



**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В СИСТЕМЕ “БОЕК – ИНСТРУМЕНТ” УДАРНОГО УСТРОЙСТВА
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МАССИВОМ**

Л. В. Городилов, В. П. Ефимов

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, E-mail: efimov-pedan@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлена методика измерения ускорений, генерируемых в элементах системы “боек – инструмент” при ее взаимодействии с горным массивом. Приведены осциллограммы измерений, дан их анализ. Обсуждены количественные аспекты явления, сделана попытка выявить взаимосвязь между количественными показателями ударных импульсов и результатами разрушения.

Ударная система, боек, инструмент, горный массив, осциллограмма, ускорение, сила, разрушение

**EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT PULSES
IN THE STRIKING HEAD-TOOL SYSTEM WHEN INTERACTING WITH ROCK MASS**

L. V. Gorodilov and V. P. Efimov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: efimov-pedan@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The technique of measuring the accelerations generated in the elements of the striker head – tool system is presented when it interacts with the rock mass. The measurements oscillograms and their analysis are shown. The quantitative aspects of the phenomenon are discussed, and an attempt is made to reveal the relationship between the quantitative parameters of impact pulses and fracture results.

Impact system, striker, tool, rock mass, oscillogram, acceleration, force, fracture

Ударное разрушение горных пород широко используется в существующих и перспективных технологиях горного производства: при отбойке полезных ископаемых (навесные молоты [1], экскаваторы с ковшами активного действия для открытых работ [2, 3] и динамические струги для подземных работ [4]), при ударно-вращательном способе бурения [5]. Анализ состояния исследований в этой области [5 – 8] показывает, что к настоящему времени достаточно полно раскрыта качественная картина разрушения горных пород при внедрении в них твердых инденторов различной формы, на ее основе построены эмпирические формулы и математические модели процесса разрушения. Однако процесс ударного разрушения с учетом динамических свойств ударной системы горной машины изучен недостаточно. Отсутствуют надежные методики расчета параметров систем типа “боек – инструмент” (ударных систем), обеспечивающих максимальную для конкретных горных пород эффективность процесса. Эти факторы сдерживают разработку новых эффективных горных машин ударного действия.

Очевидно, что формирующиеся в ударной системе рабочего органа горной машины импульсы в этом случае определяются как динамикой и параметрами ее бойка и инструмента, так и свойствами породного массива и, соответственно, характером процесса разрушения. От совокупности

этих факторов зависит и эффективность разрушения. Вопросами формирования и передачи ударных импульсов в ударной системе посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей [1, 9–14]. Отметим, что результаты в основном получены применительно к бурению скважин, особенность которого заключается в использовании инструмента (бурового става) сравнительно большой длины и, соответственно, в особых условиях формирования импульсов.

В целом приведенные работы развивают направление, в котором ищется связь между параметрами ударной системы (бойком и инструментом), свойствами среды и результатами их взаимодействия. Недостатком их является отсутствие обоснованных экспериментально расчетных методик для определения параметров разрушения горных пород при ударном воздействии инструмента и силовых характеристик его внедрения. С этой точки зрения представляется целесообразным изучение ударных импульсов, генерируемых в инструменте, сопоставление их характеристик с результатами разрушения и выявление с этих позиций их оптимальных формы и величины, приводящих к наиболее эффективному разрушению. В настоящей работе представлены результаты нескольких серий экспериментов по ударному воздействию системы “боек–инструмент” на мраморный блок, рассматриваются и обсуждаются некоторые аспекты формирования и передачи ударных импульсов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Подробно методики проведения экспериментов, в том числе на блоке из мрамора, регистрации предупредной скорости бойка и ускорений бойка и инструмента описаны в [15]. Отметим, что стенд состоял из маятникового копра с бойком и инструментом, массив моделировали блоком из мрамора размерами $0.95 \times 0.95 \times 1.5$ м³ массой ~4000 кг. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

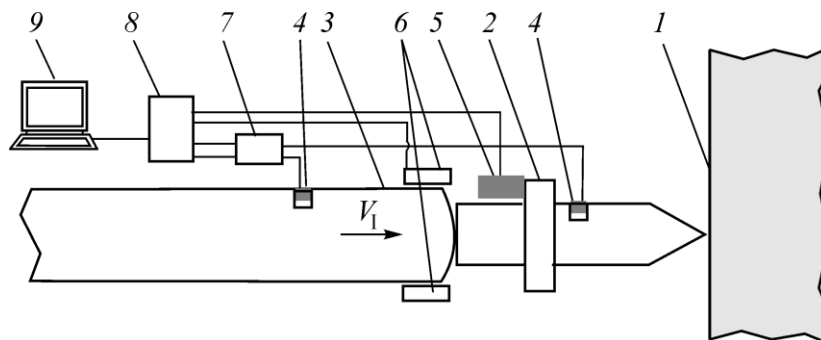


Рис. 1. Схема эксперимента: 1— блок из мрамора; 2— инструмент; 3— боек; 4— вибропреобразователи AP33; 5— датчик контроля скорости ИДС-2; 6— оптический датчик измерения пред- и послеударной скорости бойка (два датчика “лазер–фотодиод”); 7— усилители заряда Bruel&Kjaer 2651; 8— аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440; 9— персональный компьютер

В опытах боек 3 разгоняли до заданной скорости v_1 (максимально до 7 м/с), с которой он взаимодействовал с инструментом 2. Инструмент 2 был поджат с усилием, достаточным для его надежного удержания в фиксированном положении, к блоку из мрамора 1.

Использовали цилиндрические бойки 3.1, 5 и 16 кг и длиной 565 мм, инструменты массами 5 и 9.6 кг ступенчатой формы длиной 160 мм, с длиной и углом заострения лезвия соответственно 30 мм и 60° [16]. Для регистрации ускорений в бойке и инструменте использовали вибропреобразователями AP33 фирмы ГлобалТест и усилители заряда Bruel&Kjaer 2651. Датчики крепили в отфрезерованных по размеру пазах в бойках и инструментах. Общая погрешность измерений включала систематическую (обратное отношение сигнал-шум) и случайную погрешности, которые в сумме не превышали 5.5 % [15]. На инструменте для контроля его скорости устанавливался индукционный датчик скорости ИДС-2. Дополнительно оптическим датчиком (двумя парами элементов “лазер–фотодиод”) регистрировали положения торца бойка до и после взаимодейст-

вия с инструментом, что позволяло определять пред- и послеударную скорости бойка, коэффициент его восстановления и энергию, переданную инструменту. Сигналы от датчиков через аналого-цифровой преобразователь L-Card E-440 передавались на персональный компьютер и обрабатывались при помощи программы PowerGraph 3.3.

Проведено несколько серий экспериментов с единичными ударами и сериями ударов в одно и то же место. В каждом опыте вместе с регистрацией ударных импульсов в бойке и инструменте измерялись размеры воронок (глубин h и диаметров R).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен пример осциллограмм, получаемых в программе PowerGraph 3.3 в результате эксперимента.

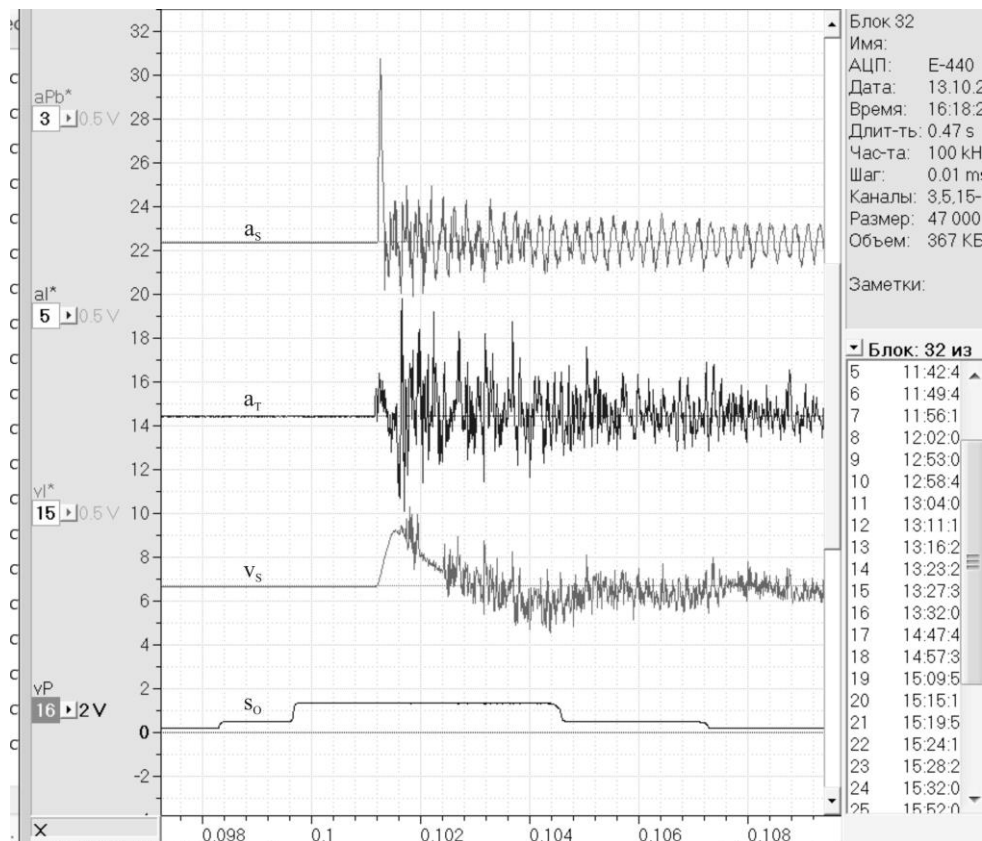


Рис. 2. Осциллограммы регистрируемых сигналов в программе PowerGraph 3.3 (сверху вниз): ускорения в бойке a_B и инструменте a_I , измеренные датчиками AP33, скорость инструмента v_I (датчик ИДС-2), сигнал с оптического датчика S_0 (оптический датчик)

Проинтегрированные сигналы с датчиков ускорения бойка и инструмента несут информацию об изменении их скоростей, которые обсуждаются далее. Отметим, что переданный инструменту импульс, зарегистрированный датчиком ИДС, хорошо коррелирует с импульсом, вычисленным как интеграл от первой полуволны ускорения с датчика, установленного на инструменте. Наблюдается также совпадение показаний оптического датчика скорости и вычисленной скорости бойка интегрированием сигнала акселерометра, размещенного на бойке.

На рис. 3, 4 приведены совмещенные осциллограммы от датчиков ускорений, установленных на бойке и инструменте на расстояниях ~ 300 и 70 мм от плоскости их взаимодействия, и полученные в результате их интегрирования графики скоростей. Для большей наглядности сигналы от датчиков ускорений и графики скоростей бойка смещены влево по оси t таким образом, чтобы моменты вступления их ударных импульсов совпадали.

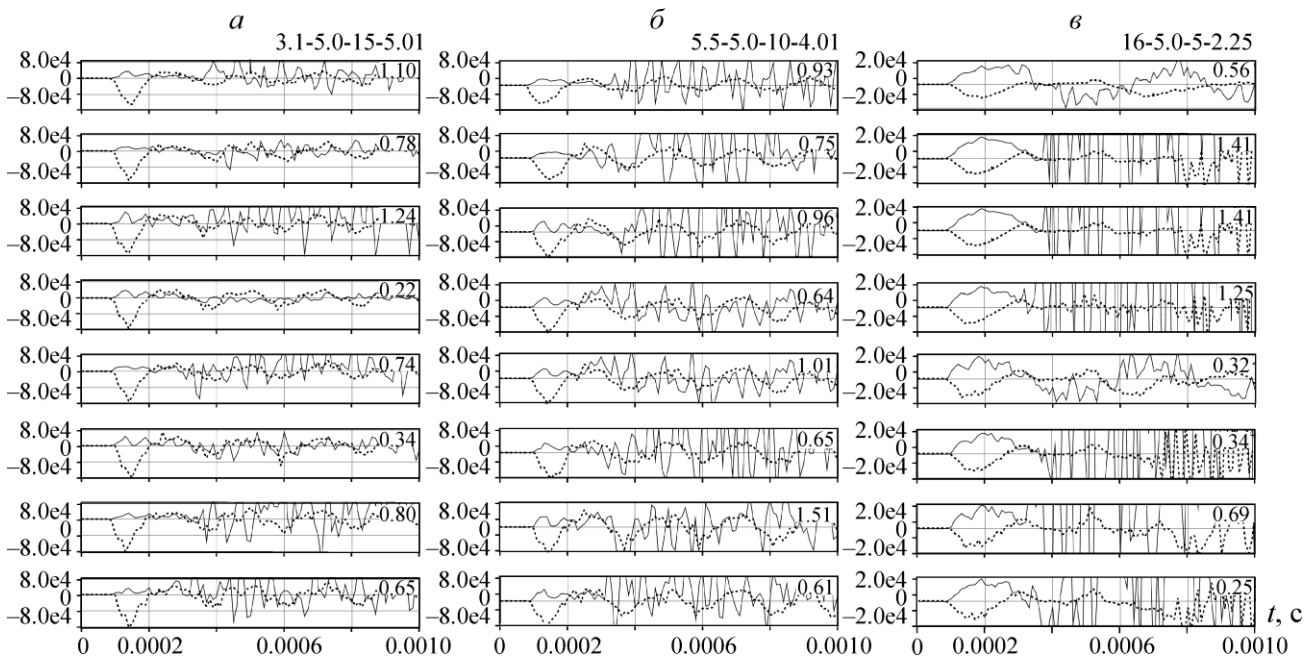


Рис. 3. Совмещенные осциллограммы ускорений в бойке a_S (.....) и инструменте a_T (—) в сериях опытов из восьми ударов (по порядку сверху вниз) с инструментом массой 5 кг и бойками массами и предупредными скоростями соответственно 3.1 кг и ~ 5.01 м/с (а), 5.5 кг и ~ 4.01 м/с (б), 16 кг и ~ 2.25 м/с (в)

Графики получены в сериях из восьми последовательных ударов (изображены на рис. 4а–в сверху вниз) в одно и то же место каждым из имевшихся бойков по инструменту массой 5 кг, прижатому к блоку. Предударные скорости бойков подбирали таким образом, чтобы их энергии ударов при разных массах были примерно равны между собой. Так как скорость бойка перед ударом отличалась от нуля (ее вычисляли по прохождению бойком меток оптического датчика), то последнюю добавляли к значениям скорости, полученным после интегрирования.

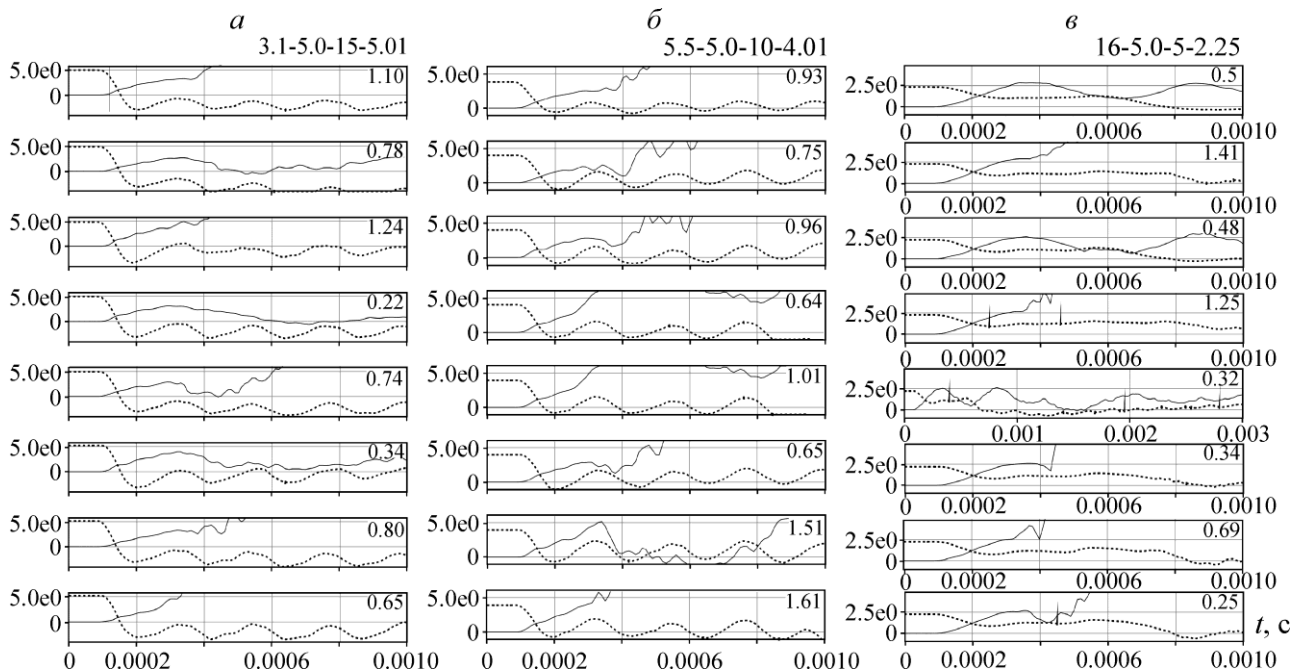


Рис. 4. Полученные интегрированием осциллограмм рис. 3 графики скоростей в бойке (.....) и инструменте (—) в сериях опытов из восьми ударов (по порядку сверху вниз) с инструментом массой 5 кг и бойками массами и предупредными скоростями соответственно 3.1 кг и ~ 5.01 м/с (а), 5.5 кг и ~ 4.01 м/с (б), 16 кг и ~ 2.25 м/с (в)

Рассматривая совмещенные по времени вступления ударного импульса осциллограммы ускорений в бойке и инструменте (рис. 3), можно заметить следующие особенности:

— при увеличении массы бойка при примерно одинаковой энергии возрастает длительность фазы 1-й полуволны ускорения как для бойка, так и для инструмента. Эта фаза соприкосновения бойка и инструмента и длительность ее возрастает пропорционально приведенной массе соударяющихся тел, как продолжительность контакта, оцененная по теории Герца [17];

— с момента времени $t \geq 0.3-0.4$ мс начинаются интенсивные колебания ускорений в инструменте, что может быть вызвано началом трещинообразования в породе, контактирующей с ним;

— после 1-й полуволны существует участок (особенно заметный на осциллограмме от удара бойком 16 кг), на котором значения ускорений бойка и инструмента близки;

— наилучший результат по эффективности разрушения наблюдается у пары боек – инструмент 5.5 – 5 кг (глубина воронки $h = 7.06$ мм в этом случае более чем на 1 и 1.5 мм превышает аналогичные для пар 3.1-5 и 16-5 кг соответственно). Заметим, что в этом случае первая полу волна в парах 5.5 – 5 и 3.1 – 5 кг имеет рваную форму с двумя горбами, значения ускорения во впадине снижается почти до нуля.

Аналогичное рассмотрение совмещенных по времени вступления графиков скоростей, проинтегрированных сигналов акселерометра в бойке и инструменте (рис. 4) показывает, что:

— лишь небольшое количество графиков скоростей инструмента имеют на рассматриваемом участке оси t положительную полуволну с переходом значений в отрицательную область. Скорее всего, это связано с некорректными экспериментальными данными, так называемым “эффектом смещения нуля” при регистрации ударных импульсов пьезоэлектрическими акселерометрами, который особенно проявляется при интегрировании;

— из графиков скоростей бойка, построенных с учетом его начальной скорости, видно, что наиболее легкий боек (3.1 кг) имеет самый высокий коэффициент отскока и тем самым наименьшую эффективность разрушения. Два оставшихся бойка имеют малый коэффициент отскока, что определяет высокий коэффициент передачи энергии инструменту. Но между ними можно заметить существенную разницу передачи этого импульса во времени. Момент перехода скорости в отрицательную область существенно отличается — от ~ 0.1 мс для бойка 5 кг до ~ 0.6 мс для тяжелого бойка;

— в графиках скоростей бойка следует отметить качественные отличия, наблюдаемые в характере движения бойков массами 3.1 и 5.5 кг, по сравнению с бойком массой 16 кг. Для бойков с массами 3.1 и 5.5 кг наблюдаются колебательные движения с периодом, совпадающим со временем двойного пробега волны по ним, в бойке с массой 16 кг они практически незаметны.

ВЫВОДЫ

В работе представлена методика и начальные результаты экспериментов по измерения ударных импульсов в элементах системы “бок – инструмент” при ее взаимодействии с горным массивом. Полученные данные позволили выявить некоторые особенности форм и величин ускорений и скоростей ударных импульсов, генерируемых в элементах системы при взаимодействии с блоком из мрамора, их корреляции с размерами воронок. Дальнейшее развитие экспериментальной методики позволит более детально исследовать взаимосвязь между параметрами ударной системы, генерируемыми при ударе импульсами в ее элементах и размерами образующихся воронок.

Необходим теоретический анализ движения бойка и инструмента при ударном взаимодействии с горным массивом и распространении в них ударных импульсов, чтобы найти характеристики движения передней части клина инструмента как определяющего при образовании воронок рыхления и сопоставить его с получаемой при расчетах волновой картиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Ushakov L. S., Kotylev Y. E., and Kravchenko V. A.** Hydraulic impact machines, Moscow, Mechanical, 2000, 398 pp. (in Russian) [**Ушаков Л. С., Котылев Ю. Е., Кравченко В. А.** Гидравлические машины ударного действия — М.: Машиностроение. — 2000. — 398 с.]
2. **Mattis A. R. and Oparin V. N.** Technologies of open mining of solid minerals without blasting, Novosibirsk, Publishing house of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 2007, 335 pp. (in Russian) [**Маттис А. Р., Опарин В. Н.** Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых: монография. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 335 с.]
3. **Gorodilov L. V. and Labutin V. N.** The prospects for the creation of buckets active steps to hydraulic construction excavators, Impact-vibration systems, machines and technologies, Materials of the V Intern. Scien. Simp., Orel, OrelGTU, 2013, pp. 112–119 [**Городилов Л. В., Лабутин В. Н.** Перспективы создания ковшей активного действия к гидравлическим строительным экскаваторам // Ударно-вибрационные системы, машины и технологии: материалы V Междунар. науч. симп. — Орел: ОрелГТУ, 2013. — С. 112–119.]
4. **Gorbunov V. F., Lazutkin A. G., and Ushakov L. S.** Pulsed hydraulic drive of mining machines, Novosibirsk, Nauka, 1986, 195 pp. (in Russian) [**Горбунов В. Ф., Лазуткин А. Г., Ушаков Л. С.** Импульсный гидропривод горных машин. — Новосибирск: Наука, 1986. — 195 с.]
5. **Kryukov G. M.** Physics of rock destruction during drilling and blasting: textbook for universities, Moscow, Mining book, 2006, vol. 1, 330 pp. (in Russian) [**Крюков Г. М.** Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании: учебник для вузов. — М.: Горная книга, 2006. — Т. 1. — 330 с.]
6. **Kolesnikov Y. V. and Morozov E. M.** Mechanics of contact fracture, Moscow, LKI, 2010, 224 pp. (in Russian) [**Колесников Ю. В., Морозов Е. М.** Механика контактного разрушения. — М.: ЛКИ, 2010. — 224 с.]
7. **Cherepanov G. P.** Mechanics of fracture, Moscow, Institute of computer research, 2012, 872 pp. (in Russian) [**Черепанов Г. П.** Механика разрушения. — М.: Институт компьютерных исследований. — 2012. — 872 с.]
8. **Sokolinsky V. B.** Impact failure machines (Fundamentals of integrated design), Moscow, Mechanical Engineering, 1982, 184 pp. (in Russian) [**Соколинский В. Б.** Машины ударного разрушения (Основы комплексного проектирования). — М.: Машиностроение, 1982. — 184 с.]
9. **Alimov O. D., Manzhosov V. K., and Eremyants V. E.** Propagation of deformation waves in impact systems, Moscow, Nauka, 1985, 360 pp. (in Russian) [**Алимов О. Д., Манжосов В. К., Еремьянц В. Э.** Распространение волн деформаций в ударных системах. — М.: Наука, 1985. — 360 с.]
10. **Zhukov I. A.** Development of scientific bases for improving the efficiency of percussion machines for drilling wells in rocks, Synopsis of Doct. Tech. Sci. Thesis, Novosibirsk, 2017, 39 pp. [**Жуков И. А.** Развитие научных основ повышения эффективности ударных машин для бурения скважин в горных породах: автореф. дис. ... д-ра тех. наук. — Новосибирск, 2017. — 39 с.]
11. **Simon R.** Transfer of the stress wave energy of a percussive drill to the rock, J. Rock Mech. Min. Sci., 1964, vol. 1, pp. 397–411.
12. **Karlsson L. G., Lundberg B., and Sundin K. G.** Experimental study of percussive process for rock fragmentation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 1989, vol. 26, pp. 25–50.
13. **Lundberg B. and Collet P.** Optimal wave shape with respect to efficiency in percussive drilling with detachable drill bit, Int. J. Impact. Eng., 2015, vol. 86.
14. **Hashiba K., Fukui K., Liang Y. Z., and Koizumi M.** Modeling of force-penetration curves for a button bit during impact penetration into the rock, Int J Rock Mech Min Sci., 2017, vol. 93, pp. 210–214.
15. **Gorodilov L. V., Efimov V. P., and Kudryavtsev V. G.** Modeling the striking head-impact tool-rock mass interaction, Journal of Mining Science, 2013, vol. 49, no. 4.
16. **Gorodilov L. V., Efimov V. P., and Kudryavtsev V. G.** Experimental study of the destruction of the marble block in interaction with the impact system “striker–tool”, Fundamental and Applied Mining Science, 2016, vol. 2, no. 3, pp. 44–51 [**Городилов Л. В., Ефимов В. П., Кудрявцев В. Г.** Экспериментальное исследование разрушения мраморного блока при взаимодействии с ударной системой “боек–инструмент” // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — Т. 2. — С. 44–51.]
17. **Goldsmith W.** Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids, London, Edward Arnold, 1960, 379 pp.