F_{\text{к}}^2 t_{\text{уд}}}{C_n} = \frac{V_{\text{уд}}^2 t_{\text{уд}} C_n}{\left(1 + \frac{C_n}{C_{\text{уд}}}\right)^2}. \quad (10)$$

Соотношение между энергией удара (или энергией начальной волны деформаций) и энергией волны деформаций, прошедшей в породу, т.е. коэффициент передачи энергии удара в породу, составит:

$$K_n = \frac{A_{\text{вд.п}}}{A_{\text{уд}}} = \frac{4C_n}{C_{\text{уд}} \left(1 + \frac{C_n}{C_{\text{уд}}}\right)^2} = \frac{4C_{\text{уд}} C_n}{(C_{\text{уд}} + C_n)^2}. \quad (11)$$

Анализ полученных выражений (7)–(11) показывает, что параметры волны деформаций, прошедшей в породу, определяются величиной относительной ударной жесткости породы  $C_{\text{п.отн}} = C_n / C_{\text{уд}}$ .

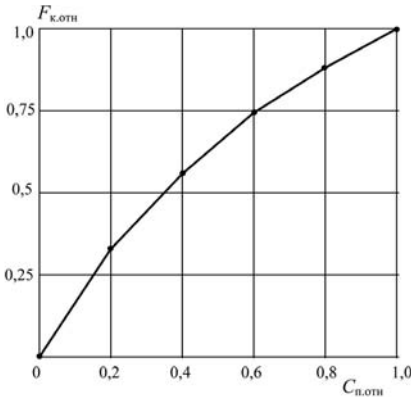


Рис. 1. Зависимость относительного значения силы, действующей на контакте «инструмент-порода», от относительной ударной жесткости породы

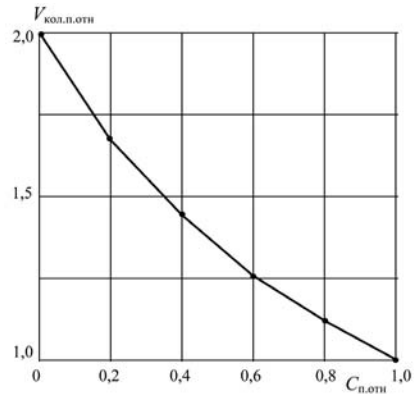


Рис. 2. Зависимость относительного значения колебательной скорости частиц породы от относительной ударной жесткости породы

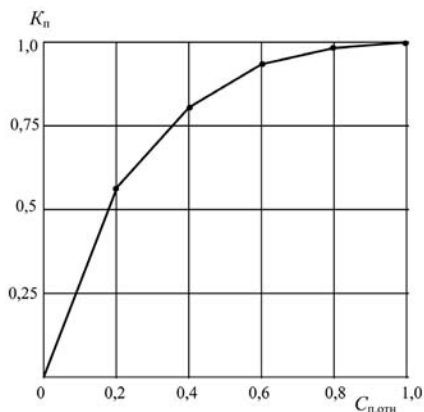


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи энергии удара в породе от относительной ударной жесткости породы

шедшей в породе, возрастают, а относительное значение колебательной скорости частиц породы уменьшается.

Максимальное значение ударной жесткости породы (площади контакта инденторов с породой) определяется из условия разрушения породы:

$$F_c \geq F_c = S_{к.макс} \sigma_{сж}, \quad (12)$$

где  $F_c$  — сила сопротивления внедрению инструмента;  $\sigma_{сж}$  — предел прочности породы на сжатие.

После преобразований выражений (8) и (12), получим:

$$S_{к.макс} = \frac{1}{R_n \sigma_{сж}} \left( \frac{2KR_n}{t_{уд}} - C_{уд} \sigma_{сж} \right), \quad (13)$$

где  $K = m_{уд} V_{уд}$  — количество движения ударника, равное по величине ударному импульсу;  $m_{уд}$  — масса ударника.

Таким образом, при известных значениях параметров гидравлического ударного механизма ( $m_{уд}$ ,  $l_{уд}$ ,  $V_{уд}$  и  $C_{уд}$ ) и физико-механических свойств горной породы ( $\sigma_{сж}$  и  $R_n$ ) существует максимально возможное значение площади контакта  $S_{к.макс}$  цилиндрических инденторов породоразрушающего инструмента, при котором достигается максимальное значение коэффициента передачи энергии удара в породе.

На рис. 1–3 приведены зависимости относительных значений силы, действующей на контакте инструмент-порода,  $F_{к.отн} = F_c / F_{уд}$  и колебательной скорости частиц породы  $V_{кол.л.отн} = V_{кол.л} / V_{кол.уд}$ , а также коэффициента передачи энергии удара в породе от относительной ударной жесткости породы.

Из приведенных графиков видно, что с ростом относительной ударной жесткости породы относительные значения силы, действующей на контакте инструмент-порода, и энергии волны деформаций, про-

## Заклучение

В работе установлены соотношения между параметрами волны деформаций, прошедшей в породе, и начальной волны деформаций, генерируемой при соударении ударника с инструментом.

Показано, что при прочих равных условиях параметры волны деформаций, прошедшей в породе, зависят от величины ударной жесткости породы, т. е. волнового сопротивления породы и суммарной площади сечений инденторов инструмента (площади контакта инструмент-порода).

Получено выражение для максимального значения ударной жесткости породы (площади контакта цилиндрических инденторов с породой).

Повышение энергоэффективности машин ударного действия достигается за счет выбора рациональных параметров породоразрушающего инструмента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О. Д., Манжосов В. К., Еремьянц В. Э. Удар. Распространение волн деформации в ударных системах. — М.: Наука, 1985. — 215 с.
2. Иванов К. И., Андреев В. Д., Варич М. С., Дусев В. И. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1974. — 408 с.
3. Комиссаров А. П., Прокопович Г. В., Фролов С. Г. Влияние конструкции породоразрушающего инструмента на эффективность ударного бурения // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 8. — С. 11–15.
4. Клей Р. В., Кук М. А., Кейс Р. Т. Ударные волны в твердых телах и механика горных пород / Разрушение и механика горных пород. — М.: Госгортехиздат, 1962. — С. 410–440.
5. Робертс А., Хоукс И., Фарби Д. Передача энергии при ударном бурении: Экспресс-информ // Горнорудная промышленность. — 1963. — № 2. — С. 1–18.
6. Sears I. E. On the longitudinal impact of metal rods with rounded ends. Trans. Cambridge Philos. Soc., 1909, vol. 21, № 11, p. 49–105.
7. Arndt F. K. Der Schlägeblauf in Kolben und Stange beim schlagenden Bohren. Glückauf, 1960, Bd. 1, № 24.
8. Arndt F. K. Die Energiebilanz des Bohrhammers. Bergakademie, 1965, Bd. 17, № 3, S. 159–161.
9. Lundberg B. Some basic problems in percussive rock destruction. Goteborg, 1971.
10. Hustrulid W. A., Fairhurst C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock. Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci., 1971, № 8, p. 311–333.
11. Hustrulid W. A., Fairhurst C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock. Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci., 1972, № 9, p. 335–356.

12. *Dutta P. K.* The determination of stress waveforms produces by percussive drill pistons of various geometrical designs. Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci., 1968, vol. 5, № 6, p. 501–518.

13. *Sembritzki G.* Zum Spannungszustang in Bohrstangen beim schlagenden Bohren. Bergbauwissenschaften, 1968, Bd. 15, № 12, S. 457–463.

14. *Engel L.* Die Theorie des Stoles und die Praxis des schlagenden Bohrens. Bergbauwissenschaften, 1964, Bd. 11, № 21/22, S. 477–480.

15. *Fairhurst C.* Wave mechanics of percussive drilling. Mine and Quarry, 1961, № 3, p. 122–133; № 4, p. 169–178. **ЦАБ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Комиссаров Анатолий Павлович*<sup>1</sup> – доктор технических наук, профессор,

*Прокопович Григорий Валерьевич*<sup>1</sup> – кандидат технических наук, старший преподаватель,

*Бахарева Валентина Ивановна*<sup>1</sup> – ассистент,

<sup>1</sup> Уральский государственный горный университет,

e-mail: gmf.gmk@ursmu.ru.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 4, pp. 31–38.

UDC 622.243

**A.P. Komissarov, G.V. Prokopovich, V.I. Bakhareva**

#### **IMPROVING ENERGY EFFICIENCY MACHINES PERCUSSION**

The paper considers workflow machines percussion effects on the process of rock deformation waves generated by the collision of the impactor with the element of shock (rock cutting tool shank drill rod). The degree of energy transfer to the rock pin depends mainly on the following factors: physical and mechanical properties of the rock formation, in particular by resistance strain wave formation rock (the wave resistance of rock); the stiffness of the shock of the contact section of the tool with the breed, t. e. the design tools and the type of indenters. It was found that an increase in the stiffness of the shock of the contact section of the working tool with rock degree of transmission of the impact energy into the rock increases.

Key words: percussion machine, wave resistance, shock stiffness of the contact section of the tool-breed, the impact energy.

#### AUTHORS

*Komissarov A.P.*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor,

*Prokopovich G.V.*<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,

*Bakhareva V.I.*<sup>1</sup>, Assistant,

<sup>1</sup> Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Russia.

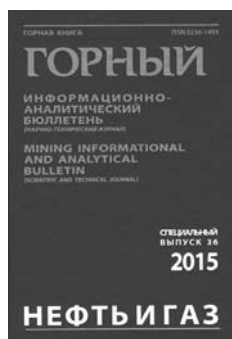
#### REFERENCES

1. Alimov O. D., Manzhosov V. K., Erem'yants V. E. *Udar. Rasprostranenie voln deformatsii v udarnykh sistemakh* (Percussion. Travel of deformation waves in percussive systems), Moscow, Nauka, 1985, 215 p.

2. Ivanov K. I., Andreev V. D., Varich M. S., Dusev V. I. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* (Drilling technique in mineral mining), Moscow, Nedra, 1974, 408 p.
3. Komissarov A. P., Prokopovich G. V., Frolov S. G. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2012, no 8, pp. 11–15.
4. Kley R. V., Kuk M. A., Keys R. T. *Razrushenie i mekhanika gornykh porod* (Failure and mechanics of rocks), Moscow, Gosgortekhzdat, 1962, pp. 410–440.
5. Roberts A., Khouks I., Farbi D. *Gornorudnaya promyshlennost'*. 1963, no 2, pp. 1–18.
6. Sears I. E. On the longitudinal impact of metal rods with rounded ends. *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, 1909, vol. 21, no 11, pp. 49–105.
7. Arndt F. K. Der Schlägeblauf in Kolben und Stange beim schlagenden Bohren. *Glückauf*, 1960, Bd. 1, no 24.
8. Arndt F. K. Die Energiebilanz des Bohrhammers. *Bergakademie*, 1965, Bd. 17, no 3, pp. 159–161.
9. Lundberg B. *Some basic problems in percussive rock destruction*. Geteborg, 1971.
10. Hustrulid W. A., Fairhurst C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock. *Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 1971, no 8, pp. 311–333.
11. Hustrulid W. A., Fairhurst C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock. *Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 1972, no 9, pp. 335–356.
12. Dutta P. K. The determination of stress waveforms produced by percussive drill pistons of various geometrical designs. *Intern. J. Rock Mech. and Mining Sci.*, 1968, vol. 5, no 6, pp. 501–518.
13. Sembritzki G. Zum Spannungszustang in Bohrstangen beim schlagenden Bohren. *Bergbauwissenschaften*, 1968, Bd. 15, no 12, pp. 457–463.
14. Engel L. Die Theorie des Stoßes und die Praxis des schlagenden Bohrens. *Bergbauwissenschaften*, 1964, Bd. 11, no 21/22, pp. 477–480.
15. Fairhurst C. Wave mechanics of percussive drilling. *Mine and Quarry*, 1961, no 3, pp. 122–133; no 4, pp. 169–178.



## НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Коллектив авторов  
**Горный информационно-аналитический бюллетень.**  
**Специальный выпуск № 36. Нефть и газ**  
 Год: 2015  
 Страниц: 304  
 ISBN: 0236-1493  
 UDK: 622.276+553.981

Тематика статей представлена вопросами контроля и обеспечения надежности нефтегазовых объектов, развития газогидратных технологий, моделирования и оптимизации процессов добычи, хранения и транспортировки углеводородного сырья, энергоресурсосбережению и экологическим проблемам эксплуатации оборудования нефтегазовой отрасли.

Сборник будет полезен научно-техническим и инженерным работникам нефтегазового комплекса, а также студентам и аспирантам.