УДК 531.66:622-1/-9

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

© Дмитрий Зиновьевич Ямпольский

Общество с ограниченной ответственностью «УДАРМАШ», Москва, Россия

udarmash@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено возникновение собственных колебаний ударника при продольном соударении упругих стержней. Дан анализ влияния этих колебаний на ударные деформации, регистрируемые в рабочем инструменте машины ударного действия. Установлено, что собственные колебания ударника могут увеличивать напряжения в инструменте на 10 %. Показано, что в установившемся режиме работы машины средний ударный импульс напряжения совпадает с ударным импульсом от невозмущенного ударника. Рассмотрены законы сохранения количества движения и энергии при ударе с учетом собственных колебаний ударника.

Ключевые слова: продольный удар, стержневые системы, ударные деформации, собственные колебания ударника, машины ударного действия, законы сохранения энергии и количества движения при ударе.

SOME FEATURES OF SHOCK PULSES OF IMPACT MACHINES

© D.Z. Yampolsky

The limited liability company «UDARMASH», Moscow, Russia

udarmash@mail.ru

Abstract. The article deals with the occurrence of natural vibrations of the striker during the longitudinal collision of elastic rods. The analysis of these vibrations influence on the impact deformations registered in the working tool of the impact machine is given. It was found that the natural vibrations of the striker can increase the mechanical stresses in the tool by 10 %. It is shown that in the steady mode of the machine operation the average shock pulse coincides with the shock pulse from the undisturbed striker. The laws of conservation of energy and the amount of motion at impact are considered, taking into account the natural vibrations of the striker.

Key words: longitudinal shock, rod systems, shock deformations, natural vibrations of the striker, impact machines, laws of conservation of energy and amount of motion at impact.

Памяти Вадима Афанасьевича Кашаева

В 70-е годы XX века в лаборатории удара и вибрации бурильных машин Института горного дела им. А.А. Скочинского (г. Люберцы М.О.) были выполнены фундаментальные исследования ударных процессов в стержневых системах [1-3]. Результаты этих

исследований и по сей день дают пищу для анализа и выявления ранее неизвестных физических закономерностей механического удара.

Рассмотрим стержневую систему, в которой ударник наносит удары по штанге постоянного сечения вдоль ее оси, как показано на рис. 1. В штанге возникает продольная волна деформации сжатия, которую в соответствии со сложившейся традицией будем называть **ударным импульсом деформации** или сокращенно **ударным импульсом**.

Будем полагать штангу достаточно длинной, чтобы ударный импульс полностью укладывался по ее длине, а отраженная от противоположного конца штанги волна (отраженный импульс), в свою очередь, не накладывалась на него.

Для регистрации ударных деформаций на боковой поверхности штанги диаметрально противоположно поместим тензодатчики¹, сигнал с которых будем наблюдать в зависимости от времени².

В момент отскока ударника от штанги ударный импульс в ней полностью сформирован, и далее он в неизменном виде распространяется к противоположному концу штанги со скоростью звука a . Точно такой же ударный импульс наблюдается в произвольном сечении штанги с координатой x в зависимости от времени t , при этом длительность импульса T и его длина L вдоль оси штанги связаны соотношением $L = aT$.

Рис. 1. Формирование ударного импульса

1 – ударник; 2 – волна деформации; 3 – тензодатчик; 4 – измерительная штанга;
 v – скорость ударника до удара; v_0 – скорость отскока ударника; ε – относительная деформация поперечных сечений штанги; l – длина ударника; d – диаметр ударника

Нас будут интересовать физические закономерности регистрируемого процесса.

Согласно волновой теории механического удара [1-4] максимальное значение относительной деформации (или напряжения), возникающей при ударе, т.е. амплитуда ударного импульса, пропорциональна предударной скорости ударника v . Эта зависимость подтверждается экспериментально: на рис. 2, а показаны ударные импульсы при различных скоростях

¹ На практике обычно применяют два или четыре тензодатчика, чтобы компенсировать изгибные деформации и деформации кручения штанги.

² Тензодатчик регистрирует относительную деформацию участка штанги, расположенного под ним. Длина датчика 10...25 мм, а длина ударного импульса, как правило, более 300 мм, поэтому усреднение сигнала по длине датчика практически не искажает форму и длительность ударного импульса.

соударения ударника со штангой, полученные при одиночных ударах. (Для наглядности был выбран ударник пневматического отбойного молотка, имеющий форму катушки, ударный импульс которого имеет несколько локальных максимумов и минимумов.) Ординаты ударных импульсов пропорциональны скорости ударника, а длительность всех импульсов одинакова и не зависит от скорости соударения. Так и должно быть согласно теоретическим представлениям о механическом ударе.

Посмотрим теперь, что происходит при непрерывной работе пневматического отбойного молотка с таким «катушечным» ударником.

Чтобы увидеть импульсы, следующие друг за другом, молоток был запитан от небольшого ресивера, наполненного сжатым воздухом, так, чтобы от удара к удару давление воздуха уменьшалось, а, следовательно, уменьшалась скорость ударника и амплитуда ударного импульса. Зарегистрированные таким образом импульсы молотка показаны на рис. 2, б.

Характер ударных импульсов на рис. 2, б разительно отличается от импульсов на рис. 2, а. Зависимость амплитуды импульсов от скорости соударения ударника со штангой сохранилась, но форма импульсов искажена.

Рис. 2. Ударные импульсы пневматического отбойного молотка МО-6К
а) при одиночных ударах для различных скоростей ударника v , м/с, снизу вверх:
2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0;
б) при непрерывной работе и снижении давления сжатого воздуха (сверху вниз);
метки времени через 10 мкс

Почему? Чем серия ударов отличается от одиночных ударов? Что привело к искажению формы импульсов?

Ответ на эти вопросы был дан инженером В.А. Кашаевым, который обнаружил и исследовал данное явление.

Известно, что ударный процесс в буровом инструменте (штанге, пике) полностью затухает за период между ударами. Длительность ударного импульса составляет порядка 100 мкс, а период между ударами – 50 мс. За это время импульс успевает многократно «пробежать» по инструменту туда и обратно, деформируя и разрушая обрабатываемый материал, нанося обратные удары по корпусу ударной машины, и тем самым полностью расходуя энергию, переданную ударником инструменту.

Рис. 3. Волновой процесс в буровой штанге

1 – первый (падающий) ударный импульс; 2 – затухание ударного процесса

Иллюстрацией затухания волнового процесса в инструменте служит рис. 3. На нем показаны сигналы с двух тензодатчиков, расположенных на буровой штанге на небольшом расстоянии друг от друга. (Сигналы записаны скоростной киносъемкой.)

А что происходит в ударнике? При разрыве контакта с инструментом ударник тоже остается возбужденным. Волна деформации в нем, оказывается «запертой» между его свободными торцами. Но, в отличие от волнового процесса в инструменте, деформации в ударнике не затухают к моменту следующего удара. Когда ударник снова входит в контакт с инструментом, они накладываются на новый ударный импульс, изменяя его форму.

Таким образом, на рис. 2, б мы наблюдаем «явление наложения предыдущего ударного импульса на последующий через собственные колебания ударника»³.

Ударники современных ударных машин имеют сложную геометрию, например, состоят из цилиндрических частей разных диаметров. Волна деформации в таком ударнике отражается от границ сопряжения частей и к моменту разрыва контакта с инструментом «застревает» между ними. И чем сложнее геометрия ударника, тем ярче при ударном взаимодействии проявляются его собственные колебания.

Потери энергии ударника (на трение, излучение звука, магнитострикцию) обычно малы. Поэтому за период между ударами собственные (свободные) колебания ударника, как правило, не испытывают значительного затухания.

Собственные колебания в ударнике не возникают, если соударяющиеся детали изготовлены из одинакового материала, имеют равное и постоянное по длине поперечное сечение и абсолютно плоские торцы [3]: в этом случае вся энергия ударника (которую он имел непосредственно перед соударением) полностью без остатка передается штанге⁴.

³ Формулировка В.А. Кашаева.

⁴ Штанга предполагается достаточно длинной (полубесконечной).

Для исследования собственных колебаний ударника рассмотрим известный из литературы пример соударения ударника и штанги, имеющих равное поперечное сечение и изготовленных из одинакового материала [2].

Выберем следующие параметры соударяемых деталей: длина ударника $l = 200$ мм; длина штанги $L = 1000$ мм; диаметр ударника и штанги $d = 34$ мм, плотность $\rho = 7830$ кг/м³, модуль Юнга $E = 210$ ГПа⁵, скорость звука (стержневая) $a = 5179$ м/с, коэффициент Пуассона $\mu = 0,29$.

Радиусы соударяемых торцов штанги и ударника специально выберем плоскими, чтобы иметь вершину ударного импульса максимальной длительности [2, 3]: для штанги радиус 1000 мм, для ударника – 400 мм.

Будем считать, что к моменту начала удара волновой процесс в штанге полностью затух, она свободна от напряжений и неподвижна, а ударник имеет скорость $v = 12,5$ м/с⁶. (Масса ударника $m = 1,422$ кг, кинетическая энергия 111,1 Дж).

Воспользуемся моделью продольного удара, предложенной в работе [5]. (В ней представлена компьютерная программа для численного решения системы линейных волновых уравнений при контактном взаимодействии соударяющихся деталей по теории Герца [3].)

Рассмотрим несколько ударов в такой системе.

Пусть первый удар ударник наносит невозбужденным (все сечения ударника имеют скорость 12,5 м/с и деформации в них отсутствуют).

На рис. 4 показан расчетный ударный импульс и состояние ударника в момент разрыва контакта со штангой. Кривая 1 соответствует напряжению в теле штанги (в зависимости от времени), прямая 2 – максимальному теоретическому уровню напряжений по Сен-Венану [1-3].

Длительность удара составляет 166,65 мкс. Ударник отскакивает от штанги со скоростью $v_0 = 2,27$ м/с, соответственно коэффициент отскока ударника $\lambda = 0,182$.

В правой части рис. 4 представлены графики состояния поперечных сечений ударника: смещения $u(x)$ – эпюра 3, напряжения $G(x)$ – эпюра 4 и скорости $v(x)$ – эпюра 5; (координата x отсчитывается от соударяемого торца).

⁵ Материал деталей – инструментальная закаленная сталь У8А (твердость 55...60 HRC₃).

⁶ Скорости соударения порядка 12...14 м/с типичны для современных отбойных молотков.

Рис. 4. Момент разрыва контакта с ударника со штангой:

1 – ударный импульс в штанге; 2 – максимальный уровень напряжений 253,4 МПа; 3 – смещение сечений ударника; 4 – напряжения в ударнике; 5 – скорость сечений ударника; визиры 6 указывают текущие значения времени t , напряжения G , смещения u и скорости v в сечениях ударника с координатой x

Из графиков следует, что после отскока от штанги в ударнике остались напряжения растяжения, распределенные по его длине в виде импульса треугольной формы с амплитудой 64,9 МПа (25,6 % от максимума ударного импульса). Скорость по поперечным сечениям ударника также распределена неравномерно: левый (соударяемый) торец ударника имеет скорость 3,68 м/с, а правый торец – скорость 1,62 м/с. Наблюдаемая скорость отскока ударника v_0 есть скорость его центра масс:

$$v_0 = \frac{1}{m} \int_0^l v(x) dm = \frac{1}{l} \int_0^l v(x) dx.$$

Рассмотрим изменение состояния ударника во времени после его отскока от штанги.

Рис. 5. Состояние ударника в различные моменты времени t после отскока от штанги:

а) 202,2 мкс; б) 221,4 мкс; в) 240,6 мкс; г) 259,8 мкс: 1 – эпюра напряжений по длине ударника $G(x)$;

2 – эпюра скоростей сечений ударника $v(x)$; φ – условная фаза колебаний; визир 3 указывает величину напряжения и скорости в сечении ударника с координатой x

На рис. 5 представлены эпюры напряжений в ударнике 1 и скорости его сечений 2 в следующие друг за другом моменты времени t (считая от начала процесса соударения). Видно, что в ударнике происходит колебательный процесс: напряжения сжатия сменяются напряжениями растяжения и наоборот, а скорости сечений левой и правой частей ударника синхронно увеличиваются и уменьшаются⁷. Этот процесс и есть собственные колебания ударника, которые представляют собой суперпозицию стоячих волн напряжения (деформации) и связанную с ней суперпозицию стоячих волн скорости в поперечных сечениях ударника [6].

Наблюдая колебания в течение длительного времени, можно установить, что амплитуды напряжения периодически повторяются, но координаты максимумов и минимумов несколько меняются. Мы постарались найти моменты времени с максимальной амплитудой сжимающих (рис. 6, а) и растягивающих (рис. 6, в) напряжений и определить период колебаний ударника. Согласно рис. 6 он равен $2 \cdot (240,4 - 202,2) = 76,4$ мкс. Теоретический период колебаний ударника $\tau = 2l/a = 77,2$ мкс (разница 1,0 %).

Размах колебаний напряжения в ударнике составил: $70,2 + 70,2 = 140,4$ МПа, т.е. 55,4 % от амплитуды ударного импульса 1.

Рассмотрим теперь, как эти колебания влияют на ударный процесс в штанге.

Присвоим колебаниям на рис. 6 условную фазу φ и применим для исследования следующий прием. Для каждой фазы колебаний φ будем возвращать возбужденный ударник снова к штанге, сообщив ему прежнюю поступательную скорость $v = 12,5$ м/с, и организуем новое соударение. Полученные таким образом ударные импульсы сопоставим с импульсом от невозбужденного ударника⁸.

На рис. 7 представлены искомые расчетные ударные импульсы. Как мы видим, возбужденный ударник существенно изменяет как форму ударного импульса, так и его амплитуду. При этом длительность ударного импульса остается практически неизменной.

При невозмущенном ударнике напряжения в ударном импульсе не могут превысить Сен-Венановского уровня [1-3], но при наличии собственных колебаний в ударнике амплитуда напряжений оказывается выше: так у импульса 2 она составляет 260,9 МПа (+3,0 %), у импульса 3 – 262,7 МПа (+3,7 %), а у импульса 4 достигает 279,4 МПа (+10,3 %). У импульса 5 – амплитуда практически совпадает с Сен-Венановским уровнем напряжений.

Разброс амплитуд ударных импульсов в рассматриваемой системе при наличии собственных колебаний ударника достигает 10 % от Сен-Венановского уровня напряжений.

Если после каждого соударения продолжать «возвращать» ударник, то, как показывают расчеты, импульсы, представленные на рис. 7, с незначительными изменениями формы будут повторяться, при этом их амплитуды окажутся в пределах указанного диапазона в 10 %.

На рис. 7 внизу представлен импульс 7, который является средним арифметическим ординат ударных импульсов 2-5. Он практически совпадает с ударным импульсом от невозмущенного ударника, и его амплитуда равна Сен-Венановскому уровню напряжений.

Кроме амплитуды будем также рассматривать интегральные параметры ударных импульсов: количество движения P и энергию импульса W ⁹, которые рассчитываются по формулам:

⁷ Количество движения ударника при этом сохраняется.

⁸ Чтобы осуществить этот прием надо удалить постоянную составляющую из эпюры смещений ударника, а постоянную составляющую эпюры скоростей заменить на предударную скорость.

⁹ Энергия ударного импульса есть сумма его кинетической и потенциальной энергии. В бегущей волне в любой момент времени их величины равны.

$$P = ES \int_0^T \varepsilon(t) dt, \quad W = aES \int_0^T \varepsilon^2(t) dt,$$

где S – площадь поперечного сечения штанги.

В таблице приведено сравнение параметров ударных импульсов 1-5. Из представленных данных видно, что средние значения скорости отскока и коэффициента отскока ударника, а также среднее значение количества движения импульса совпадает с аналогичными параметрами ударного импульса I от невозмущенного ударника. Среднее значение энергии импульса немного превосходит энергию импульса I (+0,3 %), а среднее значение амплитуды импульсов оказалось выше амплитуды импульса I на 4,1 %¹⁰.

Таблица.

Сравнение параметров ударных импульсов напряжений в штанге

Номер импульса и фаза собственных колебаний ударника	Длительность удара T , мкс	Амплитуда ударного импульса, МПа	Количество движения ударного импульса, Н·с	Энергия ударного импульса, Дж	Скорость отскока ударника, v_0 , м/с	Коэффициент отскока λ
1, ударник невозмущен	166,65	253,4	21,00	106,44	2,27	0,182
2, $\varphi = -\pi/2$	167,93	260,9	20,94	107,01	2,23	0,178
3, $\varphi = 0$	166,65	262,7	21,02	106,50	2,29	0,183
4, $\varphi = \pi/2$	164,63	279,4	21,09	107,12	2,33	0,187
5, $\varphi = \pi$	167,63	252,7	20,97	106,49	2,25	0,180
Средний импульс	166,71	263,9	21,00	106,78	2,27	0,182
Погрешность, %	0,0 %	4,1 %	0,0 %	0,3 %	0,0 %	0,0 %

¹⁰ Этот факт подчеркивает важный практический вывод, что при измерении энергии удара машины ударного действия, например тензометрическим методом по ГОСТ 55162, следует усреднять ударные импульсы, а не их амплитуды.

Рис. 7. Ударный импульс в штанге при различной фазе собственных колебаний ударника φ : 1 – невозмущенный ударник; 2 – $\varphi = -\pi/2$; 3 – $\varphi = 0$; 4 – $\varphi = \pi/2$; 5 – $\varphi = \pi$; 6 – максимальный уровень напряжений по Сен-Венану; 7 – средний импульс (среднее арифметическое импульсов 2-5)

Итак, мы показали, что собственные колебания ударника приводят к изменению формы и амплитуды ударного импульса в соударяемой штанге. Эти изменения носят периодический характер и зависят от фазы колебаний в ударнике. Изложенное также позволяет нам полагать, что усреднение ординат ударных импульсов, соответствующих разным фазам собственных колебаний ударника, дает хорошее приближение к ударному импульсу от невозмущенного ударника, при условии равенства предударных скоростей.

Рассмотрим теперь влияние собственных колебаний ударника на работу реальных машин ударного действия. Для большинства таких машин (отбойных, рубильных, клепальных молотков, бетоноломов, перфораторов и др.) период собственных колебаний ударника τ не превышает 100...150 мкс, а период ударов машины (в установившемся режиме работы) составляет порядка 50 мс. Закон распределения периода ударов нормальный¹¹, а его дисперсия σ имеет порядок 10^{-3} с. Поскольку $\sigma \gg \tau$, фаза собственных колебаний ударника

¹¹ Этот факт подтвержден многократными испытаниями различных ударных машин в стендовых и натуральных условиях.

φ , накладывающихся на ударный импульс, носит случайный характер, и закон ее распределения можно считать равномерным.

Представим себе «идеальную ударную машину», которая всегда наносит удары по инструменту (штанге) с одинаковой скоростью v , и рассмотрим два случая: одиночный (образцовый) удар по штанге и периодические удары с постоянной частотой (установившийся режим работы ударной машины).

В случае образцового удара ударный импульс, т.е. относительная деформация поперечного сечения штанги $\varepsilon(t)$, в каждый момент времени t однозначно определяется скоростью ударника v . При периодических ударах на эту деформацию накладываются собственные колебания ударника, поэтому во втором случае ударный импульс $\varepsilon'(t, n)$ можно представить в виде:

$$\varepsilon'(t, n) = \varepsilon(t) + g(t, n), \quad t \in [0, T], \quad g(0, n) = g(T, n) = 0^{12}, \quad (1)$$

где n – порядковый номер удара; $g(t, n)$ – функция возмущения ударного импульса, вызванная собственными колебаниями ударника.

Как было указано выше, в ударных машинах длительность ударного импульса T , как правило, на несколько порядков меньше периода между ударами, и любая фаза собственных колебаний ударника, приходящаяся на момент удара, равновероятна. При колебательном процессе в стоячей волне среднее по времени значение деформации в каждом сечении ударника равно нулю, значит, и математическое ожидание $M[g(t)]$ функции $g(t, n)$ в любой момент времени t также равно нулю:

$$M[g(t)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(t, n) \right\} = 0. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует, что средний импульс относительной деформации при периодических ударах должен совпадать с ударным импульсом, получаемым при образцовом ударе:

$$M[\varepsilon'(t)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon'(t, n) \right\} = M[\varepsilon(t)] + M[g(t)] = \varepsilon(t). \quad (3)$$

Соотношения (2) и (3) имеют экспериментальное подтверждение и используются при измерении энергии удара отбойных молотков методом по амплитуде ударного импульса [7-8]. Как правило, для получения хорошего приближения к импульсу образцового удара достаточно иметь 50...100 импульсов ударной машины.

¹² Торцы ударника до удара свободны, поэтому напряжения на них и деформация отсутствуют.

Рис. 8. Работа пневматического отбойного молотка МО-2Б

а) параметры рабочих циклов; амплитуда и площадь импульсов даны в условных единицах.

б) ударные импульсы: 1 – средний, 2 – текущий

В качестве иллюстрации вышесказанного, на рис. 8 показаны рабочие циклы пневматического отбойного молотка МО-2Б производства ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева». Молоток работал при номинальном давлении сжатого воздуха 0,5 МПа (энергия удара 39 Дж, частота ударов $22,5 \text{ с}^{-1}$). Рабочие циклы молотка представлены в виде синхронизированных по времени графиков давления сжатого воздуха, амплитуды ударного импульса и частоты ударов. Графики получены на современной тензометрической измерительной установке «УИПУ-4М» [8].

При анализе ударных импульсов выбрана область установившейся работы молотка, содержащая 100 последовательных циклов, показанная выделением (см. рис. 8, а). На рис. 8

б представлен средний и один из минимальных по амплитуде текущих импульсов молотка. Справа в условных единицах даны характеристики импульсов: текущие и средние значения амплитуды, количества движения (площади импульса) и энергии импульса (площади квадрата импульса).

При неизменном давлении сжатого воздуха и частоте ударов импульсы различаются: по амплитуде на 3,4 %¹³, по количеству движения – на 1,1 %, по энергии импульса – на 2,1 %. Эти различия вызваны влиянием собственных колебаний ударника.

Вернемся к формуле (1) и найдем математическое ожидание энергии ударного импульса $M[W']$ при установившемся режиме работы ударной машины

$$\begin{aligned} M[W'] &= M \left[aES \int_0^T \varepsilon'^2(t, n) dt \right] = M \left[aES \int_0^T \{\varepsilon(t) + g(t, n)\}^2 dt \right] = \\ &= aES \int_0^T \varepsilon^2(t) dt + M \left[2aES \int_0^T \varepsilon(t) g(t, n) dt \right] + M \left[aES \int_0^T g^2(t, n) dt \right] > W, \end{aligned} \quad (4)$$

где W – энергия ударного импульса образцового удара.

Математическое ожидание произведения ударного импульса $\varepsilon(t)$ и функции возмущения ударного импульса $g(t, n)$ в силу соотношения (2) равно нулю. Из неравенства (4) следует, что в установившемся режиме работы машины средняя энергия ударных импульсов всегда больше энергии среднего импульса. Этот факт следует учитывать при выполнении измерений энергетических параметров машин ударного действия [8-10].

Рассмотрим теперь законы сохранения количества движения и энергии при продольном ударе с учетом собственных колебаний ударника. (Формулы, приведенные далее, справедливы в предположении, что ударник и штанга выполнены из одинакового материала, штанга имеет постоянное поперечное сечение, и ударный импульс полностью укладывается по ее длине.)

При одиночном ударе невозмущенным ударником закон сохранения количества движения имеет вид:

$$mv = P + \rho \int_0^l v(x, T) F(x) dx, \quad P = ES \int_0^T \varepsilon(t) dt, \quad v_0 = \rho \int_0^l v(x, T) F(x) dx,$$

где m – масса ударника; ρ – плотность ударника; P – импульс силы удара или количество движения, заключенное в ударном импульсе; $\varepsilon(t)$ – относительная деформация, наблюдаемая в некотором сечении штанги (ударный импульс, регистрируемый тензодатчиком); $F(x)$ – площадь поперечного сечения ударника; S – площадь поперечного сечения штанги.

Уравнение сохранения количества движения в установившемся режиме работы ударной машины при соударении с возбужденным ударником запишется так:

¹³ Соответственно, разброс амплитуд ударных импульсов составляет около 7 %.

$$\rho \int_0^l v(x, 0) F(x) dx = P + \rho \int_0^l v(x, T) F(x) dx. \quad (5)$$

Баланс энергии при ударе будем рассматривать в предположении, что энергетические потери на множественные явления, сопровождающие ударный процесс, пренебрежимо малы (не учитываем трение между ударником и корпусом машины, магнитострикцию, теплопроводность, излучение звука и т.п.).

При одиночном ударе баланс энергии определяется соотношением:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{\rho}{2} \int_0^l v^2(x, T) F(x) dx + \frac{1}{2E} \int_0^l G^2(x, T) F(x) dx + W.$$

В установившемся режиме работы ударной машины закон сохранения энергии для каждого конкретного удара примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2} \int_0^l v^2(x, 0) F(x) dx + \frac{1}{2E} \int_0^l G^2(x, 0) F(x) dx = \\ = \frac{\rho}{2} \int_0^l v^2(x, T) F(x) dx + \frac{1}{2E} \int_0^l G^2(x, T) F(x) dx + W, \end{aligned} \quad (6)$$

где W – энергия ударного импульса, соответствующая данному конкретному удару.

Согласно расчетам (см. рис. 4 внизу) потенциальная энергия собственных колебаний ударника не превышает 1 % от энергии удара (энергии ударного импульса) и значительно ниже кинетической энергии отскока ударника. В этом случае вторыми слагаемыми в формуле (6) можно пренебречь. Если также пренебречь неравномерностью распределения скорости по длине ударника, т.е. рассматривать ударник как недеформируемое тело массой m , то из равенств (5) и (6) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} mv_y = P - mv_0, \\ \frac{mv_y^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} + W, \end{cases}$$

где v_y – скорость ударника перед ударом (скорость его центра масс).

Решая эту систему уравнений, получаем:

$$\begin{aligned} v_y &= \frac{P}{2m} + \frac{W}{P}, \\ v_0 &= \frac{P}{2m} - \frac{W}{P}. \end{aligned} \quad (7)$$

Соотношение (7) можно рекомендовать для инженерных расчетов. В качестве примера определим скорости удара и отскока ударника для ударного импульса I , показанного на рис. 4 (импульс от невозмущенного ударника).

$$v_y = \frac{21,00}{2 \cdot 1,422} + \frac{106,44}{21,00} = 12,45 \text{ м/с},$$

$$v_o = \frac{21,00}{2 \cdot 1,422} - \frac{106,44}{21,00} = 2,32 \text{ м/с}.$$

Скорость v_y отличается от принятой нами предударной скорости 12,5 м/с на 0,4 %, а скорость отскока ударника – на 2,0 % (см. Таблицу).

Итак, мы рассмотрели возникновение собственных колебаний ударника при его соударении со штангой и показали, что эти колебания оказывают существенное влияние на энергетические параметры машин ударного действия. В этом состояла цель и задача данной статьи: обратить внимание на собственные колебания ударника как на явление, которое следует изучать.

Каков уровень собственных колебаний ударника для серийных ударных машин: отбойных молотков, бетоноломов, перфораторов, – как величина этих колебаний зависит от геометрии ударника и штанги, какова степень затухания колебаний в разных ударных машинах, и самое главное – как эти колебания влияют на производительность машины?

Мы не знаем ответов на эти вопросы...

В работах [8, 9] мы приветствовали переход от измерения кинетической энергии ударника перед ударом к измерению энергии ударного импульса в инструменте ударной машины [10]. Надеемся, что такой переход будет способствовать новым исследованиям и поможет создать эффективные ударные системы с минимальными потерями энергии.

Вопросам исследования машин ударного действия и измерения их энергии удара инженер Вадим Афанасьевич Кашаев посвятил более 50 лет. Он внес значительный вклад в развитие тензометрического метода регистрации ударных деформаций, в теорию вибрации и создание средств виброзащиты ручных ударных машин.

Работая в лаборатории удара и вибрации бурильных машин Института горного дела им. А.А. Скочинского, в 70-е годы В.А. Кашаев создал уникальную измерительную установку «УИПУ» (Установка для Измерения Параметров Удара) и разработал метод измерения энергии удара по амплитуде ударного импульса, регистрируемого в инструменте машины [7-8].

Установка «УИПУ» испытала 4 модификации и прошла государственную метрологическую аттестацию. С 1980 года по 2001 год установка использовалась на Томском электромеханическом заводе им. В.В. Вахрушева (ТЭМЗ) для испытаний серийной продукции. С помощью установки «УИПУ» разработано и поставлено на производство более 20 моделей пневматических отбойных, рубильных и клепальных молотков с годовым объемом серийного производства более 200000 шт.

В 2001 г. под руководством В.А. Кашаева в ООО «УДАРМАШ» создан и внедрен на ТЭМЗ модернизированный компьютерный измерительный комплекс «УИПУ-4М», который по точности и стабильности измерений и на сегодняшний день превосходит мировые аналоги

[8, 10]. Погрешность измерения энергии удара с помощью комплекса «УИПУ-4М» составляет менее 2,0 %.

В.А. Кашаевым разработаны прецизионные помехозащищенные тензорезисторные измерительные преобразователи на базе рабочего инструмента ударных машин, нестабильность которых менее 0,15 %.

В.А. Кашаеву принадлежит честь открытия собственных колебаний ударника, а также открытие и исследование источника вибрации ударных машин «скачкообразное внедрение рабочего инструмента в разрушаемую горную породу» [11], характерного для угля и материалов малой прочности.

В 2014 г. вышел ГОСТ 55162 – 2012 «Оборудование горно-шахтное. Молотки отбойные пневматические. Требования безопасности и методы испытаний». В него вошли тензометрический метод измерения энергии удара и новые подходы к установлению вибрационных характеристик машин в зависимости от их силовых и энергетических параметров, разработанные под руководством В.А. Кашаева.

Во многом благодаря работам В.А. Кашаева в Институте горного дела им. А.А. Скочинского удалось выполнить фундаментальные исследования ударных процессов в стержневых системах и на их основе создать мощные пневматические молотки и бетоноломы со сниженной вибрацией и шумом, выпускаемые сегодня отечественной промышленностью (ОАО «ТЭМЗ им. В.В. Вахрушева, ООО «ТоМаш», ООО «Томский завод Кузнецова»).

Память о талантливом ученом и выдающемся инженере Вадиме Афанасьевиче Кашаеве навсегда останется в сердцах «молотошников» – специалистов, занимающихся исследованиями и разработкой ручных машин ударного действия.

Список литературы

1. Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. Прикладная теория соударений стержней с торцами произвольной формы. Научный доклад. - М.: Институт горного дела им.А.А.Скочинского, 1964. – 32 с.
2. Ю.В. Флавицкий, К.С. Хомяков. Определение импульсов напряжения при продольном соударении упругих тел. Краткий научный отчет. - М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1964. – 31 с.
3. Е.В. Александров, В.Б. Соколинский. Прикладная теория и расчеты ударных систем. - М.: Наука, 1969 – С. 201.
4. Манжосов В.К. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры / В.К. Манжосов, В.В. Слепухин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.
5. Ямпольский Д.З. Численное моделирование продольного удара. Сравнение с экспериментом. // Вестник научно-технического развития. - 2019. -№ 9 (145). - С. 30–51. <http://www.vntr.ru/vols/2019-09/vntr2019-145-4.pdf> (дата обращения: 04.09.2019).
6. Ерофеев В.И., Кажарев В.В., Семерикова Н.П. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 208 с.
7. Кашаев В.А. Определение энергетических параметров пневматических молотков тензометрическим методом // Сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1987. – С. 104-107.
8. Кашаев В.А., Ямпольский Д.З. Тензометрический метод измерения удара. Российский опыт. Достижения и перспективы. // Вестник научно-технического развития. –№ 2 (114). – 2017. – <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=1011> (дата обращения: 6 декабря 2016 года).

9. Ямпольский Д.З., Ванаев В.С. Анализ методики испытаний электрических машин с целью определения энергии удара. // Вестник машиностроения. – 2018. - № 7. – С. 47-54.
10. ЕРТА – European Power Tool Association. Procedure 05 “Measurement of the single impact energy of rotary hammers and breakers. – 23 p., 2016 / Европейская Ассоциация Производителей Электроинструмента. Методика измерения единичной энергии удара перфораторов и отбойных молотков. – 23 стр., 2016.
11. Кашаев В.А. Влияние скорости внедрения инструмента на вибрацию отбойных молотков / Анисимов В.Г., Кашаев В.А., Флавицкий Ю.В., Ямпольский Д.З. // Повышение надежности пневмоударных буровых машин: Сб. науч. тр. под ред. А.Д. Костылева / ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1987. - С 98-104.

Дата поступления: 11 мая 2020 г.