

УДК 004.9:531.66

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЕ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

¹Жуков И.А., ²Тимофеев Е.Г.

¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, e-mail: tmmiok@yandex.ru;

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,
e-mail: veefomit7777@yandex.ru

Для обработки и разрушения горных пород широко используются механизмы ударного действия (перфораторы, отбойные молотки и т.п.). Основным элементом, генерирующим энергию в этих машинах, являются ударники (или бойки) – тела вращения различной геометрической формы, приводящиеся в возвратно-поступательное движение приводом механизма. Для передачи генерируемой энергии разрушаемому объекту используется стержневая система переменного сечения (ударник – волновод – инструмент). При нанесении удара в волноводе генерируется ударный импульс, внешний вид которого определяется формой ударника. Доказано, что для разрушения различных пород, помимо величины генерируемой энергии, важна и форма ударного импульса. В работе рассмотрен численный метод аналитического определения формы ударного импульса по физическим и геометрическим параметрам ударника. Приведен алгоритм расчета и показано его применение на практике в виде расчетной основы для комплекса программ, позволяющих определять ударные импульсы от ударников различной геометрической формы: начиная с простых тел вращения и заканчивая бойками произвольной формы. Преимуществом разработанного комплекса программ является его кроссплатформенность, что делает его независимым от коммерческого программного обеспечения и повышает конкурентоспособность. Рассмотрены методы моделирования цельнотельных ударников переменного сечения, выполненных в виде тел вращения различной геометрической формы.

Ключевые слова: удар, моделирование, алгоритм расчета, ударная система, боек, волновод, ударный импульс

MATHEMATICAL AND COMPUTER SIMULATION OF IMPACT PROCESSES IN ROD SYSTEM OF IMPACT MACHINES

¹Zhukov I.A., ²Timofeev E.G.

¹Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg, e-mail: tmmiok@yandex.ru;

²Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, e-mail: veefomit7777@yandex.ru

Impact mechanisms (perforators, hammers, etc.) are widely used for treatment and destruction of rocks. The main element generating energy in these machines are hammers (or anvil-blocks) – bodies of revolution of various geometric shape, which are reciprocated by the mechanism drive. To transfer the generated energy to the destroyed object, a rod system of variable section (hammer-waveguide-tool) is used. When striking in the waveguide, an impact pulse is generated, the appearance of which is determined by the shape of the striker. It has been proved that the shape of the shock pulse is also important for the destruction of various rocks in addition to the amount of energy generated. The paper considers a numerical method of analytical determination of shock pulse shape by physical and geometric parameters of the striker. The calculation algorithm is presented and its application is shown in practice in the form of a calculation basis for a set of programs that allow determining shock impulses from hammers of various geometric shape: starting from simple bodies of rotation and ending with anvil-blocks of arbitrary shape. The advantage of the developed set of programs is its cross-platform, which makes it independent of commercial software and increases competitiveness. Methods of modeling of all-body hammers of variable section made in the form of bodies of revolution of different geometric shape are considered.

Keywords: impact, modeling, calculation algorithm, shock system, anvil-block, waveguide, shock impulse

Начиная с 1960-х гг. широкое промышленное применение различных машин ударного действия [1–4] привело к необходимости разработки методов аналитического описания динамических процессов [5–7], возникающих в них. В настоящее время активное использование ЭВМ позволяет автоматизировать эти расчеты. В связи с этим возникают новые алгоритмы решения динамических задач, которые достаточно легко описываются математическим аппаратом алгоритмических языков программирования (например, Pascal, C++ и т.д.). Составленные на этих языках программы являют-

ся кроссплатформенными, что определяет их независимость от коммерческого программного обеспечения. Это делает их конкурентоспособными на современном рынке прикладного программного обеспечения.

Описание продольного удара, применяемого в машинах ударного действия

Продольный удар – это физическое воздействие одного тела на другое, при котором бьющий и принимающий удар объекты до и после взаимодействия движутся вдоль одной прямой. Бьющим называют тело вращения (стержень) переменного се-

чения, в дальнейшем именуемое *бойком*, или *ударником* (рис. 1). Принимающим телом является цилиндр (стержень) постоянного сечения, именуемый в дальнейшем *волновод*, он заканчивается инструментом (коронкой), который внедряется в разрушаемый объект. Основной динамической характеристикой ударной системы является ее *энергоемкость*, которая зависит от амплитуды генерируемого силового импульса и его длительности.

Цели исследования: создание численного (аналитического) метода расчета ударного импульса, генерируемого при продольном ударе в стержневых системах переменного сечения, используемых в машинах ударного действия, и разработка комплекса программ, рассчитывающих ударные импульсы от бойков переменного сечения сложной формы.

Материалы и методы исследования

Ударники, применяемые в механизмах, представляют собой сложные тела враще-

ния, определяемые образующей, которая сформирована из нескольких простых кривых, заданных k -функциями вида $y_k = f(x)$ (рис. 2А), имеющих области определения L_1, L_2, \dots, L_k соответственно. Количество таких кривых может быть любым, оно определяет число ступеней ударника.

Аналитический метод расчета ударного импульса базируется на теории Сен-Венана, где решается задача формирования импульса силы на границе изменения поперечного сечения двух соударяющихся тел [8–10].

Решая подобную задачу, мы предлагаем представить ударник в виде n -го количества цилиндрических ступеней одинаковой длины l_1 , диаметр которых меняется скачкообразно согласно значениям функций $y_k = f(x)$. В итоге получается, что боек превращается в «брикет» (расчетный ударник), состоящий из жестко связанных стержней идеальной формы, который движется со скоростью V_0 и наносит удар по полубесконечному неподвижному волноводу, имеющему диаметр d_0 (рис. 2Б).

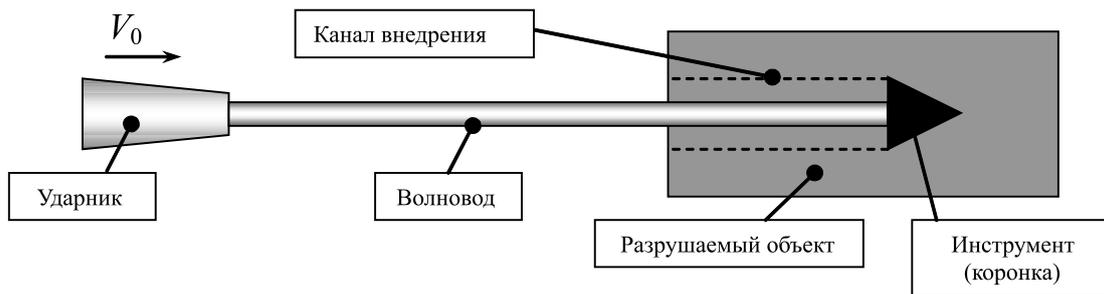


Рис. 1. Схема стержневой ударной системы

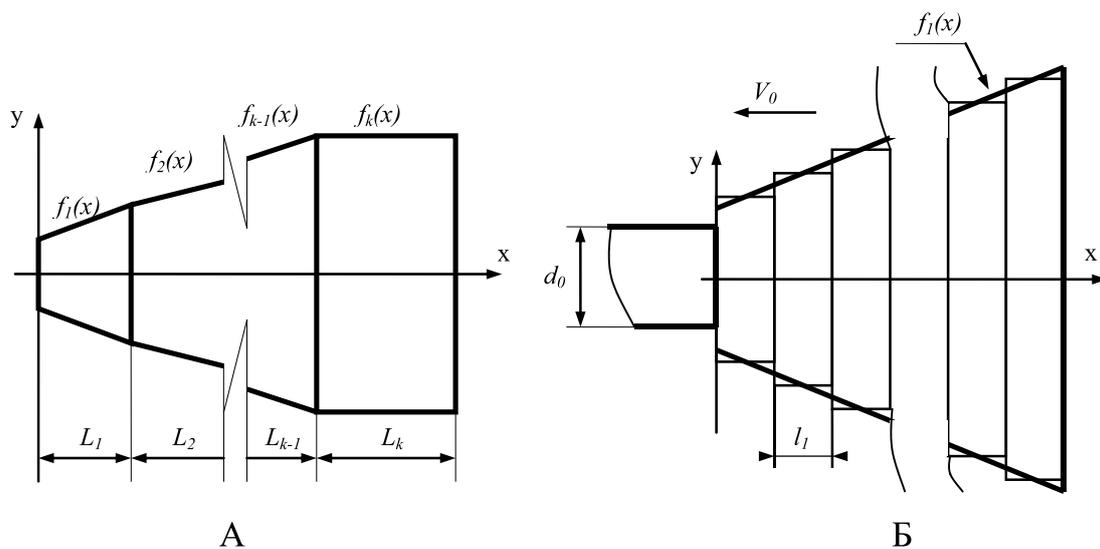


Рис. 2. (А) Формирование сложного ударника. (Б) Представление ударника в виде цилиндрических ступеней конечной длины (на примере первой функции $f_1(x)$, составляющей образующую бойка)

При нанесении удара по волноводу в нем возникают силы, величины которых изменяются со временем. Величины этих сил рассчитываются по численным значениям площадей расчетных ступеней, на которые разбит ударник, и сложением прямых и обратных продольных волн деформации, возникающих при нанесении удара и распространяющихся со скоростью звука. Ранее для расчета величин этих сил использовался графоаналитический метод [11]. Его анализ показал, что этот метод можно трансфор-

мировать в численный и реализовать его на языке программирования (блок-схема этого метода представлена на рис. 3) [12]. Структурно этот расчет можно разбить на шесть операционных этапов.

Этап № 1. Формирование массива, содержащего численные значения площадей цилиндрических ступеней, на которые разбит ударник: S_i , где i – номер ступени (всего n ступеней), S_0 – площадь поперечного сечения волновода (в рамках решаемой задачи постоянная величина).

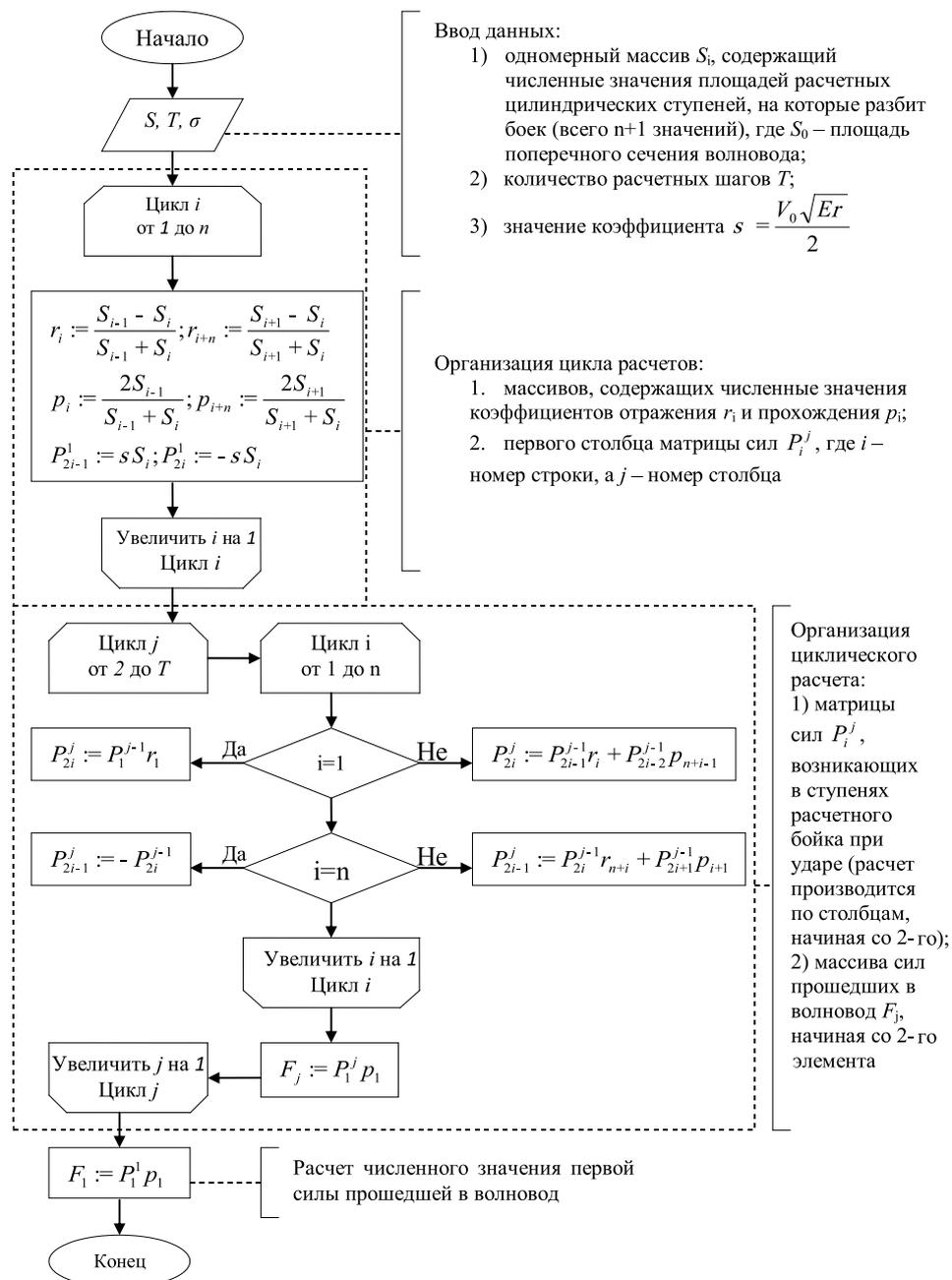


Рис. 3. Блок-схема численного метода расчета сил, прошедших в волновод при продольном ударе, нанесенном ударником переменного сечения

Определение физических параметров системы: E – модуль упругости и ρ – плотность материала бойка и волновода (в рамках решаемой задачи материалы одинаковые), V_0 – предупредительная скорость бойка.

Определение расчетных параметров системы: a – скорость звука в материале бойка и волновода; T – количество расчетных шагов (равных временных отрезков, на которые разбит весь процесс одного удара).

Этап № 2. Расчет коэффициентов прохождения p_i и отражения r_i продольной волны смещений в ступенях ударника.

Этап № 3. Расчет элементов матрицы сил P_i^j , возникающих в ступенях бойка при соударении с течением времени.

Этап № 4. Формирование массива сил, прошедших через границу соударения бойка и волновода.

Этап № 5. Расчет времени действия каждой силы t_i и времени длительности t всего импульса.

Этап № 6. Построение графика ударного импульса, представляющего собой гистограмму сил, прошедших в волновод за все расчетное время t (рис. 4).

Результаты исследования и их обсуждение

На базе разработанного численного метода создан комплекс расчетных программ, которые отличаются друг от друга способами моделирования расчетных ударников. Все программы этого комплекса имеют схожую структуру и написаны на языке программирования PASCAL в среде LAZARUS.

Методы формирования ступенчатых (расчетных) ударников

I. Моделирование одноступенчатого ударника по известной массе и длине расчетной цилиндрической ступени. Программа «Ударный импульс 2.0» [13].

Под одноступенчатым ударником следует понимать реальное цилиндрическое тело переменного сечения, образующая которого сформирована из одной простой кривой, заданной функцией $f(x)$.

Данный метод предполагает не разбивать какой-то существующий ударник на расчетные ступени, а сформировать его из них путем добавления к имеющейся ступени новой, отличающейся по диаметру. Формирование ступеней следует проводить до тех пор, пока суммарная масса всех набранных элементов не станет равна заданной массе в пределах допустимой погрешности ($\approx 4-5\%$):

$$\sum_{i=1}^n \rho l_1 \pi f^2 \left(x = \frac{l_1(2i-1)}{2} \right) = m \pm m \frac{\varepsilon}{100\%}, \quad (1)$$

где i – номер текущей цилиндрической ступени; n – количество цилиндрических ступеней; ρ – плотность материала бойка и волновода; l_1 – длина цилиндрической ступени (задается произвольно и является параметром, определяющим число n и величину итоговой погрешности в каждом расчете);

$f^2 \left(x = \frac{l_1(2i-1)}{2} \right)$ – квадрат значения функции образующей от аргумента, равного координате середины текущей цилиндрической ступени; m – заданная масса ударника; ε – величина относительной погрешности.

Для реализации этого метода подошел алгоритм с предусловием (рис. 5). Его отличием от математической модели (1) является то, что погрешность не задается, а рассчитывается после формирования расчетного ударника, так как ее значение необходимо для оценки смоделированного в данном конкретном случае бойка (а конкретно – выбора длины расчетной ступени).

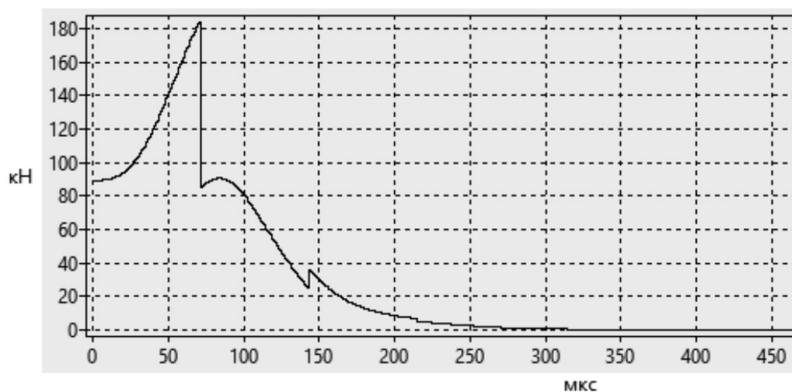


Рис. 4. График ударного импульса, представленный в виде гистограммы сил, прошедших в волновод, численные значения которых получены в ходе расчета по алгоритму численного метода

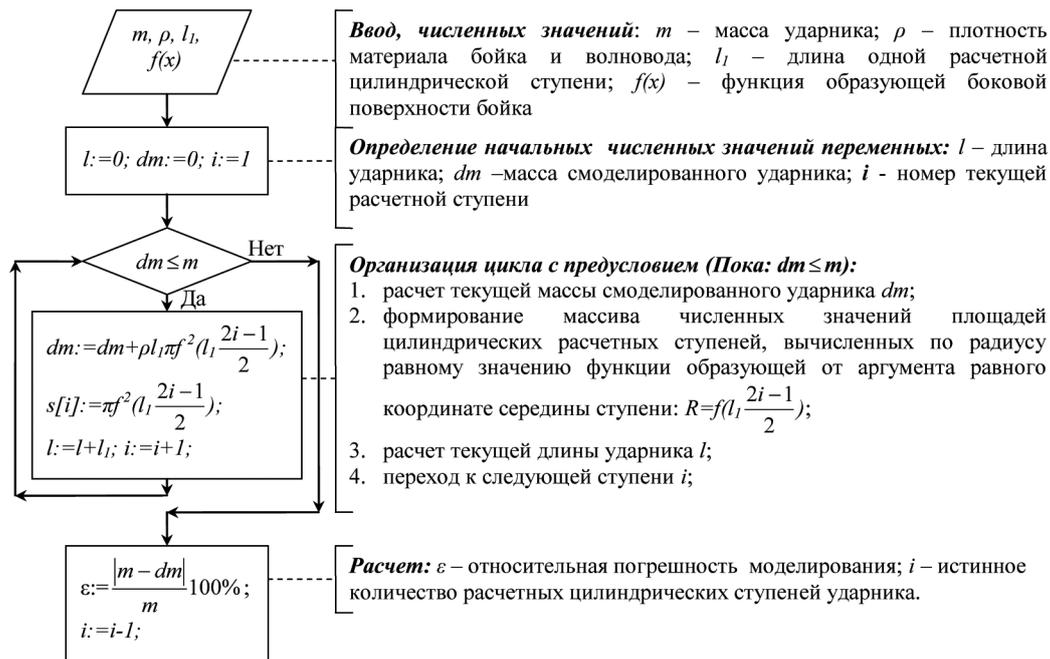


Рис. 5. Блок-схема алгоритма моделирования одноступенчатого ударника (образующая задана одной функцией $f(x)$) по известной массе и длине расчетной цилиндрической ступени



Рис. 6. Блок-схема моделирования многоступенчатого ударника по известным геометрическим параметрам и массе бойка

Данный метод предполагает разбиение уже существующего ударника на цилиндрические расчетные ступени одинаковой длины l_1 . Расчет величины диаметра текущей расчетной цилиндрической ступени следует производить по значению функции $y = f_k(x)$, определяющей текущую кривую в сложной образующей ударника:

$$d_i = f_k \left(l_1 \frac{2i+1}{2} \right), \quad (2)$$

где i – номер текущей расчетной цилиндрической ступени, а l_1 – ее длина. Выбор функции происходит путем проверки принадлежности значения аргумента функции в выражении (2) к области определения соответствующей функции:

$$y = \begin{cases} f_1(x), 0 \leq x \leq L_1; \\ f_2(x), L_1 \leq x \leq L_1 + L_2; \\ \dots \\ f_k(x), \sum_{m=1}^{k-1} L_m \leq x \leq \sum_{m=1}^k L_m. \end{cases} \quad (3)$$

II. Блок-схема моделирования многоступенчатого бойка [14] предложена на рис. 6. Следует отметить, что геометрические параметры (L_i – длина ступеней ударника и l_1 – длина расчетной цилиндрической ступени) могут быть определены по алгоритму моделирования одноступенчатого ударника (рис. 5) путем формирования каждой ступени индивидуально.

III. Моделирование ударника в стороннем приложении. Программа «Анализ ударного импульса» [15].

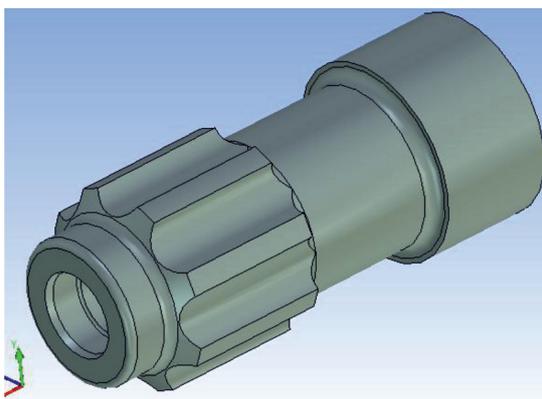


Рис. 7. 3D-модель бойка от погружного пневмоударника, выполненная в программе T-Flex

Большинство реальных ударников, применяемых на практике, не поддаются

численному моделированию способами, описанными выше, но предложенный численный метод работает и для таких тел. Для этого ударник моделируется в стороннем приложении (например, КомпАс, T-Flex и т.п.). Строится 3D-модель такого ударника (рис. 7) с использованием ресурсов приложения, далее она делится на цилиндрические ступени одинаковой длины l_1 с сопутствующим расчетом площади поперечного сечения каждой ступени. Численные значения этих площадей записываются в текстовый файл, который является входным параметром для формирования расчетного ударника цельнотельной формы (рис. 7).

Заключение

В ходе работы создан универсальный численный метод расчета сил, прошедших в волновод при нанесении удара цилиндрическим телом переменного сечения. На базе этого метода написан комплекс расчетных программ, позволяющих аналитически рассчитывать ударные импульсы от бойков различной формы (от простых до самых сложных). Также разработаны методы численного моделирования цельнотельных цилиндрических ударников переменного сечения, которые успешно реализованы на практике.

Список литературы

1. Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Зырянов Б.С. Пневматический ударный механизм грунтозаборного устройства // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 4 (652). С. 92–99.
2. Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Крутиков Е.И. Пневматический ударный механизм с комбинированным воздушораспределением // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 4. С. 114–118.
3. Репин А.А., Смоляницкий Б.Н., Алексеев С.Е., Попелюх А.И., Тимонин В.В., Карпов В.Н. Опыт создания в ИГД СО РАН погружных пневмоударников высокого давления для открытых горных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 5. С. 157–168.
4. Юнгмейстер Д.А., Горшков Л.К., Пивнев В.А., Судьенков Ю.В. Модернизация ударных буровых механизмов. СПб.: Изд-во «Политехника-сервис», 2012. 149 с.
5. Гилёв А.В., Шигин А.О. Моделирование ударных нагрузок при бурении сложноструктурных горных массивов // Фундаментальные исследования. 2012. № 11–1. С. 120–123.
6. Шадрин А.В., Саруев Л.А. Экспериментальное исследование влияния параметров ударной системы на разрушение гранита // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № S4 (1). С. 276–280.
7. Судьенков Ю.В., Бурак А.Я., Юнгмейстер Д.А., Пивнев В.А. Исследования ударной системой «поршень-боёк-инструмент» для расширения области использования процесса дробезга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 8. С. 288–294.
8. Еремьянц В.Э. К вопросу о рациональной форме бойков ударно-вращательных бурильных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 74–82.

9. Доронин С.В., Косолапов Д.В. Сравнительный анализ альтернативных конструктивных решений при проектировании и модернизации деталей машин импульсного действия // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 3 (39). С. 30–37.

10. Смоляницкий Б.Н., Репин А.А., Данилов Б.Б., Червов В.В., Тищенко И.В., Доронин С.В., Косолапов Д.В., Алексеев С.Е., Липин А.А., Тимонин В.В., Корчагин М.А., Черепанов А.Н., Оришич А.М., Малов А.Н., Марусин В.В. Повышение эффективности и долговечности импульсных машин для сооружения протяженных скважин в породных массивах / отв. ред. Б.Ф. Симонов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 204 с.

11. Иванов К.И., Варич М.С., Дусев В.И., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке полезных ископаемых. Изд. 2-е, перераб. М.: Недра, 1974. 408 с.

12. 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 Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 134. P. 012071. DOI: 10.1088/1755-1315/134/1/012071.

13. Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. Ударный импульс 2.0 // Свидетельство ПЭВМ № 2015662766. Заявка № 2015619792; поступление 13.10.2015; зарегистр. 01.12.2015.

14. Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. Удар многоступенчатым бойком // Свидетельство ПЭВМ № 2017613900. Заявка № 2016662568 поступление 22.11.2016; зарегистр. 03.05.2017.

15. Тимофеев Е.Г., Жуков И.А. Удар бойком сложной геометрической формы // Свидетельство ПЭВМ № 2019619495. Заявка № 20196118226; поступление 05.07.2019; зарегистр. 18.07.2019.