

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОЙКОВ УДАРНЫХ МАШИН ПО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ РАЗРУШАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Е. Г. Тимофеев<sup>1</sup>, А. В. Теплякова<sup>2</sup>, И. А. Жуков<sup>2</sup>, Н. С. Голиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** повышение эффективности работ, связанных с разрушением горной породы ударными воздействиями, при неизменной энергии удара, определяемой кинетической энергией бойка, достигается путем учета эффекта влияния геометрических параметров элементов ударных узлов машины. Задание бойку геометрической формы, согласованной с силами сопротивлений горной пород ударному разрушению, обеспечивает формирование в штанге-волноводе такого ударного импульса, вся энергия которого расходуется непосредственно на разрушение породы, а энергия отраженной волны стремится к нулевому значению. Аналитические методы решения проблемы учета геометрии бойка ударной машины зачастую не приводят к быстрому достижению поставленной цели в силу возникновения сложных математических вычислений. На этом основании в статье ставится и решается задача разработки численного алгоритма синтеза геометрии геометрических размеров ударника в зависимости от параметров ударного импульса и создания на его основе программного обеспечения. По результатам исследований приводится пример синтеза геометрии бойка для разрушения горной породы высокой крепости – гранита, а также выдвигается новое техническое решение выполнения бойка с криволинейной образующей боковой поверхности оснащением цилиндрической оболочкой постоянной толщины. Такой подход позволяет не только повысить эффективность разрушения породы ударными воздействиями, но и уменьшить негативное влияние на прочность машины отраженных ударных волн.

**Ключевые слова:** машина ударного действия, удар, боек, волновод, ударный узел, геометрия ударника, численный метод, сила-внедрение, оптимальный импульс.

**Для цитирования:** Тимофеев Е. Г., Теплякова А. В., Жуков И. А., Голиков Н. С. Автоматизированный метод проектирования бойков ударных машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 257–269. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_257.

## Automated method of designing anvil-blocks of impact machines based on the physical and mechanical properties of destroyed objects

E. G. Timofeev<sup>1</sup>, A. V. Teplyakova<sup>2</sup>, I. A. Zhukov<sup>2</sup>, N. S. Golikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia;

<sup>2</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

**Abstract:** An increase in the efficiency of work related to the destruction of rock by impacts, with a constant impact energy determined by the kinetic energy of the anvil-block, is achieved by taking into account the effect of the geometric parameters of the elements of the impact units of the machine. Setting the anvil-block of a geometric shape, consistent with the forces of rock resistance to impact destruction, ensures the formation of such a impact pulse in the waveguide rod, all the energy of which is spent directly on the destruction of the rock, and the energy of the reflected wave tends to zero. Analytical methods for solving the problem of accounting for the geometry of anvil-block of the impact machine often do not lead to the rapid achievement of the goal due to the emergence of complex mathematical calculations. On this basis, the article sets and solves the problem of developing a numerical algorithm for synthesizing the geometric dimensions of the anvil-block depending on the parameters of the impact pulse and creating software based on it. According to the results of the research, an example of the synthesis of the geometry of an anvil-block for the destruction of a rock of high strength – granite is given, and a new technical solution is put forward for the execution of anvil-block with a curved forming side surface equipped with a cylindrical shell of constant thickness. This approach allows not only to increase the efficiency of rock destruction by impacts, but also to reduce the negative impact on the strength of the reflected impact waves on the machine.

**Key words:** impact machine, impact, anvil-block, waveguide, impact unit, geometry of the anvil-block, numerical method, force-introduction, optimal impulse.

**For citation:** Timofeev E. G., Teplyakova A. V., Zhukov I. A., Golikov N. S. Automated method of designing anvil-blocks of impact machines based on the physical and mechanical properties of destroyed objects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):257–269. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_257.

---

## Введение

Ударное воздействие циклическими нагрузками является одним из наиболее распространенных способов разрушения горных пород средней и высокой крепости [1–5]. Силы, генерируемые в буровой штанге ударниками, могут достигать значений, измеряемых десятками тонн [6–9]. Благодаря этому в горнодобывающей промышленности широко применяются машины, где полезная энергия генерируется в процессе выполнения продольного удара (бурильные станки, отбойные молотки, перфораторы и др.) [10–14].

Основной оценочной характеристикой процесса ударного разрушения горной породы является энергоемкость, численно равная энергии, необходимой для разрушения единицы объема горной породы [15–18]. Чем меньше это значение, тем выше эффективность удара. Однако для машин ударного действия вместо энергоемкости более правиль-

ным будет применять понятие «импульсоемкость» [19–21], так как нахождение величины энергии, непосредственно идущей на разрушение породы, не представляется возможным. Доказано, что при генерации ударником волнового импульса оптимальной формы энергетические затраты будут минимальными, что существенно снизит нагрузки на все элементы ударной машины и продлит срок ее службы. Для каждой различающейся по физико-механическим свойствам разрушаемой горной породы (гранит, мрамор, базальт и т.д.) параметры оптимального импульса зависят от характеристики, связывающей глубину внедрения бурового инструмента и силу сопротивления породы [22–25]. В этой связи задача установления параметров оптимального ударного импульса, соответствующего зависимости «сила – внедрение», и геометрической формы бойка, способного его сгенерировать, несомненно, пред-

ставляется весьма актуальной. Впервые эта задача была сформулирована в 2005 году профессором Сибирского государственного индустриального университета, д.т.н. Леонидом Трофимовичем Дворниковым.

### Методы исследований

Решение поставленной задачи с применением методов математического моделирования, активно применяющихся в исследованиях ударных систем технологического назначения [26–31], можно поделить на два этапа:

I этап — анализ физико-механических свойств разрушаемой горной породы и определение параметров первой волны оптимального ударного импульса;

II этап — определение геометрических параметров ударника переменного поперечного сечения, генерирующего оптимальный ударный импульс.

Импульсоемкость ударной системы машины определяется величиной энергии продольного ударного импульса, генерируемого в штанге-волноводе при ударе бойком, и энергией отраженной волны. Для повышения эффективности удара необходимо обеспечение формирования бойком в волноводе импульса, параметры которого соответствуют интенсивности роста сопротивляемости разрушаемой породы внедрению. Это условие обеспечивается путем задания в расчетах энергии отраженного импульса равной или близкой к нулю. Согласно такому предположению, оптимальный ударный импульс вычисляется по зависимости

$$\int_{t_0}^t \frac{a}{S_0 \cdot E} \cdot dt = \int_{P_0}^P \frac{dh(P)}{dP} \cdot \frac{dP}{P},$$

где  $P$  — сила сопротивления породы разрушению,  $a$  — скорость звука в материале бойка и волновода,  $S_0$  —

площадь поперечного сечения штанги-волновода,  $E$  — модуль упругости материала соударяющихся тел,  $t$  — время,  $h$  — глубина внедрения инструмента в породу при разрушении.

Таким образом, решением первого этапа будет некая функция, задающая первую волну оптимального для заданной разрушаемой породы ударного импульса (рис. 1), записываемая в общем виде как

$$F = F(t) + F_0,$$

где  $F$  — силовой импульс,  $F_0$  — его начальное значение,  $t$  — время.

Решением второго этапа является зависимость вида  $y = f(x)$ , задающая простую кривую, являющуюся образующей цельнотельного однородного ударника переменного сечения (рис. 2), генерирующего оптимальный импульс, рассчитанный на первом этапе. Область определения функции  $[0; L]$  ограничивается длиной синтезируемого бойка  $L$ .

Решение задачи синтеза геометрии бойков, генерирующих оптимальный импульс, соответствующей зависимости «сила — внедрение» горной породы, базируется на обратном применении численного графодинамического метода расчета ударного импульса от цельнотельного цилиндрического бойка переменного сечения [32,33]. Исходными данными для синтеза бойка являются высоты столбцов силовой гистограммы (одинаковой длины  $t_1$ ), построенной под графиком функции, задающей оптимальный ударный импульс (рис. 3). Число столбцов определяется произвольно, оно зависит от сложности функции, описывающей ударный импульс. Синтез ударника осуществляется путем его составления из цилиндрических ступеней одинаковой длины, различного (или одинакового) диаметра, расположенных на одной оси (рис. 4). Значения диаметра

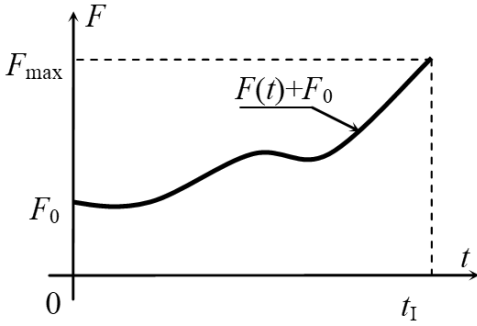


Рис. 1. Функция первой волны оптимального ударного импульса ( $F_{\max}$  — максимальная амплитуда импульса,  $t_1$  — длительность первой волны)  
 Fig. 1. The function of the first wave of the optimal impact pulse ( $F_{\max}$  is the maximum amplitude of the pulse,  $t_1$  is the duration of the first wave)

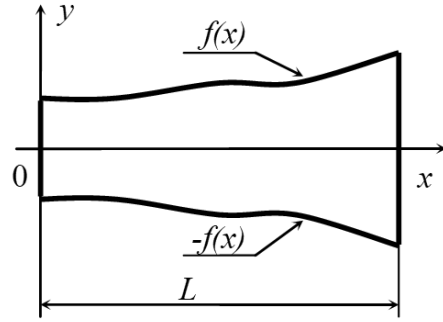


Рис. 2. Модель ударника, выполненная в виде тела вращения с криволинейной образующей боковой поверхности  
 Fig. 2. The model of the anvil-block, made in the form of a body of rotation with a curved side surface forming

тров  $d_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N - 1, N$ ) рассчитываются по высотам соответствующих столбцов, составляющих силовую гистограмму, а длины ступеней  $l_1$  — по их длинам (в данной задаче они одинаковы). По верхним (или нижним) окончаниям этих ступеней строится огибающая линия, уравнение которой и является решением поставленной задачи. Из рис. 3 и 4 видно, что чем из большего числа ступеней синтезиру-

ется боек, тем более точно будет определена функция образующей боковой поверхности.

Итерационный анализ графодинамического метода расчета ударного импульса позволил создать численно-аналитический метод расчета площадей и диаметров единичных цилиндрических ступеней для синтезирования бойка. Идея данного подхода заключается в том, что перед расчетом диаме-

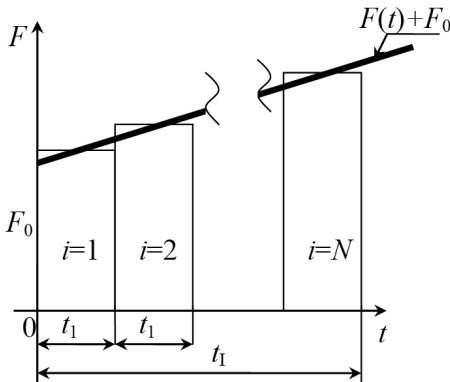


Рис. 3. Силовая гистограмма, построенная под графиком оптимального ударного импульса  
 Fig. 3. A power histogram constructed under the graph of the optimal impact pulse

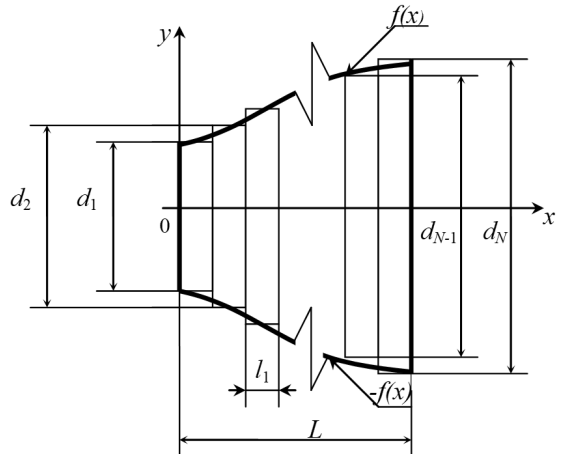


Рис. 4. Синтезируемая геометрия ударника, составленного из  $N$  цилиндрических ступеней  
 Fig. 4. The synthesized geometry of the anvil-block composed of  $N$  cylindrical steps



Рис. 5. Блок-схема численно-аналитического метода для расчета площадей и диаметров единичных цилиндрических ступеней синтезируемого бойка

Fig. 5. Block diagram of a numerical-analytical method for calculating the areas and diameters of single cylindrical steps of the synthesized anvil-block

тра текущей единичной цилиндрической ступени все известные величины, участвующие в вычислении, заменяются их численными значениями, что упрощает получаемые математические выражения. Блок-схема этого метода приведена на рис. 5. Решение задачи синтеза автоматизировано путем написания расчетной *maple*-процедуры в математическом приложении MAPLE.

### Результаты исследований

Итогом работы стало создание программного модуля (свидетельство ПЭВМ №2019619331, зарегистр. 16.07.2019) состоящего из двух *maple*-процедур, описанных выше. Модуль позволяет синтезировать боек переменного сечения, генерирующий оптимальный ударный импульс, рассчитанный по физико-механическим свойствам разрушаемой горной породы.

Рассмотрим алгоритмическую схему работы модуля на примере синтеза ударника, генерирующего оптимальный ударный импульс для разрушения гранита.

Этап I. «Синтез ударного импульса по зависимости «сила — внедрение»

Для определения физико-механических свойств гранита, определяющих оптимальный ударный импульс, была снята экспериментальная диаграмма «сила–внедрение» (рис. 6) на испытательном комплексе типа ИК-500.01. По результатам аппроксимации методом наименьших квадратов найдены функциональные зависимости «сила–внедрение», которые могут быть записаны в двух видах:

– как степенная функция

$$P(h) = k_1 + k_2 \sqrt{k_3^2 + h^2},$$

– как гиперболическая функция

$$P(h) = k_4 (1 + (k_5 h)^{k_6}).$$

Здесь значения коэффициентов  $k_i$ , характеризующих податливость породы разрушению, определяются экспериментально.

Вспомогательный этап «Анализ ударной системы»

Определение численных значений параметров, характеризующих ударную систему машины:  $S_0$  — площадь поперечного сечения штанги-волновода;  $\rho$ ,  $E$  — плотность и модуль упругости материала соударяющихся тел (как правило, они выполнены из одинаковых по свойствам материалов);  $V_0$  — предударная скорость бойка.

Входными параметрами *maple*-процедуры синтеза оптимального ударного импульса являются: функция, задающая диаграмму «сила–внедрение», и численные значения характеристик ударной системы. По исходным данным рассчитывается численное значение начальной силы удара, согласно формуле

$$F_0 = \frac{S_0 V_0 \sqrt{E\rho}}{2}.$$

Итогом выполнения этой процедуры является функция  $F(t)$ , определяющая рост силы в первой волне оптимального ударного импульса (рис. 7).

Этап II. «Синтез геометрии бойка ударного механизма»

Область определения функции оптимального ударного импульса разбивается на  $N$  одинаковых отрезков (в данном примере  $N=80$ ). Формируется силовая гистограмма, и численные значения высот силовых столбцов записываются в одномерный массив  $F_i$  согласно

$$F_{2i-1} = F_{2i} = \frac{N}{2t_I} \int_{\frac{2t_I(i-1)}{N}}^{\frac{2t_I i}{N}} F(t) dt.$$

Входными параметрами *maple*-процедуры синтеза геометрии бойков

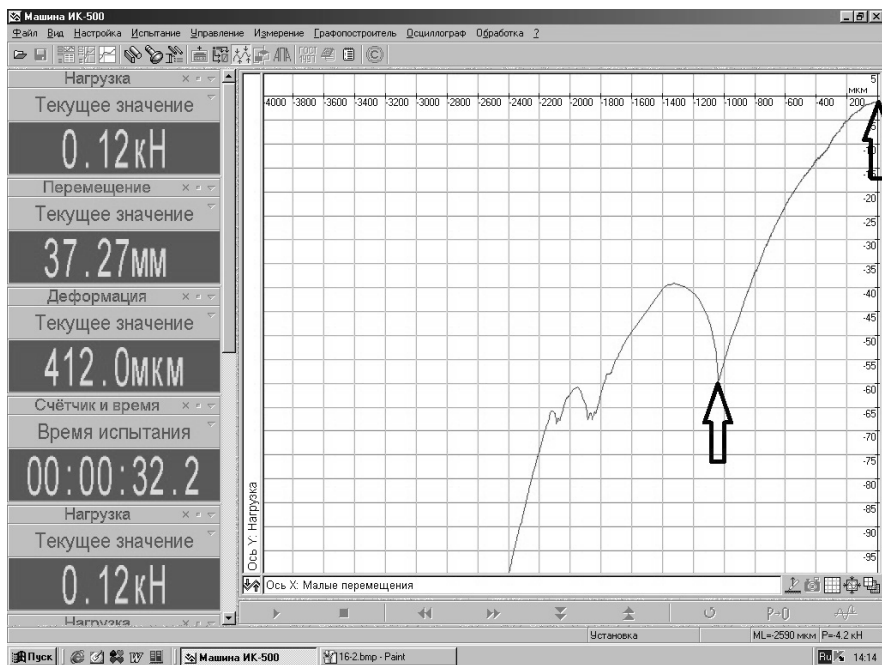


Рис. 6. Диаграмма «сила–внедрение» для гранита  
 Fig. 6. The “force–implentation” diagram for granite

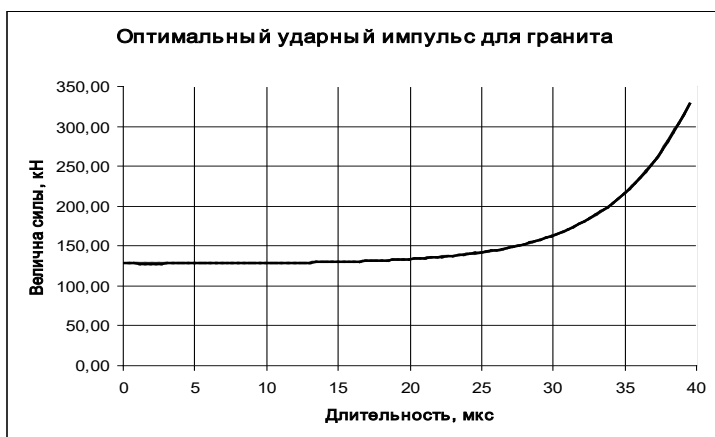


Рис. 7. Оптимальный ударный импульс для разрушения гранита  
 Fig. 7. Optimal impact pulse for granite destruction

являются массив высот силовых столбцов  $F_i$  и численные значения характеристик ударной системы. Итогом работы этой процедуры являются два массива:  $S_i$  — площадей цилиндрических ступеней, и  $d_i$  — диаметров цилиндрических ступеней. По элементам любого из этих

массивов можно синтезировать ударник (рис. 8), генерирующий оптимальный ударный импульс. Ударник такого вида имеет существенный недостаток. Он заключается в том, что данный боек невозможно встроить в корпус машины ударного действия ввиду отсутствия

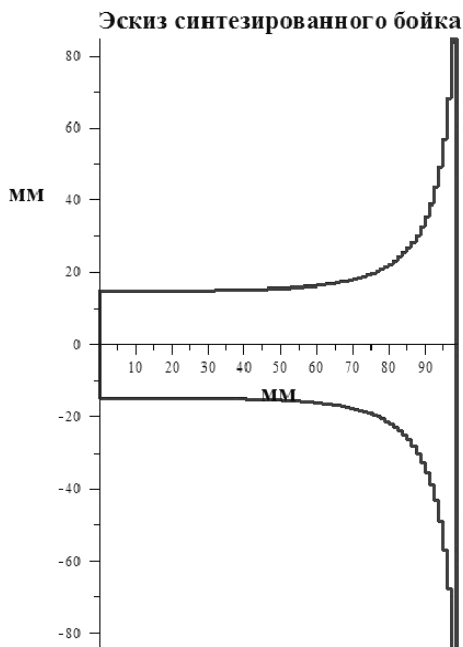


Рис. 8. Эскиз бойка, генерирующего оптимальный ударный импульс для разрушения гранита

Fig. 8. A sketch of an anvil-block generating an optimal impact pulse for the destruction of granite

цилиндрической ступени, обеспечивающей устойчивое положения бойка в корпусе машины. Одним из способов решения этой проблемы является снабжение ударника оболочкой, выполненной в виде полого цилиндра, имеющего одну геометрическую ось с синтезированным бойком (рис. 9).

Предложенный способ представления синтезируемых форм бойков обеспечивает приведенную геометрию бойка, идентичную синтезируемой, в силу того, что толщина цилиндрической оболочки задана постоянной по всей длине бойка.

### Выводы

Таким образом, разработанный и автоматизированный числен-

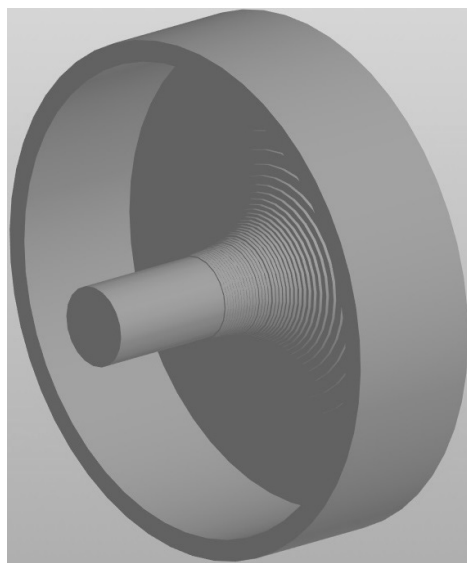


Рис. 9. 3D-модель синтезированного бойка, снабженного цилиндрической оболочкой  
Fig. 9. A 3D model of a synthesized anvil-block equipped with a cylindrical shell

ный метод нахождения геометрической формы бойка согласно заданной характеристике горной породы «сила — внедрение» обеспечивает повышение эффективности разрушения породы, уменьшая до минимума энергию отраженной волны. Программный модуль позволяет вычислять геометрические параметры ударника путем задания оптимального ударного импульса, соответствующего свойствам разрушаемой породы. Продемонстрированный пример использования программы для синтеза ударника, генерирующего оптимальный для разрушения гранита импульс, вместе с предложенным техническим решением исполнения синтезированного бойка свидетельствует о возможности повышения производительности буровых работ на основе учета эффекта влияния геометрических параметров элементов ударного узла машины.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толстунов С. А., Половинко А. В. Определение эффективности применения машин ударного действия при добыче крепких горных пород // Записки Горного института. – 2013. – Т. 205. – С. 36–39.

2. 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.

3. Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н., Чещин Д. О. Обоснование принципиальных схем отклоняющих устройств в установках горизонтального направленного бурения скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 3. – С. 106–116.

4. Саруев Л. А., Шадрина А. В., Мельнов К. В., Саруев А. Л. Результаты экспериментальных исследований гидроимпульсного механизма для бурения пилотных скважин при прокладке трубопроводов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 103–113. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3468.

5. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022, vol. 55(3), pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

6. Репин А. А., Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И., Попелюх А. И. Повышение мощности малогабаритных погружных пневмоударников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 86–93.

7. Литвиненко В. С., Двойников М. В. Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241, №1. – С. 105–112. – DOI: 10.31897/pti.2020.1.105.

8. Керимов Э. Э. Гидравлические машины ударного действия и их практическое применение // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 10. – С. 481–489.

9. Юнгмейстер Д. А., Исаев А. И., Ячейкин А. И., Соболева П. Д. Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 28–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36.

10. Litvinenko V. S., Vasiliev N. I., Lipenkov V. Ya., Dmitriev A. N., Podoliak A. V. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica // Annals of Glaciology. 2014, vol. 55(68), pp. 173–178. DOI: 10.3189/2014AoG68A040.

11. Кызыров К. Б., Митусов А. А., Решетникова О. С. Проектировочные исследования параметров гидромолота для горной и строительной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 9. – С. 220–226. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-220-226.

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. Червов В. В., Тищенко И. В., Червов А. В., Ваняг Ю. В. Разработка энергонасыщенного пневматического молота на основе исследований взаимодействия его физической модели с грунтом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 1. – С. 95–106. DOI: 10.15372/FTPRPI20210110.

14. Юнгмайстер Д. А., Гасымов Э. Э., Исаев А. И. Обоснование конструкции и параметров устройства для регулирования потока воздуха в погружных пневмоударниках

станков шарошечного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6–2. — С. 251–267. — DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_251.

15. *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.

16. *Симонов П. С.* Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 1. — С. 71–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.

17. *Гринько А. А., Сысоев Н. И., Гринько Д. А.* Повышение эффективности процесса сколообразования при ударно-поворотном воздействии долота на горную породу // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 102–115. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-102-115.

18. *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.

19. *Лагунова Ю. А., Митусов А. А., Решетникова О. С.* Специфические особенности эксплуатации механизмов ударного действия // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2016. — Т. 1. — С. 72–75.

20. *Комиссаров А. П., Галызин С. С.* Выбор параметров буровых машин ударного действия с позиции упругих волн // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 5. — С. 84–88.

21. *Теплякова А. В., Азимов А. М., Алиева Л., Жуков И. А.* Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 9. — С. 120–132. — doi.org/10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_120.

22. *Долгий И. Е., Николаев Н. И.* Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин // Записки Горного института. — 2016. — Т. 221. — С. 655–660. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.655.

23. *Болобов В. И., Ле Т. Б., Чупин С. А., Плащинский В. А.* Зависимость наработки пики гидромолота от износостойкости ее материала // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 5. — С. 68–79. DOI 10.25018/0236-1493-2020-5-0-68-79.

24. *Болобов В. И., Плащинский В. А., Борисов С. В., Бинь Л. Т.* О соотношении параметров разрушения породы в статических и динамических условиях // Обогащение руд. — 2021. — № 5. — С. 3–9. DOI: 10.17580/or.2021.05.01.

25. *Лазуткин С. Л., Лазуткина Н. А.* Определение рациональных параметров исполнительных элементов ударной системы адаптивного ударного устройства // Современные наукоемкие технологии. — 2019. — № 5. — С. 58–63.

26. *Ding W.-S., Tian L., Liu K.* Analysis of dynamic characteristic of transient impact from hydraulic hammer // Huanan Ligong Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). 2016, vol. 44, no. 11, pp. 63–70. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2016.11.010.

27. *Andersson H., Sigfridsson E., Simonsson K., Leidermark D., Hilding D., Schill M.* Validation of a co-simulation approach for hydraulic percussion units applied to a hydraulic hammer // Advances in Engineering Software. 2019, vol. 131, pp. 102–115. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.12.001.


28. *Ямпольский Д. З.* Численное моделирование продольного удара. Сравнение с экспериментом // Вестник научно-технического развития. — 2019. — № 9(145). — С. 30–51. — DOI: 10.18411/vntr2019-145-4.

29. Жабин А. Б., Лавит И. М., Керимов З. Э. Результаты теоретических исследований силовой импульсной системы гидроударника // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 5(151). – С. 9–15. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-9–15.

30. Dong Ge, Zhongwei Suo, Jianming Peng, Kun Bo, Jingqing Cheng, Pengyu Zhang. Dynamic responses of a fluidic hammer with hydraulic-damping-device // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021, vol. 200, p. 108243. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108243.

31. Kenneth Omokhagbo Afebu, Yang Liu, Evangelos Papatheou. Feature-based intelligent models for optimisation of percussive drilling // Neural Networks. 2022, vol. 148, pp. 266–284. DOI: 10.1016/j.neunet.2022.01.021.

32. Zhukov I. A., Repin A. A., Timofeev E. G. Automated calculation and analysis of impacts generated in mining machine by anvil blocks of complex geometry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 134. P. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012071.

33. 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: 10.17875/prin.12.404–412. 

## REFERENCES

1. Tolstunov S. A., Polovinko A. V. Determination of the effectiveness of the use of impact machines in the extraction of strong rocks. *Journal of the Mining Institute*. 2013, vol. 205, pp. 36–39. [In Russ].

2. Shadrina A. V., Saruev L. A. Analysis and scientific generalization of the results of studies of the shock-rotational method of drilling small-diameter wells from underground mine workings. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2015, vol. 326, no. 8, pp. 120–136. [In Russ].

3. Danilov B. B., Smolyanitsky B. N., Cheshchin D. O. Substantiation of schematic diagrams of deflecting devices in installations of horizontal directional drilling of wells. *Physico-technical problems of mineral development*. 2015, no. 3, pp. 106–116. [In Russ].

4. Saruev L. A., Shadrina A. V., Melnov K. V., Saruev A. L. Results of experimental studies of the hydraulic pulse mechanism for drilling pilot wells during pipeline laying. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021, vol. 332, no. 12, pp. 103–113. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2021/12/3468.

5. Aldannawy H., Rouabhi A., Gerbaud L. Percussive drilling: Experimental and numerical investigations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022, vol. 55(3), pp. 1555–1570. DOI: 10.1007/s00603-021-02707-5.

6. Repin A. A., Timonin V. V., Alekseev S. E., Kokoulin D. I., Popelyukh A. I. Increasing the power of small-sized submersible pneumatic hammers. *Physico-technical problems of mineral development*. 2016, no. 6, pp. 86–93. [In Russ].

7. Litvinenko V. S., Dvoynikov M. V. Methodology for determining the parameters of drilling mode for directional straight sections of well using screw downhole motors, *Journal of the Mining Institute*. 2020, vol. 241, no. 1, pp. 105–112. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.105. [In Russ].

8. Kerimov Z. E. Hydraulic impact machines and their practical application. *New of the Tula State University. Technical sciences*. 2019, no. 10, pp. 481–489. [In Russ].

9. Yungmeister D. A., Isaev A. I., Yacheikin A. I., Soboleva P. D. Field study of DTH hammer operation with rock drilling machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3, pp. 28–36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0–28–36.

10. Litvinenko V. S., Vasiliev N. I., Lipenkov V. Ya., Dmitriev A. N., Podoliak A. V. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 2014, vol. 55(68), pp. 173–178. DOI: 10.3189/2014AoG68A040.

11. Kyzyrov K. B., Mitusov A. A., Reshetnikova O. S. Design research of parameters of hydraulic hammer for mining and construction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no.9, pp. 220–226. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0–220–226.
12. Yungmeister D. A., Krupenski I., Lavrenko S. A. Analysis of the options of modernization of roller-bit drilling machines. *Journal of the Mining Institute.* 2018, vol. 231, pp. 321–325. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.321.
13. Chervov V. V., Tishchenko I. V., Chervov A. V., Vanag Y. V. Design of an energy-intensive pneumatic hammer based on the physical simulation of the hammer–soil interaction. *Journal of Mining Science.* 2021, vol. 57, no. 1, pp. 86–95. DOI: 10.1134/S1062739121010105.
14. Jungmeister D. A., Gasimov E. E., Isaev A. I. Substantiation of the design and parameters of the device for regulating the air flow in down-the-hole hammers of roller-cone drilling rigs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; (6-2): 251–267. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_251.
15. 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.
16. Simonov P. S. Single-impact rock crushing experiment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no.1, pp. 71–79. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0–71–79.
17. Grinko A. A., Sysoev N. I., Grinko D. A. Improving shearing efficiency of percussion rotary drill bits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 102–115. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0–102–115.
18. Bolobov V. I., Plashchinsky V. A. Influence of impact duration on fracture efficiency in rocks and on plastic deformation of metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 78–96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_78.
19. Lagunova Yu. A., Mitusov A. A., Reshetnikova O. S. Specific features of the operation of impact mechanisms. *Actual problems of increasing the efficiency and safety of mining and oilfield equipment operation.* 2016, vol. 1, pp. 72–75. [In Russ].
20. Komissarov A. P., Glazyrin S. S. Parameters selection for drilling machines of percussive action. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal.* 2016, no. 5, pp. 84–88. [In Russ].
21. Teplyakova A. V., Azimov A. M., Alieva L., Zhukov I. A. Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; (9): 120–132. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_120. [In Russ].
22. Dolgiy I. E., Nikolaev N. I. Resistance of rocks to crushing during well drilling. *Journal of the Mining Institute.* 2016, vol. 221, pp. 655–660. [In Russ]. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.655.
23. Bolobov V. I., Le T. B., Chupin S. A., Plaschinsky V. A. Dependence of the hydraulic hammer peak operating time on the wear resistance of its material. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 5, pp. 68–79. [In Russ]. DOI 10.25018/0236-1493-2020-5-0–68–79.
24. Bolobov V. I., Plashchinsky V. A., Borisov S. V., Le-Thanh B. On the ratio of rock fracture parameters in static and dynamic conditions. *Obogashchenie Rud.* 2021, no. 5, pp. 3–9. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2021.05.01.
25. Lazutkin S. L., Lazutkina N. A. Determination of rational parameters of the executive elements of the shock system of an adaptive shock device. *Modern high-tech technologies.* 2019, no. 5, pp. 58–63. [In Russ].
26. Ding W.-S., Tian L., Liu K. Analysis of dynamic characteristic of transient impact from hydraulic hammer. *Huanan Ligong Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban).* 2016, vol. 44, no. 11, pp. 63–70. DOI: 10.3969/j.issn.1000–565X.2016.11.010.
27. Andersson H., Sigfridsson E., Simonsson K., Leidermark D., Hilding D., Schill M. Validation of a co-simulation approach for hydraulic percussion units applied to a hydraulic

hammer. *Advances in Engineering Software*. 2019, vol. 131, pp. 102–115. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.12.001.

28. Yampolsky D. Z. Numerical simulation of longitudinal impact. Comparison with experiment. *Bulletin of Science and Technical Development*. 2019, no. 9(145), pp. 30–51. [In Russ]. DOI: 10.18411/vntr2019–145–4.

29. Zhabin A. B., Lavit I., Kerimov Z. E. Results of theoretical studies of the power impulse system of a percussion instrument. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2020, no. 5(151), pp. 9–15. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-9–15.

30. Dong Ge, Zhongwei Suo, Jianming Peng, Kun Bo, Jingqing Cheng, Pengyu Zhang. Dynamic responses of a fluidic hammer with hydraulic-damping-device. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021, vol. 200, p. 108243. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108243.

31. Kenneth Omokhagbo Afebu, Yang Liu, Evangelos Papatheou. Feature-based intelligent models for optimisation of percussive drilling. *Neural Networks*. 2022, vol. 148, pp. 266–284. DOI: 10.1016/j.neunet.2022.01.021.

32. Zhukov I. A., Repin A. A., Timofeev E. G. Automated calculation and analysis of impacts generated in mining machine by anvil blocks of complex geometry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 134. P. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012071.

33. Timofeev E. G., Zhukov I. A., Teplyakova A. V. Program complex for automated calculation of the geometry of impact units of machines. *Programmnaya Ingerenia*. 2021, vol. 12, no. 8, pp. 404–412. [In Russ]. DOI: 10.17875/prin.12.404–412.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тимофеев Евгений Геннадьевич<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: veefomit77777@yandex.ru;

Теплякова Анна Васильевна<sup>2</sup> – студент, e-mail: teplyakovanu@mail.ru;

Жуков Иван Алексеевич<sup>2</sup> – докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроения, <http://orcid.org/0000-0001-9068-3201>, e-mail: tmmiok@yandex.ru;

Голиков Николай Сергеевич<sup>2</sup> – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроения, e-mail: golikovnikolay@yandex.ru;

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, Россия.

**Для контактов:** Жуков Иван Алексеевич, e-mail: tmmiok@yandex.ru.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Timofeev E. G.<sup>1</sup>, graduate student, e-mail: veefomit77777@yandex.ru;

Teplyakova A. V.<sup>2</sup>, student, e-mail: teplyakovanu@mail.ru;

Zhukov I. A.<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), associate professor, professor of the Department of Mechanical Engineering, <http://orcid.org/0000-0001-9068-3201>, e-mail: tmmiok@yandex.ru;

Golikov N. S.<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Department of Mechanical Engineering, e-mail: golikovnikolay@yandex.ru;

<sup>1</sup> Siberian state industrial university, Novokuznetsk, 654007, Russia;

<sup>2</sup> Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, 21st line, 2, Russia.

**Corresponding author:** Zhukov I. A., e-mail: tmmiok@yandex.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.