

2. Бегаоен И.А., Дядюра А.Г., Бажал А.И. Бурильные машины / И.А. Бегаоен, А.Г. Дядюра, А.И. Бажал М.: Недра.1972. - 368 с.
3. Лукьянов В.Г., Комашенко В.И., Шмулыгин В.А. Взрывные работы / В.Г. Лукьянов, В.И. Комашенко, В.А. Шмулыгин. Т.: Издательство Томского политехнического университета, 2008. - 401 с.
4. Пирогов Л.И. Исследование вращающихся устройств буровых машин для подземных работ / Л.И. Пирогов Дисс. канд. техн. наук. Новосибирск, 1972. - 152 с.
5. Бегаоен И.А., Дядюра А.Г. Устройство и расчет современных перфораторов и пневмоударников / И.А. Бегаоен, А.Г. Дядюра. М.: Госгортехиздат, 1963. - 179 с.

Рукопись поступила в редакцию 22.02.13

УДК 622.233.6.001.57

А.А. ГУЛИВЕЦ, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ "Криворожский национальный университет"

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В СТЕРЖНЕВЫХ УДАРНЫХ СИСТЕМАХ

Изложены результаты математического моделирования ударных импульсов в стержневых ударных системах при их продольном соударении с учетом влияния геометрических параметров соударяемых элементов, физических и механических характеристик их материалов и учетом деформаций элементов систем при ударе.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Явление удара широко используется в различных отраслях промышленности благодаря таким основным его свойствам: быстротечность процесса, возможность создавать в зоне контакта инструмента с обрабатываемым объектом значительных по величине усилий, приводящих к необходимому его деформированию или разрушению.

Рядом экспериментальных исследований установлено, что при использовании удара для разрушения горных пород при бурении шпуров и скважин энергоемкость процесса зависит от формы ударных импульсов, их амплитуды и продолжительности.

Было выполнено ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на моделирование ударных импульсов и определение оптимальных параметров ударных систем. Однако, несмотря на большой объем выполненных исследований, к настоящему времени еще не созданы эффективные методики расчета параметров машин ударного действия, обеспечивающих при их применении генерирования в ударных системах импульсов необходимой формы. Поэтому разработка математической модели ударных импульсов и методики расчета параметров ударных систем при более полном учете особенностей процесса удара является актуальной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Большой вклад в исследование процессов формирования волн деформаций при ударе внесли работы отечественных исследователей: В.Д. Андреева, К.И. Иванова [1,2], Е.В. Александрова и В.Б. Соколинского [3], Н.А. Кильчевского [4], О.Д. Алимова, В.К. Манжосова, В.Е. Емельянца [5], В.Ф. Горбунова, Л.А. Саруева, Г.М. Кашкарова, А.И. Белова [6], Л.Т. Дворникова и ряда других. Из зарубежных исследователей, внесших значительный вклад в изучение процессов формирования волн деформаций в упругих волноводах, следует отметить А.Е. Сирса, Ф.К. Арндта, Г. Фишера, Г. Ферхарста, П.К. Датта.

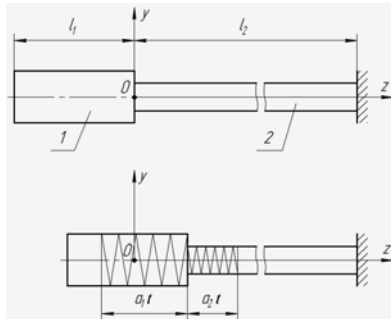
Однако, несмотря на большой объем проведенных исследований к настоящему времени отсутствует теория формирования ударных импульсов, достаточно полно учитывающая все особенности процесса соударения тел.

**Постановка задачи.** Исходя из вышеизложенного сформулирована задача исследования - рассматривая протекающий во времени процесс соударения двух стержней различной длины, из которых короткий стержень (бойка) наносит продольный удар по неподвижному длинному стержню с закрепленным концом (волноводу) разработать математическую модель формирования ударного импульса при следующих исходных положениях: удар продольный, упругий; материал бойка и волновода однородный; в процессе удара длины деформированных участков бойка и стержня изменяются со скоростью распространения в них звука.

**Изложение материала и результаты.** Рассмотрим расчетную схему (рис.1) продольного соударения бойка 1 и стержня 2 (волновода) с закрепленным концом.

Примем обозначения  $l_1, l_2$  - соответственно длина бойка и стержня;  $A_1, A_2$  - соответственно площадь поперечного сечения бойка и стержня;  $\rho_1, \rho_2$  - соответственно плотность материала

бойка и стержня;  $a_1, a_2$  - соответственно скорость звука в материале бойка и стержня;  $E_1, E_2$  - соответственно модуль упругости материала бойка и стержня;  $z_1, z_2$  - соответственно величина деформации участков бойка и стержня к моменту времени  $t$ ;  $\dot{z}_1, \ddot{z}_1, \dot{z}_2, \ddot{z}_2$  - соответственно скорость и ускорение деформирования участков бойка и стержня к моменту времени  $t$ ;  $v_{01}$  - предупредная скорость бойка.



**Рис. 1.** Расчетная схема продольного соударения стержней: а) - начальное положение ( $t=0$ ); б) - к моменту времени  $t$

После начала удара бойка по стержню центр масс части бойка, находящаяся между плоскостью контакта тел и плоскостью, куда дошла волна деформации за промежуток времени  $t$ , будет двигаться со скоростью  $\frac{\dot{z}_1 + \dot{z}_2 - \frac{a}{2}}{2}$ . Та часть бойка, куда еще не дошла волна деформации бойка будет двигаться с его предупредной скоростью  $v_{01}$ .

Тогда на основании теоремы о движении центра масс тела переменного состава для деформированной части бойка запишем уравнение

$$m_1 \ddot{z} = -c(z_1 + z_2) + \frac{dm_1}{dt} \left[ v_{01} - \left( \dot{z}_1 + \dot{z}_2 - \frac{a}{2} \right) \right], \quad (1)$$

где  $m_1 = A_1 \rho_1 a_1 t$  - масса деформированной части бойка к моменту времени  $t$ ;

$\ddot{z}$  - ускорение центра масс деформируемой части бойка к моменту времени  $t$ , которое равно

$$\ddot{z} = \frac{\ddot{z}_1 + \ddot{z}_2}{2}, \quad (2)$$

$c$  - эквивалентная жесткость сдеформированных участков бойка и стержня.

Скорость изменения массы сдеформированной части бойка будет равна

$$\frac{dm_1}{dt} = A_1 \rho_1 a_1. \quad (3)$$

Как известно для такой ударной системы эквивалентная жесткость будет равна

$$c = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}, \quad (4)$$

где  $c_2, c_1$  - соответственно продольная жесткость сдеформированной части бойка и стержня.

Учитывая, что силы, действующие на боек и стержень в плоскости их контакта, согласно третьему закону Ньютона равны по величине и противоположны по направлениям, запишем

$$c_1 z_1 = c_2 z_2. \quad (5)$$

Отсюда выразим  $c_2$  через  $c_1$

$$c_2 = c_1 \frac{z_1}{z_2}, \quad (6)$$

Полагая, что силы упругости в телах изменяются линейно, согласно закону Гука деформации бойка и стержня исходя из равенства сил, действующих на ударник и стержень в плоскости их контакта,  $F_{21} = F_{12} = F$  будут

$$z_1 = \frac{F a_1 t}{E_1 A_1}; \quad (7)$$

$$z_2 = \frac{F a_2 t}{E_2 A_2}. \quad (8)$$

Исходя из зависимостей (7) и (8) получим выражение величины деформации к моменту времени  $t$  части стержня  $z_2$ , скорости её изменения  $\dot{z}_2$  и ускорения  $\ddot{z}_2$  через деформацию части бойка  $z_1$ , скорость её изменения  $\dot{z}_1$  и ускорения

$$z_2 = \frac{E_1 A_1 a_2}{E_2 A_2 a_1} z_1; \quad (9)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{E_1 A_1 a_2}{E_2 A_2 a_1} \dot{z}_1; \quad (10)$$

$$\ddot{z}_2 = \frac{E_1 A_1 a_2}{E_2 A_2 a_1} \ddot{z}_1. \quad (11)$$

Подставив значение деформации  $z_2$  из уравнения (9) в уравнение (6) получим

$$c_2 = \frac{E_2 A_2 a_1}{E_1 A_1 a_2} c_1. \quad (12)$$

Подставив значение жесткости стержня  $c_2$  из уравнения (12) в уравнение (4) получим

$$c = \frac{E_2 A_2 a_1}{E_1 A_1 a_2 + E_2 A_2 a_1} c_1. \quad (13)$$

Жесткость деформируемой к моменту времени  $t$  части ударника, как видно из уравнения (7), является переменной величиной и равной

$$c_1 = \frac{E_1 A_1}{a_1 t}. \quad (14)$$

Подставив (14) в (13) и выполнив преобразования получим выражение для эквивалентной жесткости ударной системы

$$c = \frac{E_2 A_2 \cdot E_1 A_1}{E_1 A_1 a_2 + E_2 A_2 a_1} \cdot \frac{1}{t}. \quad (15)$$

Подставив значения (2), (3), (9), (10), (11), (15) в уравнение (1) и проведя преобразования получим

$$A_1 \rho_1 a_1 t (E_2 A_2 a_1 + 2E_1 A_1 a_2) \ddot{z}_1 + A_1 \rho_1 a_1 (E_2 A_2 a_1 + 2E_1 A_1 a_2) \dot{z}_1 + \frac{2E_2 A_2 E_1 A_1}{t} z_1 = 2A_1 \rho_1 a_1^2 E_2 A_2 \left( v_{01} + \frac{a_1}{2} \right). \quad (16)$$

Полученное уравнение (16) описывает процесс деформирования бойка в процессе его удара по стержню до момента достижения скорости его деформации  $\dot{z}_1 = 0$ .

Уравнение (16) - неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с переменными коэффициентами. Решение этого уравнения осуществляется, как правило, с использованием численных методов. Используя результаты решения уравнения (16) можно построить график зависимости

$$F_1(t) = c_1(t) \cdot z_1(t), \quad (17)$$

то есть, получить форму ударного импульса, генерируемого в бойке.

Для получения уравнения, описывающего деформирование стержня, по которому наносится удар бойком, учитывая, что время деформирования стержня равно времени деформирования бойка, и зависимость процесса деформирования стержня от параметров деформирования бойка, выразим в уравнении (1) величины  $z_1$ ,  $\dot{z}_1$ ,  $\ddot{z}_1$  и  $c$  через соответствующие величины  $z_2$ ,  $\dot{z}_2$ ,  $\ddot{z}_2$  и  $c_2$ .

Исходя из зависимостей (7) и (8) получим

$$z_1 = \frac{E_2 A_2 a_1}{E_1 A_1 a_2} \cdot z_2; \quad (18)$$

$$\dot{z}_1 = \frac{E_2 A_2 a_1}{E_1 A_1 a_2} \cdot \dot{z}_2; \quad (19)$$

$$\ddot{z}_1 = \frac{E_2 A_2 a_1}{E_1 A_1 a_2} \cdot \ddot{z}_2. \quad (20)$$

Выразив из уравнения (5)  $c_1$  через  $c_2$  и подставив значение деформации  $\dot{z}_1$  из уравнения (18) в уравнение (5) получим

$$c_1 = \frac{E_2 A_2 a_1}{E_1 A_1 a_2} \cdot c_2. \quad (21)$$

Учитывая, что продольная жесткость стержня при ударной деформации исходя из уравнения (8) равна

$$c_2 = \frac{E_2 A_2}{a_2 t}, \quad (22)$$

из уравнения (4), используя значение  $c_1$  из уравнения (21) получим

$$c = \frac{E_1 A_1 \cdot E_2 A_2}{E_1 A_1 a_2 + E_2 A_2 a_1} \cdot \frac{1}{t},$$

что соответствует полученному значению согласно уравнения (15).

Подставив значения (2), (3), (15), (18), (19), (20) в уравнение (1) и проведя преобразования получим

$$A_1 \rho_1 a_1 t (E_2 A_2 a_1 + 2E_1 A_1 a_2) \ddot{z}_2 + A_1 \rho_1 a_1 (E_2 A_2 a_1 + 2E_1 A_1 a_2) \dot{z}_2 + \frac{2E_2 A_2 E_1 A_1}{t} z_2 = 2A_1^2 \rho_1 a_1 E_1 a_2 \left( v_{01} + \frac{a_1}{2} \right). \quad (23)$$

Как видно, вид уравнений, описывающих процесс деформации бойка (16) и стержня (23) при упругом продольном ударе одинаковы.

Хотя в ударных системах возможна разность продольных жесткостей бойка (14) и стержня (22), а также различные значения  $z_1, z_2$  согласно уравнений (16) и (23) амплитуда генерируемых ударных импульсов и продолжительность их во времени всегда будут одинаковы.

Таким образом на основании полученных дифференциальных уравнений, описывающих процесс деформирования бойка и стержня при упругом продольном ударе могут быть определены формы генерируемых в них ударных импульсов согласно зависимости

$$F_{1(t)} = c_{1(t)} \cdot z_{1(t)}, \text{ или } F_{2(t)} = c_{2(t)} \cdot z_{2(t)}. \quad (24)$$

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате теоретических исследований получены дифференциальные уравнения, описывающие процесс сжатия бойка и стержня ударной системы при продольном упругом их соударении.

Используя решение полученных дифференциальных уравнений могут быть определены формы ударных импульсов, генерируемых в элементах упругих систем при ударе.

Результаты решения полученных дифференциальных уравнений (16) и (23) и результаты аналитических исследований, выполненных на основе их решений будут приведены в следующих публикациях.

#### *Список литературы*

1. **Андреев В.Д.** Формирование импульсов напряжений в ударных узлах буровых машин. - В кн.: Взрывное дело, 58/15. - М.: Недра, 1966. - С. 147-156.
2. **Иванов К.И., Андреев В.Д.** Разрушение горных пород ударными импульсами, генерируемыми поршнями различной формы. - В кн.: Взрывное дело, 58/15. - М.: Недра, 1966. - С. 244-253.
3. **Александров Е.В., Соколинский В.Б.** Прикладная теория и расчеты ударных систем. - М.: Наука, 1969. - 199 с.
4. **Кильчевский Н.А.** Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. - К.: Наукова думка, 1976. - 320 с.
5. **Алимов О.Д., Манжосов В.К., Емельянец В.Э.** Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. - М.: Наука, 1985. - 356 с.
6. **Горбунов В.Ф., Саруев Л.А., Кашкаров Г.М., Белов А.И.** Исследование передачи ударного импульса через соединения буровых штанг. В сб.: Проблемы повышения стойкости бурового инструмента. - Новокузнецк, 1975. - С.48-49.

Рукопись поступила в редакцию 21.02.13

УДК 622.233.5: 62-192

Д.А. АРТАМОНОВА, В.П. НЕЧАЕВ, кандидаты техн. наук, доц.,  
В.Н. КИСЕЛЕВ, аспирант, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»  
С.Г. КАССИР, ПАО «КЗГМ»

## **НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕРЕНОСНЫХ ПЕРФОРАТОРОВ**

Рассмотрены основные причины выхода из строя основных узлов перфораторов ударно-поворотного действия на примере переносного перфоратора. Описаны существующие методы обеспечения долговечности этих машин. Предложено новое направление, заключающееся в создании регулярного профиля микронеровностей и подборе их направлений на трущихся деталях. Описаны достоинства этого метода.

**Проблема и ее связь с практическими задачами.** Буровзрывные работы остаются основным видом подготовки породы к добыче, при этом наиболее трудоемким процессом является бурение шпуров и скважин для размещения в них заряда взрывчатых веществ. Бурение осуществляется с помощью ручных и телескопных перфораторов, которые используются при добыче руд черных и цветных металлов, при строительстве подземных сооружений. Ручные и телескопные перфораторы относятся к пневматическим машинам ударно-поворотного действия и обладают неоспоримыми достоинствами, такими как: конструктивная простота, низкая стоимость, небольшие габаритные размеры, универсальность, безопасность, простота обслуживания и ремонта, низкие эксплуатационные затраты. Но существенным недостатком отечественных машин является их невысокий уровень качества [1].

**Постановка задачи.** Современные отечественные перфораторы имеют ряд проблем, которые обусловлены конструктивными особенностями, технологией изготовления и