

А.И. Бажал, д-р техн. наук, Харьков, Украина,
 В.М. Кучеровский, канд. техн. наук, А.М. Барак, Москва, Россия,
 А.А. Бажал, Кривой Рог, Украина, Ант.А. Бажал, Харьков, Украина,
 С.Г. Серебренникова, Москва, Россия

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ВОЛНЫ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ

Імпульсні хвилі можуть мати різну форму, визначеною кривою навантаження-час (або деформація- час). Форма хвилі залежить від форми матеріалу і розмірів взаємодіючих ударом деталей і деталей хвильоводів, по яких хвиля розповсюджується. Виявилось, що оброблюване середовище, (деформована заготовка металу, розбурювана порода, свая, що забивається, момент опору імпульсному обертанню, або сила опору хвильовому переміщенню транспортованого середовища) має у кожному з випадків застосування імпульсних хвиль свій закон опору, або свій імпульс опору деформації або переміщенню. Якщо форма імпульсу навантаження відповідає формі імпульсу опору середовища, буде мати місце максимальне використання енергії імпульсної хвилі, підведеної до оброблюваного середовища, та мінімальна енергоємність виконаної роботи. Якщо форма хвилі навантаження не відповідає формі закону опору обробленого середовища, має місце невикористана на корисну роботу енергія, яка відбивається від поверхні контакту інструмента з оброблюваним середовищем у вигляді хвиль стиску або розтягу.

Импульсная волна может иметь различную форму, описываемую кривой нагрузка-время (или деформация - время). Форма волны зависит от формы материала и размеров соударяющихся деталей и деталей волноводов, по которым волна распространяется. Оказалось, что обрабатываемая среда, (деформируемая заготовка металла, буримая порода, забиваемая свая, момент сопротивления импульсному вращению ли сила сопротивления волновому перемещению транспортируемой среды) имеет в каждом из прикладных случаев использования импульсных волн свой закон сопротивления или, образно говоря, свой импульс сопротивления деформации или перемещению. Если форма импульса нагружения соответствует форме импульса сопротивления среды, будет иметь место максимальное использование энергии импульсной волны, подведенной к обрабатываемой среде, и минимальная энергоёмкость выполняемой работы. Если форма волны нагружения не соответствует форме закона сопротивления обрабатываемой среды, имеет место неиспользованная на полезную работу энергия, которая отражается от поверхности контакта инструмента с обрабатываемой средой в виде волн сжатия или растяжения.

A.I. BAZHAL, V.M. KUCHEROVSKIJ, A.M. BARAK, A.A. BAZHAL, ANT.A. BAZHAL,
 S.G. SEREBRENNIKOVA

INTERACTION OF THE PULSE WAVE WITH TECHNOLOGICAL ENVIRONMENTS

An impulse wave may have various shapes or forms. Those shapes may be described as a Load/Time curve (or a Deformation/Time curve). Shape of a wave being formed depends on characteristics of the materials of the co-hitting parts, sizes of the co-hitting parts and the wave transmitters by the mean of which the wave is being transmitted. It so happened, that material being treated (pieces of metal being hit, rock being drilled with three-cone bit, a construction beam being hit, or any other way of an impulse wave instigated deformation, transition, twist rotation. etc) has its own specific impulse of resistance to such deformation, transition, twist, rotation, etc. If a form of an initial impulse wave is equivalent to an impulse of resistance of the treated substance a maximum impact of the energy of the initial wave will take place. And otherwise, if form of an initial wave is not equivalent to the form of the responding wave of the treated substance, an excess energy (or energy not used for the impact) will have be released and reflected on the treated surface (or a contact point) in a way of waves of compression or decompression stress.

1. Основы силового взаимодействия импульсной волны с обрабатываемой средой

Импульсная волна может иметь различную форму, описываемую кривой нагрузка – время (или деформация – время). Форма волны зависит от формы материала и размеров соударяющихся деталей и деталей волноводов, по которым затем волна распространяется [1].

Если имеет место равное сечение ударника и наковальни, то их соударение формирует импульс прямоугольной формы. В этом случае при одной и той же скорости соударения в деталях возникают напряжения минимальной величины.

Если сечение ударника превышает сечение наковальни, то их соударение создает импульсы более длинные, чем в первом случае, причем максимальные напряжения возникают в начальной части импульса, за которой следует растянутый во времени задний фронт.

Оказалось, что обрабатываемая среда (деформируемая заготовка металла) буримая порода, забиваемая свая, момент сопротивления импульсному вращению или сила сопротивления волновому перемещению транспортируемой среды) имеет в каждом из прикладных случаев использования импульсных волн свой закон сопротивления, или, образно говоря, свой импульс сопротивления деформации или перемещению. Если форма импульса нагружения соответствует форме импульса сопротивления среды, будет иметь место максимальное использование энергии импульсной волны, подведенной к обрабатываемой среде и минимальная энергоемкость выполняемой волной работы.

Если форма волны нагружения не соответствует форме закона сопротивления обрабатываемой среды, имеет место неиспользованная на полезную работу энергия, которая отражается от поверхности контакта инструмента с обрабатываемой средой в виде волн сжатия или растяжения. Получены экспериментальные зависимости величины энергоемкости процесса разрушения горной породы при ударном бурении с помощью долотчатого (однолезвийного) породоразрушающего инструмента диаметром 46 мм через буровую штангу-волновод диаметром 25 мм. Удар по штанге - волноводу производили ударниками одной массы, но различного сечения и длины (табл.1).

Таблица 1 – Экспериментальные зависимости процесса разрушения горной породы

№ п/п	Показатели	Номер ударника			
		1	2	3	4
1	Масса, кг	3,985	3,985	3,9	3,96
2	Длина, мм	100	148	180	400
3	Диаметр	80	69	60	40
4	Продолжительность основного ударного импульса, мкс	40	55	71	160

Из полученных результатов следует, что отношение работы удара к разрушенному объему породы (энергоемкость разрушения) с увеличением работы уменьшается.

Увеличение амплитуды ударно импульса для всех пород приводит к увеличению эффективности использования энергии удара.

Увеличение скорости соударения деталей увеличивает амплитуду ударных напряжений и, следовательно, энергию удара, приближая ее к критическому значению, после которого увеличение энергии удара уже не сказывается на энергоемкости процесса разрушения.

Объем разрушенной породы за 1 удар с увеличением длины ударника (а значит и длительности импульса) растет до 475 мм.

Дальнейшее увеличение длины ударника к заметному росту объема разрушенной породы не приводит.

Наиболее эффективным методом исследования энергообмена инструмента с обрабатываемой средой является метод анализа прямых и отраженных импульсов. Он позволяет получить все параметры процесса[2].

Рассмотрим возможности этого метода при анализе результатов единичного удара ударником длиной 475 мм через деталь-волновод равного с ударником сечения (штангу) и долотчатый породоразрушающий инструмент по гематит-магнетитовому роговику – горной породе к коэффициенту крепости $f=20$ по М.Ф. Протодияконову.

Скорость удара 4,15 м/сек, энергия удара 16 Нм. Начальный импульс предоставлен положительной фазой напряжений. Отраженный импульс состоит из двух частей – растяжения и сжатия. Волна сжатия несет в себе 20,9% начальной энергии $W_{нач}$, а волна растяжения -0,64%. Общее количество отраженной энергии составляет 21,54% от $W_{нач}$, а коэффициент передачи энергии обрабатываемой среде составляет 0,78. Часть отраженной энергии возвращается в ударник, обуславливая его отскок со скоростью 1,68 м/сек, а вторая часть остается в штанге, вызывая ее отход вместе с инструментом от поверхности контакта с обрабатываемой средой, со скоростью 0,03 м/сек.

По результатам эксперимента строят диаграммы усилий между лезвием инструмента и обрабатываемой средой в координатах $P - t$ и $P - s$, а также диаграмму энергообмена инструмента со средой в координатах $W-t$, где P – усилие, s – глубина внедрения лезвия инструмента, t – время, W – энергия.

Диаграммы $P - t$ и $P - s$ алгебраическим вычитанием усилий в отраженной зоне от усилий в начальной волне. Анализ таких построений показывает, что в начале действующие усилия растут до величины 73,53 кН, а затем происходит резкий спад до 55,5 кН, за этим имеет место новый рост до 63,51 кН и окончательный спад до нуля.

По результатам экспериментов строят также диаграммы $V - t$ и $V - s$, где V – скорость внедрения инструмента в обрабатываемую среду. Они строятся геометрическим вычитанием амплитуд отраженного импульса от амплитуды

прямого импульса с последующим умножением на величину $\frac{a}{EF}$, где E – модуль упругости этого материала и F – его сечение.

Анализ диаграмм $V - t$ и $V - s$ показывает, что вначале скорость движения инструмента возрастает до величины 2,03 м/сек, а затем падает до 0,79 м/сек, что соответствует росту усилия на диаграмме $P - t$. При падении усилия скорость снова возрастает до 1,58 м/сек, после чего упадет до нуля и даже приобретет отрицательное значение, свидетельствующее об отскоке инструмента за счет упругого восстановления обрабатываемой среды. По диаграмме $V - t$ легко определяется величина перемещения (внедрения) лезвия инструмента в обрабатываемую среду:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (1)$$

В рассматриваемых условиях лезвие инструмента за одно нагружение импульсной волной внедрилось в обрабатываемую среду на 0,246 мм. В результате упругого восстановления среды суммарное внедрение уменьшилось до 0,234 мм. Имея зависимость $S - t$, легко графически построить $P - S$, $V - S$ и $W - S$. При этом в начальном или отраженном импульсе определяется выражением

$$W = \frac{F \cdot a}{E} \cdot \int_0^t \sigma^2(t) dt, \quad (2)$$

где, σ – напряжения в инструменте, включая деталь – волновод (штангу).

Энергия, переданная обрабатываемой среде, равна разности энергий начального и отраженного импульсов. Из этих соображений можно определить к.п.д. импульсного волнового воздействия инструмента на обрабатываемую среду:

$$\eta = W_{нач} - W_{отр} / W_{нач}, \quad (3)$$

Рассмотрим метод построения импульса сопротивления среды при ее волновом деформировании. Сопротивление обрабатываемой среды внедрению инструмента определяется отношением приложенного усилия к скорости внедрения:

$$z = \frac{P}{v}, \quad (4)$$

Для построения диаграммы $Z - S$ за единицу величины Z принимается произведение волнового сопротивления детали-волновода (штанги) и ее поперечного сечения:

$$z_{ш} = \rho_{ш} \cdot a \cdot S_{ш}, \quad (5)$$

где $\rho_{ш}$ – плотность материала детали-волновода (штанги); a – скорость волны в стали; $S_{ш}$ – площадь поперечного сечения штанги.

Как показывают эксперименты величина z , вначале возрастает до величины $0,637 z_{\text{ш}}$ на глубине $0,003$ мм, затем падает до $0,45 z_{\text{ш}}$, после чего некоторое время удерживается на постоянном уровне и после этого (с глубины $0,03$ мм) вновь начинает расти. Сопротивление внедрению продолжает ступенчато расти до значения $4,15 z_{\text{ш}}$ на глубине $0,123$ мм, после чего наступает постоянное сопротивление среды до определенной точки и далее резкий спад до $1,65$. Дальнейший рост сопротивления среды имеет место до глубины $0,246$ мм, когда сопротивление становится бесконечно большим. Лезвие инструмента в этой точке останавливается, а затем за счет упругого восстановления среды возвращается несколько назад до глубины $0,234$ мм от поверхности первоначального контакта.

Такой характер импульса сопротивления среды определяется физикой хрупкого разрушения, сопровождающегося, выколами хрупкой среды. Закон сопротивления среды носит явно нелинейный характер. При деформации инструментом нагретого металла закон сопротивления деформируемой среды будет естественно другим.

Для максимального использования волнового импульса, необходимо, чтобы его форма соответствовала форме сопротивления среды. Если энергия волнового импульса уменьшается в результате снижения скорости удара, это приводит к снижению амплитуды напряжений, что, в свою очередь, сопровождается увеличением доли неиспользованной энергии, которая отражается в виде волн сжатия.

Если уменьшить энергию ударного импульса за счет уменьшения массы ударника, то необходимо рассматривать два случая. С уменьшением диаметра снизится амплитуда импульса, что приведет при недостаточной амплитуде импульса к отражению энергии в виде волн сжатия. Если уменьшить длину ударника, уменьшится длина импульса и ее будет недостаточно для эффективного деформирования обрабатываемой среды. При чрезмерной длине ударника не будет полностью использоваться энергия на всей длине импульса. Таким образом, скорость приложения нагрузки, длина ударника и его диаметр должны быть выбраны таким образом, чтобы форма волны нагружения соответствовала закону сопротивления обрабатываемой среды, что обеспечит полное использование энергии волны и исключит появление отраженных волн от зоны контакта инструмента с обрабатываемой средой. Длинный ударник равного с наковальной сечения создает ударный импульс близкой к прямоугольной форме и в сравнении со всеми другими формами соударяющихся тел обеспечивает минимальную амплитуду напряжений.

Короткие и толстые ударники создают высокие амплитуды импульсов напряжений в штангах, что вызывает поломки деталей и снижает к.п.д. удара.

При конструировании соударяющихся деталей необходимо избегать резких изменений сечений, переходы от одного сечения к другому выполнять по конусу, что уменьшает количество отраженной энергии при прохождении

ударной волны. При конструктивно-необходимом увеличении размеров деталей волноводов их следует делать полыми. Совершенно недопустимы перепады сечений деталей типа шейки и нежелательны ударники с уменьшающимся по длине от ударяющегося торца приведенным сечением. Приведенное сечение ударника от ударяющегося торца должно возрастать по закону, близкому к закону сопротивления среды.

2. Удельная энергоемкость различных технологий разрушения горных пород импульсными волнами

Ударный способ разрушения горных пород является одним из перспективных как по производительности, так и удельным энергозатратам. В таблицах 2 и 3 приведено сравнение этих показателей с другими, полученными известными способами разрушения горных пород [3, 4].

Таблица 2 – Удельная энергоемкость разрушения горных пород

№ п/п	Способ разрушения горных пород	Удельная энергоемкость разрушения, Дж/см ³
1	Ультразвуком	10104
2	Водяными струями	1684
3	Ударное разрушение маломощными перфораторами	253
4	Шарошечным инструментом	126-253
5	Мощным ударом (до 10 м/сек)	17-25
6	Взрыванием (удар со скоростью 700-900 м/сек)	к.п.д. взрыва 5%

По результатам исследований, выполненных отечественными учеными, удельная энергоемкость различных способов разрушения приводится ниже.

Таблица 3 – Удельная энергоемкость горных пород

№ п/п	Технология разрушения	Виды горных пород	Предел прочности на сжатие, МПа	Удельная энергоемкость, квт-час/т
1	Разрушение токами высокой частоты	Негабариты гранита, габбро	–	5 – 7
2	Разрушение волнами СВЧ	Бурение крепких железистых руд	–	60 – 80
3	Разрушение гидравлическими струями	Разрушение горных пород	14	21

Продолжение табл. 3

4	Разрушение дисковыми шарошками	Разрушение горных пород	35 – 86	3,9 – 8,5
5	Разрушение резцово-шарошечным инструментом	Разрушение горных пород	67 – 74	4,0 – 8,0
6	Разрушение резцово-отрывным инструментом	Разрушение горных пород	50	2,5 – 4,5
7	Разрушение резанием (статика)	Разрушение горных пород	180 – 200	6 – 7
8	Разрушение резанием (статика)	Разрушение горных пород	40	3 – 6
9	Разрушение резанием (статика)	Разрушение углей	–	0,6 – 0,8
10	Ударное разрушение	Разрушение горных пород	20 – 8	0,2 – 0,72

Таким образом, ударный способ разрушения горных пород является наиболее эффективным. Его реализация в исполнительных органах машин и при непосредственном воздействии на породу открывает широкую перспективу при совершенствовании методов добычи полезных ископаемых.

Список использованной литературы: 1. Ржевский В.В., Бажал А.И. и др. Изменения свойств горных пород в массиве импульсно-волновыми полями при подземном выщелачивании руд. М. Цветметинформация, вып. 2, 1985, с. 55. 2. Бегагоен И.А., Дядюра А.Г., Бажал А.И. Бурильные машины. М. Недра. 1972 с. 350. 3. Иванов К.И., Андреев В.Д. и др. Техника бурения. М. Недра. 1974. 4. Забабахин Е.И., Забабахин И.Е. Явления неограниченной кумуляции. М. Наука. 1988 с.38.

Поступила в редколлегию 15.03.2011

Bibliography (transliterated): 1. Rzhetskij V.V., Bazhal A.I. i dr. Izmenenija svojstv gornyh porod v massive impul'sno-volnovymi poljami pri podzemnom vyvelachivanii rud. M. Cvetmetinformacija, vypusk 2. 1985, s. 55. 2. Begagoen I.A., Djadjura A.G., Bazhal A.I. Buril'nye mashiny. M. Nedra. 1972 s. 350. 3. Ivanov K.I., Andreev V.D. i dr. Tehnika burenija. M. Nedra. 1974. 4. Zababihin E.I., Zababihin I.E. Javlenija neogranichennoj kumuljacji. M. Nauka. 1988 s.38.