

УДК 622.23.05

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИНТЕЗИРОВАНИЯ ФОРМ БОЙКОВ УДАРНЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

И.А. Жуков, Е.В. Сараханова

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

E-mail: zhival@yandex.ru; selen@elec.ru

Показано решение проблемы совершенствования ударных систем путем синтезирования форм бойков графоаналитическим методом по форме генерируемого ударного импульса, наиболее эффективно соответствующего физико-механическим свойствам разрушаемого объекта.

### Ключевые слова:

Продольный удар, разрушение горной породы, импульс, боек, стержень.

### Key words:

Longitudinal impact, rock failure, pulse, striker, rod.

Совершенствование ударных систем технологического назначения связано с проблемой повышения эффективности разрушения горной породы ударными воздействиями. После соударения кинетическая энергия  $T_k$  бойка преобразуется в энергию ударного импульса  $E_1$ , которая частично в виде  $E_2$  отражается от среды и движется к ударному торцу бойка, при этом лишь часть энергии в виде  $E_3$  расходуется на разрушение среды, а энергия  $E_4$  уходит в среду и рассеивается (рис. 1). Критерием эффективности работы ударных систем является коэффициент передачи энергии (КПЭ) импульса [1]:

$$\eta = \frac{E_1 - E_2}{E_1}.$$

Энергия  $E_1$  определяется по падающему ударному импульсу, а  $E_2$  – по отраженному.

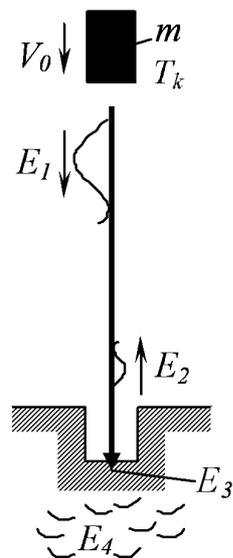


Рис. 1. Распределение предупредительной энергии бойка

В 1964 г. одним из известных ученых-исследователей теории удара Е.В. Александровым было сделано открытие [2], заключающееся в том, что коэффициент передачи энергии зависит не только от массы бойка  $m$  и его предупредительной скорости  $V_0$ , но и от форм

соударяющихся тел. Рациональное проектирование ударной системы должно обеспечить максимальный КПЭ при заданной энергии удара. При этом подбор целесообразной формы бойка является одним из наиболее действенных методов проектирования, приводящий к увеличению значения данного коэффициента, т. к. энергия падающего ударного импульса  $E_1$  определяется материалом, формой и размерами бойка. Достижение максимального значения коэффициента передачи энергии возможно при условии обеспечения максимума энергии падающего ударного импульса и минимума отраженного.

Для создания основ проектирования рациональных ударных систем необходимо научиться управлять полезной энергией в течение всего процесса ее преобразования от разгона бойка до непосредственного разрушения среды. Эта задача сводится к определению формы бойка в зависимости от формы ударного импульса, наиболее эффективно соответствующего физико-механическим свойствам разрушаемой среды. В результате становится возможным определение действующих нагрузок в ударной системе, выполнение расчетов на прочность, а также определение производительности. Целью данной задачи является создание методики отыскания и обоснования рациональных форм бойков для разрушения ударными системами сред с известными физико-механическими свойствами.

Решение этой задачи осуществляется посредством применения теории Сен-Венана, которая построена на тех допущениях, что при продольных колебаниях стержня его поперечные сечения остаются плоскими в процессе распространения волн продольной деформации. Продольные деформации растяжения и сжатия, которые возникают в стержне при ударе, сопровождаются некоторыми поперечными деформациями, но в силу малости ими пренебрегают при решении практических задач продольного удара. Считается, что материал стержня подчиняется закону Гука, т. е. деформации остаются в пределах упругости. Допускается также, что соприкосновение соударяющихся тел происходит в один и тот же момент времени по всей площади ударного торца.

В теории Сен-Венана процесс распространения волн упругой деформации в стержне при ударе описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где  $w(x,t)$  – функция смещения поперечного сечения стержня с координатой  $x$  в момент времени  $t$ ;  $a$  – скорость распространения волны в стержне.

Уравнение (1) было приведено Сен-Венаном в примечании к § 60 выполненного им перевода на французский язык книги Клебша [3. С. 386, 480]. Это решение задачи о продольном ударе было предложено также Буссинеском [4].

Решение уравнения (1) известно в форме Даламбера [5]

$$w(x,t) = f(x+at) + g(x-at),$$

где функция  $f(x+at)$  представляет волну, перемещающуюся в отрицательном направлении оси  $x$  со скоростью  $a$  (обратная волна);  $g(x-at)$  – волну, перемещающуюся в положительном направлении (падающая волна).

Уравнение (1) учитывает свойства материалов соударяющихся тел, но никак не учитывает их форму. Процесс распространения волн продольных колебаний в стержне переменного поперечного сечения может быть описан уравнением

$$a^2 \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + a^2 \cdot \frac{1}{S(x)} \cdot \frac{dS(x)}{dx} \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} - \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

где  $u(x,t)$  – функция смещения поперечного сечения стержня;  $S(x)$  – функция площади поперечных сечений стержня.

Данное уравнение может быть выведено, исходя из второго закона Ньютона или из теоремы об изменении количества движения. Оно показано в 1986 г. в работе Я.Г. Пановко [6]. Для стержня постоянного поперечного сечения ( $S(x)=const$ ) выражение (2) преобразуется в (1).

Таким образом, для определения формы импульса, генерируемого бойком какой-либо конкретной формы при ударе по стержню постоянно поперечного сечения, составляются уравнения движения сечений (1) для стержня и (2) для бойка. Из полученной системы дифференциальных уравнений с учетом начальных

$$u(x,0) = 0; \quad w(x,0) = 0; \quad \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = V_0; \quad \frac{\partial w(x,0)}{\partial t} = 0$$

и граничных условий

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(-l,t)}{\partial x} &= 0; & \frac{\partial w(\infty,t)}{\partial x} &= 0; \\ u(0,t) &= w(0,t); \\ S(x) \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} &= S_0 \frac{\partial w(0,t)}{\partial x}; \end{aligned}$$

где  $l$  – длина бойка;  $S_0$  – площадь поперечного сечения стержня; возможно определение ударного импульса, который связан с функцией смещения сечений стержня зависимостью

$$F(x,t) = ES_0 \frac{\partial w(x,t)}{\partial x},$$

где  $E$  – модуль упругости материала соударяющихся тел.

К настоящему времени аналитическое выражение ударных импульсов было получено для бойков нескольких различных форм [7], а именно для:

- цилиндрического бойка равного со стержнем сечения;
- цилиндрического, с сечением, большим сечением стержня;
- абсолютно жесткого;
- цилиндрического бойка с сечением, равным сечению стержня, с закругленным торцом;
- конического;
- гиперболического;
- цилиндро-гиперболического;
- полукатеноидального.

Решение поставленной задачи достигается также на основе синтеза формы бойка по форме ударного импульса. Наиболее важным фактором, определяющим конструкцию и параметры ударной системы, является характеристика объекта разрушения. Для рационального использования энергии удара необходимо обеспечение формирования в стержне импульса такой формы, которая бы соответствовала силам сопротивления разрушаемой среды. В связи с этим задача обоснования физико-механических свойств разрушаемой среды является основополагающей в решении проблемы синтеза бойков. Все разработки по определению и обобщению зависимости «сила – внедрение», характеризующей процесс внедрения инструмента в горную породу при ударном воздействии, преследуют цель поиска некоторой универсальной модели, которая хотя бы приближенно позволяла оценивать физико-механические свойства горной породы, определяющие эффективность ударного воздействия.

Ученые-исследователи в области теории удара предполагали различные зависимости  $P(h)$  – «сила – внедрение» [8, 9]. Анализ известных работ позволил сформулировать следующие предположения для горных пород высокой крепости:

- исходной точкой модели зависимости «сила – внедрение» является некоторая величина  $P_0$ , равная усилию, с которым инструмент прижат к породе непосредственно перед ударом, т. е. характеризующая взаимодействие инструмента и горной породы в начальный момент времени;
- зависимость «сила – внедрение» близка к линейной, но не может быть представлена только одним участком прямой линии;

- начальный участок модели не является линейным, и пренебрежение им не рационально с точки зрения необходимости более точного описания процесса динамического взаимодействия инструмента с горной породой.

Наиболее близкими к действительным зависимостям, по мнению авторов, являются [9] (рис. 2):

- для пород средней крепости – линейная:

$$P_{ск}(h) = P_0 + k \cdot h, \quad (3)$$

- для пород высокой крепости – экспоненциальная:

$$P_{вк}(h) = P_0 \cdot e^{k \cdot h}, \quad (4)$$

где  $P_0, k$  – коэффициенты, определяемые экспериментально, характеризующие объект разрушения.

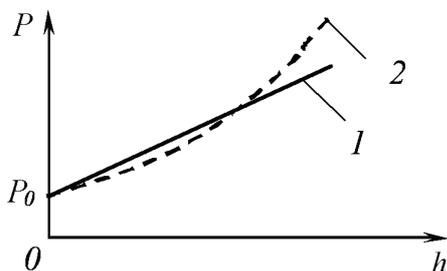


Рис. 2. Зависимости «сила – внедрение» для горной породы: 1) средней; 2) высокой крепости

Для проверки предположений было проведено экспериментальное исследование разрушения горной породы ударными воздействиями. Эксперимент проводился на универсальной испытательной машине (рис. 3). Блок горной породы, представленной гранитом с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова  $f=18$ , и ориентированная буровая коронка закреплялись на стенде, исключая возможность поворота вокруг собственной геометрической оси. На коронку подавалось усилие до появления характерной лунки выкола под инденторами. Параллельно компьютерной системой управления производилась запись диаграммы зависимости глубины внедрения коронки в гранит от величины нагружения (рис. 4).

Анализ результатов эксперимента показал, что для пород высокой крепости, в частности для гранита, зависимость глубины внедрения инструмента от величины подаваемого усилия практически соответствует предположению об ее экспоненциальной форме (4).

По результатам оценки физико-механических свойств разрушаемой среды, которую предстоит разрушать, необходимо определить форму ударного импульса, т. е. закономерность зависимости усилий от времени  $F(t)$ , возникающих в стержне при ударе по нему бойком. Форма импульса должна быть такова, что его амплитуда должна начинаться с некоторого определенного значения и возрастать с интенсивностью, соответствующей интенсивности роста сопротивляемости разрушаемой среды внедрению (рис. 5).



Рис. 3. Экспериментальное оборудование для исследования разрушения горной породы

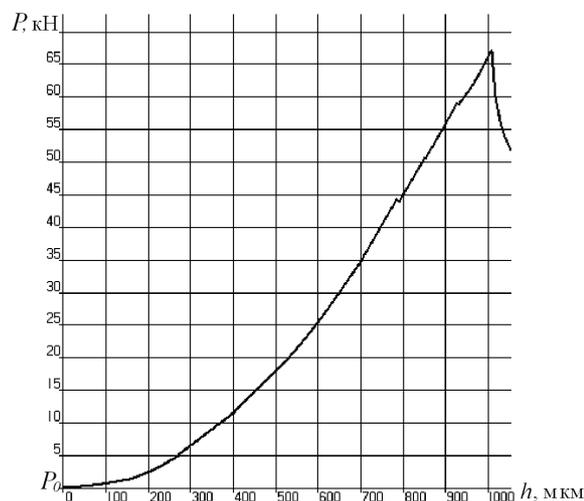


Рис. 4. Диаграмма зависимости глубины внедрения инструмента  $h$  от величины нагружения  $P$

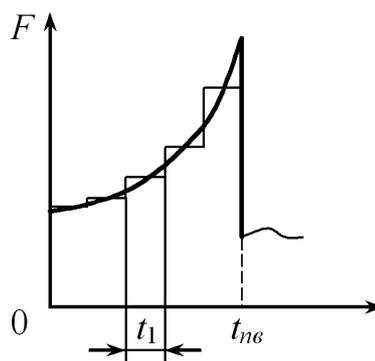


Рис. 5. Предполагаемая форма первой волны ударного импульса

В период времени взаимодействия падающего импульса с разрушаемой средой на границе стержня со средой должно выполняться краевое условие, согласно третьему закону Ньютона:

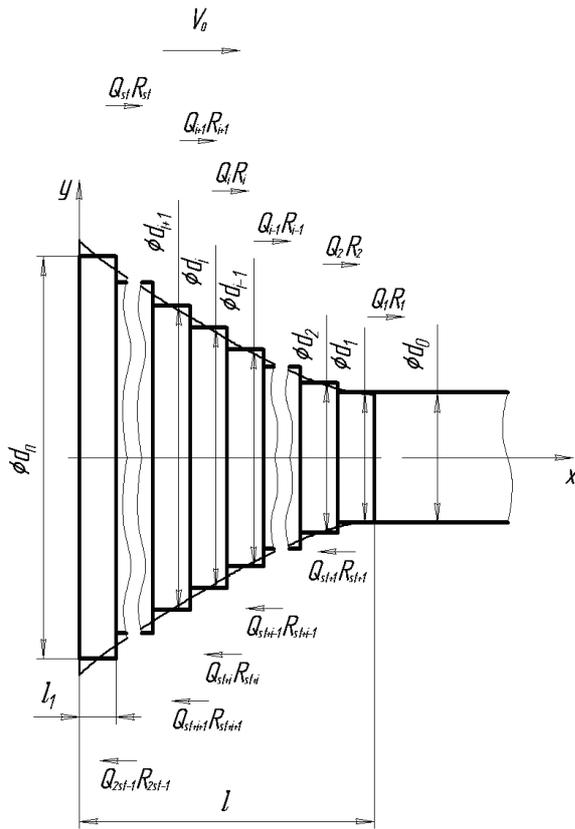


Рис. 6. Соударение ступенчатого бойка со стержнем

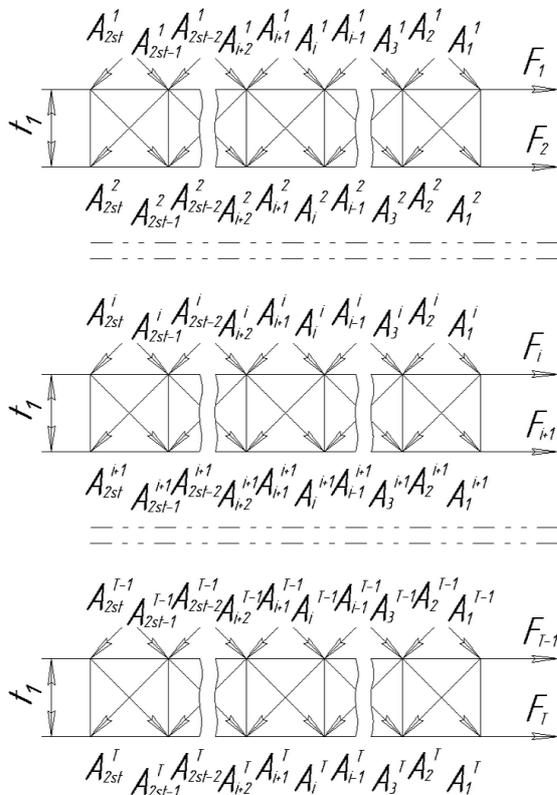


Рис. 7. Усилия, возникающие в бойке после соударения

$$F(t) = -P(h), \quad (5)$$

где ударный импульс определяется по закону Гука

$$F(t) = ES_0 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}. \quad (6)$$

В результате подстановки выражений  $P(h)$  и (6) в равенство (5), определяется зависимость усилий  $F(t)$  или деформаций  $\varepsilon(t)$ , развиваемых оптимальным по форме ударным импульсом, возникающих в стержне после соударения с бойком, в виде некоторой функции от времени  $t$ . По форме упругой волны деформации в дальнейшем синтезируется форма бойка.

Решение данной задачи достигается посредством применения графоаналитического метода [10], позволяющего достаточно точно и полно решить задачу о генерировании импульсов упругой деформации в ударных системах переменной формы. Синтезирование формы бойков ударных механизмов осуществляется по форме первой волны падающего ударного импульса. Используя данный метод в обратном порядке, изначально необходимо задать зависимость усилий  $F(t)$ , возникающих в стержне после соударения с бойком, в виде некоторой функции от времени и длительность первой волны  $t_{ne}$ .

Затем график зависимости  $F(t)$  разбивается на ступени в соответствии с задаваемым количеством расчетных шагов  $T$ . В результате разбиения находят точки  $F_i$ , где  $i=1,2,\dots,T$ . Время одного расчетного шага определяется как  $t_i=t_{ne}/T$ .

Синтезируемая форма бойка будет представлять собой многоступенчатый цилиндр (рис. 6), образующая боковой поверхности которого – ступенчатая функция аппроксимируется некоторой гладкой кривой. Количество ступеней цилиндра определяется по формуле  $st=T/2$ . При ударе бойка по цилиндрическому стержню, от места соударения будут распространяться волны продольной деформации в обе стороны со скоростью звука  $a$ . Согласно графоаналитическому методу вычисляются коэффициенты прохождения  $Q$  и отражения  $R$  волн для каждого сечения:

$$Q_j = \begin{cases} \frac{2S_{j-1}}{S_{j-1} + S_j}, & 1 \leq j \leq st, \\ \frac{2S_{j-st+1}}{S_{j-st+1} + S_{j-st}}, & (st+1) \leq j \leq (2 \cdot st - 1); \end{cases}$$

$$R_j = \begin{cases} \frac{S_{j-1} - S_j}{S_{j-1} + S_j}, & 1 \leq j \leq st, \\ \frac{S_{j-st+1} - S_{j-st}}{S_{j-st+1} + S_{j-st}}, & (st+1) \leq j \leq (2 \cdot st - 1), \end{cases}$$

где  $S_j$  – площади поперечных сечений ступеней бойка.

После соударения в бойке возникают усилия (рис. 7), величины которых вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
 A_{2k-1}^1 &= \frac{ES_k V_0}{2a}, \quad 1 \leq k \leq st; \\
 A_{2k}^1 &= -\frac{ES_k V_0}{2a}, \quad 1 \leq k \leq st; \\
 A_{2st-1}^{i+1} &= -A_{2st}^i, \quad 1 \leq i \leq T; \\
 A_{2k-1}^{i+1} &= A_{2k}^i R_{st+i} + A_{2k+1}^i Q_{i+1}, \quad 1 \leq k < st, \quad 1 \leq i \leq T; \\
 A_{2k}^{i+1} &= A_{2k+1}^i R_1, \quad 1 \leq i \leq T; \\
 A_{2k}^{i+1} &= A_{2k-1}^i R_i + A_{2k-2}^i Q_{st+i-1}, \quad 1 < k \leq st, \quad 1 \leq i \leq T.
 \end{aligned}$$

При ударе бойком по стержню в последнем возникают силы, которые определяются по формуле:

$$F_i = A_1^i Q_i, \quad 1 \leq i \leq T.$$

В результате проведенных вычислений было установлено, что каждая последующая сила  $F_{2i-1}$  зависит только от одной площади поперечного сечения бойка  $S_i$ :

$$F_{2i-1} = f(S_i), \quad 1 \leq i \leq st. \quad (7)$$

Таким образом, решая последовательно каждое уравнение (7), определяются площади поперечных сечений ступеней синтезируемого бойка. Затем определяются диаметры ступеней, длина одной ступени и общая длина бойка соответственно:

$$\begin{aligned}
 d_i &= 2\sqrt{\frac{S_i}{\pi}}, \quad 1 \leq i \leq st, \\
 l_1 &= \frac{a \cdot t_{не}}{2st}, \\
 l &= st \cdot l_1.
 \end{aligned}$$

Последний этап расчета – это поиск гладкой кривой, аппроксимирующей ступенчатую функцию, являющуюся образующей боковой поверхности бойка как тела вращения. Затем необходимо сделать заключение о пригодности применения получаемой формы бойка в современной промышленной технике, или необходимо провести дальнейшее исследование по преобразованию полученной в результате синтеза формы к пригодной для встраивания в конструкцию реальной машины ударного действия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников Л.Т. К вопросу о рациональном проектировании ударных систем горно-технологического назначения // Матер. VI научно-практ. конф. по секции машиностроения и горных машин / Под ред. проф. Л.Т. Дворникова. – Новокузнецк, 1995. – С. 70–82.
2. Открытие 13 СССР / Е.В. Александров. – Приоритет от 30.10.1957, опубл. 19.03.1964, Бюл. № 7. – 1 с.
3. Clebsch A. Theorie de l'elasticite des corps solides / V.F. Saint-Venant. – Paris: Dunod, 1883. – 980 p.
4. Boussinesq J. Applications des potentials a l'etude de l'equilibre et du mouvement des solides elastiques. – Paris, 1885. – P. 508.
5. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.
6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Изд. 3-е, доп. и переработ. – Л.: Машиностроение, 1976. – С. 133.
7. Жуков И.А., Дворников Л.Т. Бойки ударных механизмов, имеющие аналитическое решение // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 10 (139). – С. 17–20.
8. Лисовский А.Ф., Дворников Л.Т. К вопросу о сопротивлении горных пород динамическому внедрению инструмента // Совершенствование буровых машин. – Фрунзе: Илим, 1970. – С. 75–83.
9. Дворников Л.Т., Жуков И.А. Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии // Матер. XVI научно-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения / Под ред. проф. Л.Т. Дворникова и проф. Э.Я. Живаго. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 225–229.
10. Иванов К.И., Варич М.С., Дусев В.И., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – Изд. 2, перераб. – М.: Недра, 1974. – С. 331–344.

Поступила 14.04.2009 г.

В качестве примера была решена задача синтеза формы бойка ударной системы для разрушения горных пород, характеризующихся линейной зависимостью «сила – внедрение» (2). Установлено, что ударный импульс, который необходимо сгенерировать бойком в стержне, для данного случая имеет экспоненциальную форму

$$\varepsilon = \frac{\partial g(x-at)}{\partial x} = -\frac{P_0}{ES_0} e^{\left[-\frac{k}{ES_0}(x-at)\right]}.$$

По данной зависимости согласно выше описанной методике была синтезирована форма бойка. Найдено, что наиболее близкой кривой, являющейся образующей боковой поверхности данного бойка как тела вращения, является экспоненциальная, описываемая функцией вида

$$y(x) = k_1 + k_2 \cdot e^{k_3 x},$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – некоторые постоянные величины, определяемые расчетом.

Причем диаметр ударного торца бойка определяется как

$$d_0 = 2(k_1 + k_2).$$

Таким образом, установлено, что для наиболее эффективного использования энергии удара в машинах, применяемых для разрушения горных пород средней крепости, необходимо использовать в качестве бойка тело вращения экспоненциальной кривой, параметры которой определяются физико-механическими свойствами конкретной разрушаемой среды. Приведенный пример свидетельствует о том, что показанная в статье методика позволяет синтезировать форму бойка ударной системы, оптимально соответствующую свойствам разрушаемой среды.

Решение поставленной задачи синтеза формы бойка раскрывает проблему повышения производительности ударных систем путем применения бойков рациональных форм без изменения других параметров и позволяет получать конкретные практические результаты.