УДК 62-97/-98

ЭНЕРГИЯ УДАРА ИЛИ ЭНЕРГИЯ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА: ЧТО И КАК ИЗМЕРЯТЬ?

© Дмитрий Зиновьевич Ямпольский

Общество с ограниченной ответственностью «УДАРМАШ», Москва, Россияudarmash@mail.ru

Аннотация. В предлагаемом обзоре рассмотрены физические закономерности ударных процессов в машинах ударного действия, методики и средства их регистрации тензометрическим методом. Даны рекомендации по измерениям энергии единичного удара и энергии ударного импульса, аттестации измерительных преобразователей и обработке экспериментальных данных. Приведены примеры измерений с оценкой погрешности получаемых результатов.

Ключевые слова: машины ударного действия, энергия единичного удара, энергия ударного импульса, тензометрический метод измерения удара.

IMPACT ENERGY OR ENERGY OF THE SHOCK PULSE: WHAT AND HOW TO MEASURE?

© D.Z. Yampolsky

The limited liability company «UDARMASH», Moscow, Russiaudarmash@mail.ru

Abstract. In the proposed review, the physical regularities of shock processes in impact machines, procedures and means of their registration by the strain gauge method are considered. Recommendations for measuring the energy of a single impact and the energy of a shock pulse, certification of measuring transducers and processing of experimental data are given. Examples of measurements with an estimate of the error of the results obtained are given.

Key words: impact machines, energy of a single impact, energy of a shock pulse, strain gauge method of impact measurement.

1. **Введение.** Эффективность машины ударного действия (далее ударной машины) определяется ее производительностью. Для некоторых машин, например, для рубильных молотков и перфораторов, производительность можно измерить непосредственно при рабочей операции – рубке металла или бурении шпуров. Для других машин: отбойных, клепальных, зубильных молотков, бетоноломов, – производительность таким способом определить сложно – в силу разнообразия рабочих операций и разрушаемых материалов. Поэтому в качестве технических характеристик ударной машины принято использовать иные параметры: энергию единичного удара, частоту ударов и мощность, – которые возможно

измерить в лабораторных условиях и по которым удобно сопоставлять машины друг с другом [1, 2].

Указанные параметры используются традиционно. Но в последнее время, в связи с принятием Европейской Ассоциацией Производителей Электроинструмента (ЕРТА) корпоративного стандарта «Методика 05/2009 «Измерение энергии единичного удара перфораторов и отбойных молотков» (далее «Методика ЕРТА») [3], к ним добавились энергия ударного импульса и ударная мощность.

Дадим определения этим параметрам.

Энергия единичного удара – кинетическая энергия ударника ударной машины непосредственно перед его ударом по рабочему инструменту.

Частота ударов – частота следования ударов ударника по рабочему инструменту.

Мощность – количество энергии единичного удара, генерируемой машиной в единицу времени; мощность равна произведению энергии единичного удара на частоту ударов.

Энергия ударного импульса – энергия первой (прямой) волны деформации сжатия в рабочем инструменте ударной машины, возбуждаемой ударником при ударе. Эту волну принято называть ударным импульсом.

Ударная мощность – количество энергии, передаваемой ударником рабочему инструменту в единицу времени; ударная мощность равна произведению энергии ударного импульса на частоту ударов.

Совокупность энергии единичного удара, частоты ударов и мощности принято называть **энергетическими параметрами ударной машины**⁸. Мы предлагаем расширить этот термин, добавив в него также энергию ударного импульса и ударную мощность.

Энергия единичного удара и мощность характеризуют эффективность привода ударной машины, а энергия ударного импульса и ударная мощность – эффективность привода машины совместно с ее ударной системой⁹.

Производительность характеризует эффективность ударной машины в целом.

Настоящий обзор посвящен вопросу, как измерять энергетические параметры ударных машин: какие из них и как целесообразно использовать в конкретных случаях. В нем рассмотрен тензометрический метод регистрации ударных деформаций в рабочем инструменте машины [4-5].

Тензометрический метод измерения энергии единичного удара был предложен Международным стандартом ИСО 2787-1984 «Инструменты пневматические ротационные и ударные. Эксплуатационные испытания», он также внесен в отечественный стандарт ГОСТ Р 55162 «Оборудование горно-шахтное. Молотки отбойные пневматические. Требования безопасности и методы испытаний».

Тензометрический метод универсален: он позволяет измерять все вышеуказанные энергетические параметры ударной машины без внесения каких-либо изменений в ее конструкцию непосредственно в рабочем инструменте. Регистрируемый в методе ударный импульс несет в себе информацию о скорости ударника перед ударом и скорости его отскока, о величине напряжений в инструменте, количестве движения и энергии, идущей на выполнение полезной работы. Ни один из других методов измерения энергетических параметров ударных машин: метод шариковых отпечатков, метод конечных скоростей [6],

⁸ В дополнение к энергетическим параметрам следует рассматривать также силовые параметры удара: максимальный уровень напряжений в инструменте, максимальную и среднюю силу удара.

⁹ Ударные машины с равной энергией импульса, но разной силой удара неодинаковы по эффективности.

метод индикаторных диаграмм [2, 7], метод работомеров, – не дает такой полноты информации об ударных процессах.

С практической точки зрения тензометрический метод наиболее отработан: погрешность измерения энергии единичного удара по результатам государственной метрологической аттестации составляет 5 %¹⁰, нестабильность измерительных преобразователей менее 0,15 %, а воспроизводимость результатов испытаний этим методом достигнута на уровне 1,5 % [5]. Метод характеризует малая трудоемкость и высокая оперативность получения параметров машин.

Соударяющиеся детали ударных машин – ударники и рабочий инструмент – являются стержневыми системами. При ударе в них возникают продольные, изгибные, крутильные, а также поверхностные волны [8-9]. Но поскольку длины стержней, как правило, в несколько раз превосходят их диаметры, поперечным движением частиц в стержнях можно пренебречь и рассматривать только продольные волны.

Экспериментально установлено, что при ударе стальных стержней на расстоянии от точки контакта более 1,25 от диаметра стержня распространяется плоская продольная волна сжатия [8]. Эта волна описывается теорией Сирса [10]¹¹, сочетающей в себе контактное взаимодействие стержней по Герцу [11] и распространение возникающих возмущений по стержням как волноводам по Сен-Венану и Бернулли [9, 12-13].

Для стальных стержней теория Сирса подтверждена экспериментально [8, 14-16]. Из нее следует, что амплитуда ударного импульса линейно зависит от скорости ударника, а длительность импульса (т.е. длительность соударения), наоборот, от скорости ударника не зависит и определяется физическими константами (модуль Юнга, плотность, стержневая скорость звука, коэффициент Пуассона) и геометрией соударяющихся деталей.

На рис. 1 показаны осциллограммы ударных импульсов в инструменте при различных скоростях ударника – от 1,0 м/с до 5,0 м/с. Импульсы получены в лаборатории удара и вибрации Института горного дела им.А.А. Скочинского при одиночных образцовых ударах (1970 г.). Они иллюстрируют описанные выше зависимости.

Сила упругого взаимодействия по Герцу нелинейна: она зависит от сближения торцов соударяемых деталей в степени $3/2$ [8, 11], поэтому при большом различии скоростей ударника форма импульсов отличается. Но, при небольшой разнице в скоростях соударения, импульсы похожи и близки по форме.

Для целей измерения энергетических параметров ударной машины, когда она работает в установившемся режиме, и ее рабочие параметры варьируются в пределах 10...15 %, хорошим приближением к результатам эксперимента является представление о подобии ударных импульсов. Далее мы будем исходить из утверждения, что в конкретной ударной системе, состоящей из стального ударника и стального рабочего инструмента, ударные импульсы подобны с коэффициентом подобия, равным отношению скоростей ударника¹².

¹⁰ По данным разработчика измерительного комплекса «УИПУ-4М» погрешность не превышает 2 %.

¹¹ В дальнейшем положения И.Е. Сирса (1908 г.) были развиты В.А. Праусом (1935 г.), Ф.К. Арндтом (1960 г.) [12], В.Е. Александровым и В.Б. Соколинским (70...80-е годы в ИГД им. А.А.Скочинского).

¹² Предполагается, что ударный импульс полностью укладывается по длине рабочего инструмента.

Рис. 1. Ударные импульсы при одиночных ударах

для различных скоростей ударника v_y , м/с, снизу вверх:

- а) ударник отбойного молотка МО-9К: 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; метки времени 10 мкс;
 б) ударник длиной 200 мм и радиусом торца 300 мм: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; метки времени 5 мкс;
 в) ударник длиной 200 мм и радиусом торца 17,5: 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; метки времени 5 мкс;
 г) фотография измерительного комплекса

2. Свойства ударного импульса. На рис. 2 показана схема соударения ударника с измерительным инструментом.

Рис. 2. Соударение ударника с инструментом постоянного поперечного сечения

1 – ударник; 2 – измерительный инструмент; 3 – тензодатчик; 4 – ударный импульс деформации сжатия; 5 – приемное устройство энергии ударного импульса (объект обработки или его имитатор); ϵ – относительная деформация инструмента; v_y , v_0 – предударная скорость ударника и скорость его отскока; L – длина ударного импульса

Ударный импульс – прямая волна деформации сжатия, возникшая при ударе и движущаяся по стержню постоянного поперечного сечения, – описывается волновым уравнением:

$$u_{tt} - a^2 u_{xx} = 0,$$

где $u = u(x, t)$ – смещение сечения стержня с координатой x от положения равновесия в момент времени t ; a – скорость распространения продольной волны в стержне, $a = \sqrt{E/\rho}$, E – модуль Юнга материала стержня, ρ – его плотность.

Из решения Даламбера для прямой волны следует, что относительная деформация сечения стержня и скорость частиц в нем связаны соотношением

$$\varepsilon \equiv u_x = -u_t/a. \quad (1)$$

Здесь и далее относительную деформацию стержня будем обозначать $\varepsilon = \varepsilon(x, t)$ ¹³.

Кинетическая и потенциальная энергия ударного импульса рассчитываются по формулам

$$K = \frac{1}{2} \int_0^L \rho S [u_t]^2 dx, \quad \Pi = \frac{1}{2} \int_0^L SE [u_x]^2 dx,$$

где S – площадь поперечного сечения стержня; L – длина ударного импульса (см. рис. 2).

Производя замену переменных $t = x/a$, с учетом (1) получаем:

$$K = \frac{1}{2} \int_0^L \rho S [u_t]^2 dx = \frac{1}{2} \rho S a^3 \int_0^T \varepsilon^2(x, t) dt = \frac{1}{2} a E S \int_0^T \varepsilon^2(x, t) dt,$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L SE [u_x]^2 dx = \frac{1}{2} a E S \int_0^T \varepsilon^2(x, t) dt,$$

где $T = L/a$ – длительность ударного импульса; x – координата его наблюдения.

Таким образом, потенциальная и кинетическая энергии ударного импульса равны, а их сумма, т.е. энергия ударного импульса W , определяется соотношением

$$W = K + \Pi = a E S \int_0^T \varepsilon^2(x, t) dt. \quad (2)$$

Количество движения P , заключенное в ударном импульсе, в свою очередь, равно

$$P = \int_0^L \rho S u_t dx = -\rho a^2 S \int_0^T \varepsilon(x, t) dt = -ES \int_0^T \varepsilon(x, t) dt. \quad (3)$$

Поскольку деформацию и напряжения сжатия графически удобно изображать положительной, знак минус далее мы будем опускать, полагая $\varepsilon(x, t) > 0$.

¹³ Знак минус в формуле (1) связан с тем, что относительная деформация сжатия отрицательна.

Рассмотрим относительную деформацию тензодатчика при прохождении через него ударного импульса. Реакция датчика ξ в момент времени t равна¹⁴

$$\xi(t) = \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon(x, t) dx, \quad (4)$$

где l – длина базы тензодатчика.

Найдем

$$ES \int_0^T \xi(t) dt = ES \int_0^T \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon(x, t) dx dt = \frac{1}{l} \int_0^l dx \left\{ ES \int_0^T \varepsilon(x, t) dt \right\} = P.$$

Тензодатчик как линейный фильтр полностью пропускает количество движения, заключенное в ударном импульсе.

Иначе обстоит дело с энергией ударного импульса.

Строго говоря,

$$aES \int_0^T \xi^2(x, t) dt = aES \int_0^T \left\{ \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon(x, t) dx \right\}^2 dt \neq aES \int_0^T \varepsilon^2(x, t) dt = W.$$

Преобразуем формулу (4), произведя замену переменной интегрирования $t = x/a$:

$$\xi(t) = \frac{1}{l} \int_0^l \varepsilon(x, t) dx = \frac{a}{l} \int_{-l/(2a)}^{l/(2a)} \varepsilon(x_0, t) dt \approx \varepsilon(x_0, t), \quad (5)$$

где x_0 – координата середины решетки тензодатчика.

Формула (5) справедлива, если за время $\Delta t = l/a$ прохода волны по базе тензодатчика деформация изменяется по закону, близкому к линейному. В работе [17] показано, что при квадратичной нелинейности абсолютная погрешность измеренной деформации будет равна $\varepsilon''(x_0, t) \cdot l/12$. Чтобы уменьшить погрешность усреднения, базу тензодатчика l выбирают минимальной, а его электрическое сопротивление стараются сохранять по возможности большим, для обеспечения лучшего соотношения «сигнал-шум».

Методика ЕРТА [3] рекомендует применять тензодатчики с базой менее 6 мм и сопротивлением более 350 Ом¹⁵. (При скорости звука в стали 5100 м/с время Δt для такого тензодатчика составит $\sim 1,2$ мкс.)

Длительности ударных импульсов, как правило, более 50 мкс, однако их фронты (особенно передний фронт) достаточно круты. В зависимости от радиусов соударяемых торцов длительность фронта может составлять ~ 10 мкс [8, 14-16]. Соответственно, искажение ударного импульса на начальном и конечном участках фронта, а также в районе вершины импульса, может быть значительным. Но, если длительность фронта мала по сравнению с

¹⁴ Пуассоново расширение почти не влияет на сигнал тензодатчика, ориентированного вдоль оси удара.

¹⁵ В установке «УИПУ-4М» применены 2 тензодатчика с базой 25 мм и сопротивлением 400 Ом.

длительностью всего импульса, то и его вклад в энергию ударного импульса будет незначителен.

В любом случае для конкретной ударной системы необходима оценка погрешности, вносимой тензодатчиком, на математических моделях, например, [8, 16, 18].

В качестве иллюстрации вышесказанного, на рис. 3 представлены расчетные ударные импульсы при соударении ударника пневматического отбойного молотка МО-2Б (производитель ОАО «Томский электромеханический завод им. В.В.Вахрушева», далее ТЭМЗ) и измерительной пики по ГОСТ Р 55162: импульсы мгновенной деформации 1 и имитация сигнала тензодатчика 2 ($l = 25$ мм и $l = 5$ мм). Расчеты выполнены на модели [16] при скорости ударника 14,06 м/с (масса ударника 0,433 кг, его соударяемый радиус 400 мм, радиус пики 10000 мм (плоский торец), шаг по координате 0,05 мм, шаг по времени 0,005 мкс).

Рис. 3. Искажения ударного импульса при различной базе тензодатчика l :

а) $l = 25$ мм; б) $l = 5$ мм; в) – схема соударения (размеры в мм);

1 – импульс напряжения в измерительной пике; 2 – сигнал с тензодатчика; 3 – тензорезисторы;

W_1 – энергия ударного импульса в штанге; W_2

– энергия ударного импульса по тензодатчику

При базе тензодатчика 25 мм (рис. 3, а) видны искажения в начале и в конце ударного импульса, а также сглаживание его вершины. Амплитуда напряжения отличается незначительно: 318,1 МПа против 319,2 МПа по сигналу тензодатчика, т.е. на -0,3 % меньше. Длительность ударного импульса по тензодатчику 86,5 мкс, по напряжениям в

измерительной пике – 89,8 мкс (до момента разрыва контакта ударника с пикой – 85,5 мкс¹⁶): отличие на -3,7 %.

Энергия ударного импульса, рассчитанная по формуле (2), составляет: для импульса 1 – $W_1 = 41,2$ Дж, для импульса 2 – $W_2 = 41,0$ Дж: разница -0,37 %.

При базе тензодатчика 5 мм (рис. 3, б) ударный импульс в измерительной пике и сигнал с тензодатчика практически совпадают – по амплитуде, длительности и энергии (отличие менее 0,02 %).

3. **Метод измерения энергии единичного удара.** На закономерности подобия ударных импульсов основан метод измерения энергии единичного удара и мощности ударной машины. Метод описан в [4, 5] и ГОСТ Р 55162.

В установившемся режиме работы машины регистрируют последовательность ударных импульсов деформации (обычно 100 импульсов) и определяют их среднюю амплитуду.

Рис. 4 – Принципиальная схема градуировочного стенда для выполнения образцовых ударов

1 – станина; 2 – колонны; 3 – подвижная траверса; 4 – зажимы; 5 – неподвижная траверса; 6 – поглопителя энергии; 7 – резиновый буфер; 8 – пика поглопителя энергии; 9 – измерительный инструмент (пика); 10 – пневматический ускоритель; 11 – поршень; 12 – микрометрический винт; 13 – направляющая; 14 – диаметрные отверстия; 15 – центрирующая втулка; 16 – пусковой механизм; 17 – золотник с ручным пуском; 18 – световые излучатели; 19 – диафрагмы; 20 – фотодетекторы; 21 – ударник; 22 – тензодатчики

Далее выполняется градуировка. Ударник и измерительный инструмент устанавливаются на специальный стенд, схема которого показана на рис. 4 (см. также ГОСТ Р 55162). Стенд представляет собой вертикальный копер с механизмом разгона ударника и оптической системой измерения его скорости.

Согласно предсказаниям теории Сирса, при равных скоростях соударения амплитуда градуировочного импульса совпадает со средней амплитудой, полученной при испытании ударной машины. Поэтому на стенде выполняют одиночные образцовые удары, добиваясь совпадения амплитуд. При образцовом ударе фиксируют время τ пролета ударником калиброванной базы B_c , а энергию единичного удара A определяют по формуле:

$$A = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{B_c}{\tau} - \frac{g\tau}{2} \right)^2 - 2gh \right], \quad (6)$$

¹⁶ Наличие бурта у измерительной пикой удлиняет ударный импульс за счет отраженных волн, циркулирующих в ее хвостовике.

где m – масса ударника; g – ускорение свободного падения; h – расстояние от верхнего луча базы стенда до соударяемого торца измерительного инструмента.

Формула (6) описывает метод полного замещения. При разнице амплитуд среднего и градуировочного импульсов менее 5 % используют метод неполного замещения, и энергию удара рассчитывают так:

$$A = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{B_c}{\tau} - \frac{g\tau}{2} \right)^2 - 2gh \right] \cdot \left\{ \frac{H_{и}}{H_{г}} \right\}^2,$$

где $H_{г}$, $H_{и}$ – амплитуды ударных импульсов при градуировке и испытании ударной машины соответственно.

Описанный метод был предложен и разработан инженером В.А. Кашаевым в Институте горного дела им. А.А.Скочинского. С 1980 года он успешно используется на Томском электромеханическом заводе им. В.В.Вахрушева для контроля энергетических параметров пневматических отбойных, рубильных и клепальных молотков, а с 2001 года – бетоноломов. Метод не требует знания физических констант измерительного инструмента: модуля Юнга, плотности, скорости звука, площади поперечного сечения, – а также параметров тензодатчика. В этом его главное достоинство. Но для реализации метода необходима высокая стабильность измерительного инструмента. Эта задача также была решена: как мы указывали выше, нестабильность измерительных пик получена на уровне менее 0,15 %.

При разработке метода измерения энергии единичного удара было обнаружено явление незатухания собственных колебаний ударника [19].

Известно, что по завершению соударения с рабочим инструментом ударник отскакивает возбужденным. В нем остаются продольные колебания в виде стоячих волн деформации сжатия-растяжения. Но, в силу малой диссипации энергии, эти колебания не затухают за период движения ударника, и при следующем ударе накладываются на новый ударный импульс, искажая его форму и изменяя его амплитуду. При этом ударные импульсы могут отличаться друг от друга по амплитуде на 10 % (т.е. на 20 % по энергии единичного удара).

В работе [19] показано, что фаза собственных колебаний, приходящихся на момент удара, носит случайный характер, и закон ее распределения является равномерным. При колебательном процессе в стоячей волне среднее по времени значение деформации в каждом сечении ударника равно нулю. Поэтому усреднение амплитуд ударных импульсов позволяет существенно снизить или полностью устранить погрешность от собственных колебаний ударника. Практика испытаний пневматических отбойных молотков показала, что для обеспечения точности измерений энергии единичного удара ~2,5 % достаточно усреднить амплитуды 100 последовательных ударных импульсов.

Если усреднять не амплитуду, а соответствующие ординаты ударных импульсов, то полученный таким образом средний ударный импульс будет в точности совпадать с импульсом образцового удара при градуировке (при одинаковых скоростях соударения ударника с измерительным инструментом).

Из сказанного следует, что измерять энергию единичного удара описанным методом можно не только по амплитуде, но и по другим параметрам ударного импульса:

- площади всего ударного импульса¹⁷;
- части площади импульса, отстоящей на заданный интервал времени от его начала;
- текущему значению импульса, также отстоящему на заданный интервал времени от его начала.

¹⁷ Площадь ударного импульса пропорциональна его количеству движения.

Последние два параметра целесообразно применять при коротком инструменте, когда волна, отраженная от его противоположного конца, накладывается на ударный импульс. При этом в формуле (5) для метода неполного замещения под величиной H следует понимать значение соответствующего параметра ударного импульса, используемого при измерениях.

4. **Энергия единичного удара и энергия ударного импульса.** Для сопоставления энергии единичного удара и энергии ударного импульса рассмотрим соударение ударника с инструментом постоянного поперечного сечения (см. рис. 2). Будем полагать, что ударная машина работает в установившемся периодическом режиме и ударный импульс полностью укладывался по длине инструмента.

Запишем уравнения сохранения количества движения и энергии при некотором ударе:

$$mv_y = P - I - mv_0, \quad v_0 \geq 0,$$

$$\frac{mv_y^2}{2} + U^- = W + \frac{mv_0^2}{2} + U^+ + Q,$$

где v_y , v_0 – скорости удара и отскока ударника; U^- , U^+ – потенциальная энергия собственных колебаний ударника, соответственно до и после удара; I – импульс сил трения, действующих при перемещении ударника и инструмента за время соударения; Q – энергетические потери от сопровождающих удар физических явлений: работа сил трения, магнитострикция, акустическая эмиссия и др.

Соударяемые торцы ударника и инструмента выполняют сферическими, что обеспечивает центральность удара, уменьшает силы трения и изгибные напряжения. В этом случае импульсом сил трения I в первом уравнении можно пренебречь [8, 20]; также можно пренебречь и потерями Q во втором уравнении.

Получаем для каждого удара следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} mv_y = P - mv_0, \\ \frac{mv_y^2}{2} = W + \frac{mv_0^2}{2} + (U^+ - U^-). \end{cases} \quad (7)$$

Поскольку $U^+ \geq U^-$, в силу частичного затухания собственных колебаний за период между ударами [19], из второго уравнения в (7) следует, что **энергия ударного импульса всегда меньше энергии единичного удара**.

Как было указано выше, при равных скоростях соударения средний ударный импульс совпадает с импульсом при градуировке. Поскольку скорости соударения равны, из первого уравнения (7) следует равенство значений среднего коэффициента отскока ударника при испытании ударной машины и коэффициента отскока, зафиксированного при градуировке.

Для большинства ударных машин коэффициент отскока ударника $\lambda = v_0/v_y$ находится в пределах 0,2...0,3 [1-2, 8, 18-20]. Поэтому различие значений энергии единичного удара и энергии ударного импульса может достигать 10 %.

Следуя методике работы [19], рассмотрим работу ударной машины со средней скоростью соударения $\bar{v}$. Исходя из предложенной гипотезы подобия, любой ударный импульс $\varepsilon(t)$ при скорости соударения $v = \bar{v} \pm \Delta v$ ($\Delta v \ll \bar{v}$) можно представить как

$$\varepsilon(t) = \frac{v}{\bar{v}} \varepsilon(t) + g(t),$$

$$\mathcal{E}(t) = \mathbf{M} [\varepsilon(t)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(t) \right\}, \quad \mathbf{M}[g(t)] = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i(t) \right\} = 0, \quad t \in [0, T],$$

где $\mathcal{E}(t)$ – математическое ожидание среднего ударного импульса, полученного усреднением ординат текущих импульсов; $\varepsilon_i(t)$ и $g_i(t)$ – ударный импульс и наложенные на него собственные колебания ударника для i -го удара; n – число ударов; T – длительность ударных импульсов; $\mathbf{M}$ – оператор математического ожидания; $\mathbf{M}[g(t)] = 0$ в силу равномерного закона распределения фазы собственных колебаний ударника [19].

Найдем математическое ожидание энергии ударного импульса $\mathbf{M}W$ в предположении, что скорость v распределена по нормальному закону:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}W &= \mathbf{M} \left[aES \int_0^T [\varepsilon(t)]^2 dt \right] = aES \cdot \mathbf{M} \left[\int_0^T \left[\frac{v}{\bar{v}} \varepsilon(t) + g(t) \right]^2 dt \right] = \\ &= aES \left\{ \mathbf{M} \left[\int_0^T \left[\frac{\bar{v} \pm 2\bar{v}\Delta v + (\Delta v)^2}{\bar{v}} \varepsilon^2(t) + 2 \left[1 \pm \frac{\Delta v}{\bar{v}} \right] g(t) + g^2(t) \right]^2 dt \right] \right\} = \\ &= aES \left\{ \mathbf{M} \left[\int_0^T \left(1 + \frac{(\Delta v)^2}{\bar{v}} \right) \varepsilon^2(t) dt \right] \pm 2\mathbf{M} \left[\frac{\Delta v}{\bar{v}} g(t) \right] + \mathbf{M}[g^2(t)] \right\} > aES \int_0^T \varepsilon^2(t) dt = \bar{W}, \end{aligned}$$

т.к. вероятности скоростей $\bar{v} - \Delta v$ и $\bar{v} + \Delta v$ равны, а $\bar{W}$ – энергия среднего импульса.

Таким образом, **в установившемся режиме работы ударной машины среднее значение энергии ударного импульса больше, чем энергия среднего импульса.**

Измерение энергии единичного удара возможно на рабочем инструменте практически любой длины. (Исключение составляют, пожалуй, клепальные и пучковые молотки: из-за невозможности размещения тензодатчиков для них приходится применять специальный инструмент).

Измерение энергии ударного импульса имеет ряд существенных ограничений.

Во-первых, требуется достаточно длинный инструмент, чтобы волна, отраженная от объекта обработки или его имитатора (см. рис. 2), не накладывалась на ударный импульс. Такой инструмент, в общем случае, будет отличен от рабочего инструмента ударной машины.

Во-вторых, собственные колебания ударника не позволяют использовать градуировку, как в методе измерения энергии единичного удара, поскольку, как показано выше, при равенстве скоростей соударения среднее значение энергии ударного импульса отличается от энергии градуировочного ударного импульса.

В-третьих, наличие бурта в измерительном инструменте, на который опирается ударная машина, приводит к частичному отражению от него ударного импульса и рассеиванию энергии, в результате чего импульс, дошедший до тензодатчика, по амплитуде и энергии меньше, чем аналогичный импульс в инструменте без бурта.

Методика ЕРТА рекомендует использовать рабочий инструмент без буртов. Но для многих ударных машин такой измерительный инструмент использовать нереально.

На наш взгляд, требование отсутствия бурта излишне, поскольку при измерении нас интересует энергия, которая дойдет до обрабатываемого объекта, т.е. энергия ударного импульса, прошедшего через борт.

В работе [21] была предложена методика измерений ударного импульса, основанная на аттестации измерительного инструмента (пики) с использованием закона сохранения количества движения при ударе.

Рис. 5 – Измерительная пика с двумя группами тензодатчиков 1 и 2
 d – диаметр тела пики; L – расстояние между датчиками

В случае инструмента с буртом эту методику необходимо изменить. Ниже изложены наши предложения.

На измерительный инструмент диаметрально противоположно наклеиваются две группы тензодатчиков, как показано на рис. 5: одна непосредственно за буртом, а другая у противоположного конца инструмента. Тензодатчики должны быть из одной серии с одинаковым коэффициентом тензочувствительности. Расстояние между датчиками L выбирается максимально возможным, исходя из условий формирования плоской продольной волны при ударе, также оно должно быть больше длины ударного импульса. Оба торца инструмента выполняются с одинаковыми радиусами для обеспечения центральности удара. Аттестация измерительного инструмента проводится следующим образом.

Измерительный инструмент устанавливается на градуировочный стенд (см. рис. 3) торцом A вверх, и образцовые удары наносятся по противоположному торцу B . При ударе измеряется интервал времени Δt , за который ударный импульс проходит расстояние L между группами датчиков. Скорость звука a в инструменте определяется как $a = L/\Delta t$, а модуль Юнга E рассчитывается по известной зависимости $E = \rho a^2$. Определение плотности инструмента ρ и площади поперечного сечения инструмента S не представляет сложности и выполняется стандартными методами с высокой точностью.

Из закона сохранения количества движения при ударе определяется коэффициент чувствительности измерительного тракта γ :

$$\gamma = \frac{m(v_y + v_o)}{ES \int_0^T U_r(t) dt}, \quad v_y = \sqrt{\left(\frac{B}{\tau_y} - \frac{g\tau_y}{2}\right)^2 - 2gh}, \quad v_o = \sqrt{\left(\frac{B}{\tau_o} + \frac{g\tau_o}{2}\right)^2 + 2gh},$$

где $U_r(t)$ – сигнал в зависимости от времени t , поступающий с тензодатчика; τ_y и τ_o – время пролета ударником калиброванной базы стенда до и после удара соответственно.

При испытании ударной машины измерительный преобразователь используется в обычном режиме, и удары наносятся по торцу A . Энергия ударного импульса W рассчитывается по формуле

$$W = \gamma^2 a E S \int_0^T U_s^2(t) dt = \frac{m^2(v_y + v_o)^2}{a\rho} \cdot \frac{\int_0^{T_s} U_s^2(t) dt}{\int_0^{T_r} U_r(t) dt},$$

где $U_s(t)$ – ударный импульс, регистрируемый при работе машины; T_r – длительность ударного импульса при градуировке; T_s – длительность ударного импульса при испытании ударной машины.

Оценим погрешность предлагаемой методики измерений. Воспользуемся техническими характеристиками измерительного комплекса «УИПУ-4М» [5] и данными ГОСТ Р 55162.

Для испытаний пневматических отбойных молотков применяется измерительная пика длиной 340 мм и диаметром $d = 24$ мм. На этой пике можно расположить две группы тензодатчиков с базой 5 мм так, чтобы расстояние между ними было $L = 200$ мм. Абсолютная погрешность установки датчиков составит 0,5 мм.

При ударе по торцу B ударный импульс пройдет расстояние между группами датчиков за 40 мкс. Частота выборки данных АЦП установки «УИПУ» 1 МГц, поэтому абсолютная погрешность определения времени по фронту импульса равна 0,5 мкс. Тогда относительная погрешность θ_a измерения скорости звука a будет равна

$$\theta_a = 100 \sqrt{\left(\frac{0,5}{200}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{40}\right)^2} = 1,3 \, \%.$$

Относительная погрешность определения скорости ударника на градуировочном стенде $\theta_v = 0,1 \, \%$. Сигнал с тензодатчика оцифровывается 12-разрядным АЦП, поэтому относительная погрешность θ_U интегралов в формуле (10) не превосходит $0,02 \, \%$ ¹⁸. Относительные погрешности определения массы ударника и плотности измерительной пике пренебрежимо малы по сравнению с θ_a .

Таким образом, относительная погрешность измерения энергии ударного импульса по данной методике может быть оценена как 1,3 %. Данный расчет подтверждает вывод, сделанный в работе [5], что градуировочный стенд позволяет существенно снизить погрешность измерения энергии ударного импульса.

Расчеты [17, 19] показывают, что для ударников с относительно простой геометрией (например, для пневматических молотков, бетоноломов) потенциальная энергия собственных колебаний ударника не превышает 1 % от энергии единичного удара и значительно ниже кинетической энергии отскока ударника. В этом случае слагаемыми U^- и U^+ в формуле (7) можно пренебречь. Тогда для каждого конкретного удара (в установившемся режиме работы ударной машины) получим

$$v_y = \frac{P}{2m} + \frac{W}{P}, \quad v_o = \frac{P}{2m} - \frac{W}{P}, \quad \lambda = \frac{P^2 - 2mW}{P^2 + 2mW}, \quad A = \frac{m}{2} \left[\frac{P}{2m} + \frac{W}{P} \right]^2. \quad (8)$$

Соотношения (8) можно применять для оценки энергии единичного удара и коэффициента отскока ударника по энергии и количеству движения ударного импульса.

5. Измерительная система и калибровка измерительного тракта. Для измерения энергетических параметров ударных машин используются потенциометрическая и мостовая измерительные схемы.

Потенциометрическая схема имеет ряд преимуществ. В сигнале с тензодатчика практически отсутствует постоянная составляющая, это позволяет применить более простой и стабильный усилитель переменного тока, использовать меньшее количество тензодатчиков (достаточно одного) и исключить подстройку нуля при измерении.

¹⁸ Предполагается, постоянство коэффициента усиления тензоусилителя.

Потенциометрическая схема установки «УИПУ-4М» [5], разработанной ООО «УДАРМАШ», представлена на рис. 6, а. Тензодатчик с номинальным сопротивлением r^{19} питается постоянным током i , сигнал с него поступает на усилитель переменного тока с коэффициентом усиления k и регистрируется АЦП. Полоса пропускания тензоусилителя 2 Гц ... 300 кГц.

При калибровке измерительного тракта периодически с частотой 50 Гц замыкается электронный ключ Кл, и в течение 70...100 мкс тензодатчик шунтируется сопротивлением $R \gg r$.

На выходе тензоусилителя появляется калибровочный импульс прямоугольной формы с плоской вершиной U_k , показанный на рис. 6, б.

При разомкнутом ключе напряжение на тензодатчике u_1 постоянно: $u_1 = ir$, и сигнал на выходе тензоусилителя равен нулю.

При замыкании ключа напряжение на тензодатчике скачком изменится на u_2 ,

$$u_2 = i \frac{Rr}{R+r}.$$

Рис. 6. Измерительная система установки «УИПУ-4М»

а) схема измерений и калибровки; б) калибровочный импульс;

1 – источник тока; 2 – тензодатчик; 3 – шунт; 4 – усилитель переменного тока; 5 – АЦП;
 $U_{\text{пит}}$, i – напряжение и ток питания тензодатчиков; Кл – электронный ключ; U – выходное напряжение тензоусилителя; U_k – амплитуда калибровочного импульса

Разность напряжений Δu составит

$$\Delta u = u_2 - u_1 = i \frac{rR}{R+r} - ir = -\frac{ir^2}{R+r}.$$

Тогда амплитуда калибровочного импульса U_k , регистрируемая АЦП, будет равна

¹⁹ В установке «УИПУ-4М» применены два тензорезистора, расположенных на измерительной пике диаметрально противоположно и соединенных последовательно (см. рис. 3); r – их общее сопротивление.

$$U_k = -\frac{r^2}{R+r} ik.$$

По определению, коэффициент тензочувствительности датчика β равен

$$\beta = \frac{\Delta r/r}{\varepsilon_0}, \quad (9)$$

где Δr – изменение сопротивления тензодатчика; ε_0 – его относительная деформация.

Поскольку $\Delta r = -r^2/(R+r)$, из (9) получаем

$$\beta = \frac{\Delta r/r}{\varepsilon_0} = \frac{-\frac{r^2}{(R+r)r}}{\varepsilon_0} = -\frac{r}{\varepsilon_0(R+r)}, \text{ т.е. } \varepsilon_0 = -\frac{r}{\beta(R+r)};$$

$$U_k = -\frac{r^2}{R+r} ik = -\varepsilon_0 ir\beta k, \text{ и } \varepsilon_0 = -\frac{U_k}{ir\beta k}.$$

Деформация тензодатчика ε пропорциональна электрическому напряжению U : $\varepsilon = \mu U$. Поэтому коэффициент пропорциональности μ между электрическим напряжением и деформацией равен

$$\mu = -\frac{1}{ir\beta k}.$$

И формула (2) для энергии ударного импульса преобразуется к виду:

$$W = \frac{aES}{\mu^2} \int_0^T U^2(t) dt = \frac{aES}{[ir\beta k]^2} \int_0^T U^2(t) dt. \quad (10)$$

Таким образом, для расчета энергии ударного импульса надо знать совокупное сопротивление тензодатчиков r , коэффициент тензочувствительности тензодатчика β , ток питания тензодатчика i и коэффициент усиления тензоусилителя k .

Рис. 7. Измерительная система согласно Методике ЕРТА

В Методике ЕРТА [3, 21] предложена мостовая схема измерений (мост Уитстона). На измерительную штангу диаметрально противоположно наклеиваются 4 одинаковых тензодатчика: два вдоль оси штанги и два поперек оси. Схема измерений показана на рис. 7.

Для измерения ударных деформаций применен усилитель постоянного тока, сигнал с которого подается на цифровое записывающее устройство – аналого-цифровой преобразователь и компьютер, которые выполняют оцифровку выходного напряжения усилителя, его запись, обработку и расчет энергии ударного импульса.

Исходя из измерительной схемы (рис. 7), Методика ЕРТА дает следующую формулу для расчета энергии ударного импульса $W_{ЕРТА}$:

$$W_{ЕРТА} = \frac{4aES}{[k\beta U_0(1+\nu)]^2} \int_0^T U^2(t) dt, \quad (11)$$

где U_0 – напряжение питания моста; ν – коэффициент Пуассона измерительной штанги. Расчеты по формулам (10) и (11) требуют знания физических констант измерительного инструмента (пики, штанги): модуля Юнга, скорости звука, коэффициента Пуассона. Поэтому Методика ЕРТА регламентирует изготовление измерительных штанг строго из определенного сорта стали 115 Cr V 3 Германия (аналог стали 11ХФ), для которой эти параметры заранее определены: плотность – 7850 кг/м³, модуль Юнга – 210 ГПа, скорость продольной волны (скорость звука) – 5180 м/с, коэффициент Пуассона – 0,29. Методика измерений, изложенная в разделе 4, имеет то преимущество, что позволяет использовать фактический рабочий инструмент ударной машины и определять его физические константы при образцовых ударах на градуировочном стенде с высокой точностью [21].

6. **Алгоритм нахождения ударного импульса.** При работе ударной машины волновой процесс в ее инструменте полностью затухает за время между ударами. Длительность ударного импульса составляет порядка 100...300 мкс, а период между ударами – 20...80 мс. За это время ударный импульс успевает многократно «пробежать» по инструменту туда и обратно, деформируя и разрушая обрабатываемый материал, нанося обратные удары по корпусу машины, и тем самым полностью расходуя энергию, переданную ударником инструменту.

Иллюстрацией затухания волнового процесса в инструменте служит осциллограмма, представленная на рис. 8. На ней показаны сигналы с двух тензодатчиков, расположенных на буровой штанге на небольшом расстоянии друг от друга. (Сигналы записаны скоростной киносъемкой в лаборатории удара и вибрации ИГД им. А.А.Скочинского.)

На этом факте основан алгоритм выделения ударного импульса, т.е. первого импульса прямой волны деформации сжатия (подобный алгоритм реализован в установке «УИПУ-4М»).

Рис. 8. Волновой процесс в буровой штанге

1 – первый ударный импульс сжатия; 2 – затухание ударного процесса

Перед ударом сигнал с тензоусилителя равен или близок к нулю. Зададим некоторый пороговый уровень напряжения $U_{\text{п}} > 0$ и будем ожидать прихода прямой волны деформации сжатия по ее переднему фронту, т.е. когда будут выполняться условия:

$$U(t) = U_{\text{п}}, \quad \frac{dU(t)}{dt} > 0.$$

Результат такого наблюдения представлен на рис. 9²⁰.

При превышении заданного порога записываем сигнал в течение 500 мкс с предысторией 200 мкс (интервал τ_3). После записи выдерживаем паузу 15...20 мс («временные ворота»), в

²⁰ Осциллограмма взята из текста Методики ЕРТА [3].

течение которой ударный процесс в инструменте гарантированно затухает, и ждем прихода следующего ударного импульса. В результате получаем выборку записей, которая содержит следующие друг за другом ударные импульсы²¹. (Временные интервалы могут отличаться в конкретной реализации алгоритма).

Обработку каждой записи производим следующим образом.

От момента достижения порога – точка А на рис. 9 – отступаем по времени назад на интервал τ_1 . Поскольку фронт ударного импульса обычно не превышает 30...40 мкс, достаточно выбрать $\tau_1 = 50$ мкс (на рис. 9 $\tau_1 = 100$ мкс). Отступив далее на интервал времени τ_2 (100 мкс), по нему определяем среднее значение сигнала и принимаем его за уровень нуля перед импульсом. (Методика ЕРТА рекомендует $\tau_2 = 1$ мс.)

Далее от порогового уровня (точка А) движемся влево (по убыванию времени) до достижения нулевого значения сигнала и определяем момент начала ударного импульса – точка В.

Рис. 9. Поиск ударного импульса
1 – ударный импульс; 2 – отраженный импульс; 3 – пороговый уровень U_p ; τ_1 – интервал отступа от порогового уровня; τ_2 – интервал определения нуля перед импульсом; τ_3 – интервал записи ударного процесса; T – длительность удара

От порогового уровня движемся вправо (по возрастанию времени) и, поскольку известно, что ударный импульс полностью укладывается по длине инструмента, то снова при достижении нуля находим момент времени окончания ударного импульса – точка С. Таким образом определяем длительность ударного импульса T – временной интервал [ВС].

Вычитая расчетное значение нуля из ординат обрабатываемой записи, окончательно получаем искомый ударный импульс и весь волновой процесс в измерительном инструменте в течение зарегистрированных 500 мкс.

Если порог U_p был выбран слишком высоким, ударные импульсы не будут обнаружены, или за них могут быть приняты отраженные импульсы высокой амплитуды (см. рис. 9). Близкое к нулю значение порога также приводит к «ложным» ударным импульсам с высокой частотой их следования. В любом случае визуальный контроль сигнала, записанного с предысторией, позволяет исключить такие ошибки.

7. Пример измерения энергии единичного удара и энергии ударного импульса. Для примера измерения энергии единичного удара и энергии ударного импульса был выбран

²¹ Если алгоритм стартует в момент, когда ударная машина уже работает, то первый импульс следует отбросить, т.к. за него может быть ошибочно принят отраженный импульс (см. рис. 9).

пневматический отбойный молоток МО-2М производства ТЭМЗ, параметры которого определялись по ГОСТ Р 55162 при номинальном давлении сжатого воздуха 0,5 МПа²². Измерения проводились на испытательном стенде по ГОСТ Р 55162 с использованием установки «УИПУ-4М».

На рис. 10 показаны результаты измерений молотка: гистограммы параметров рабочих циклов молотка (рис. 10, а): давление питания в ати, амплитуда ударных импульсов в условных единицах, частота ударов в с^{-1} и площадь ударного импульса (также в условных единицах).

При анализе ударных импульсов выбрана область установившейся работы молотка, содержащая 100 последовательных циклов, показанная выделением (рис. 10, а).

На рис. 10, б представлен средний и минимальный по амплитуде текущий ударный импульс молотка. Справа в условных единицах даны характеристики ударных импульсов: текущие и средние значения амплитуды, количества движения (площади импульса) и энергии импульса (площади квадрата импульса).

Результаты измерений целесообразно сравнить с расчетными данными, полученными ранее и показанными на рис. 3. Расчеты энергетических параметров молотка по формулам (3), (6), (10) представлены в Таблице.

циклы

МКС

а)

б)

Рис. 10. Работа пневматического отбойного молотка МО-2М

а) параметры рабочих циклов; амплитуда, площадь и площадь квадрата импульса даны в условных единицах (дел. и дел²); б) ударные импульсы: 1 – средний, 2 – текущий минимальный

²² Согласно методике испытаний на молоток подается давление 5,3 атм, измеряемое в ресивере, который соединен с молотком рукавом длиной $5 \pm 0,25$ м и внутренним диаметром 16 мм.

Таблица

Результаты измерений и расчетов энергии единичного удара
и энергии ударного импульса пневматического отбойного молотка МО-2М

Наименование параметра	Обозначение, формула	Единица измерения	Значение		Относительная погрешность, %
			Эксперимент	Расчет (тензодатчик $l = 25 \text{ мм}^{23}$)	
1	2	3	4	5	6
Параметры градуировки					
Масса ударника	m	кг	0,433	0,433	-
База измерения скорости	B_c	мм	45,00	-	-
Расстояние от верхнего луча до торца пики	h	мм	10,00	-	-
Скорость соударения	v_y	м/с	14,06	14,06	-
Скорость отскока	v_o	м/с	-	2,47	-
Коэффициент отскока	λ	-	-	0,176	-
Энергия единичного удара	A	Дж	42,80	42,80	-
Частота ударов	f	с^{-1}	21,50	-	-
Мощность	$A \cdot f$	Вт	920,2	-	-
Параметры измерительной системы					
Ток питания тензодатчика	i	мА	20	-	-
Сопротивление тензодатчика	r	Ом	800	-	-
Коэффициент усиления тензоусилителя	k	-	57,2	-	-
Коэффициент тензочувствительности тензодатчика	β	-	2,18	-	-
Модуль Юнга пики (сталь У8А) [22]	E	ГПа	209	209	-
Плотность измерительной пики [22]	ρ	кг/м^3	7839	7839	-
Скорость звука	a	м/с	5163	5163	-

Продолжение Таблицы

1	2	3	4	5	6
Параметры ударного импульса					
Длительность ударного импульса	T	мкс	86,3	86,5	0,2
Амплитуда ударного импульса	$E \sigma_{\max}$	МПа	335	318	-5,1 ²⁴
Сила удара	$SE \sigma_{\max}$	Н	151,4	143,9	-5,1
Количество движения, заключенное в ударном импульсе	P	Н·с	6,67	6,98	4,6
Средняя сила удара	P/T	Н	77,3	80,9	4,3
Энергия ударного импульса	W	Дж	40,8	41,0	0,9

²³ При измерениях на установке «УИПУ-4М» применялись тензодатчики с базой 25 мм.

²⁴ Амплитуда напряжения зависит от кривизны торцов соударяемых деталей [6].

Ударная мощность	$W \cdot f$	Вт	878,1	885,8	0,9
Дополнительные расчетные параметры					
Потенциальная энергия собственных колебаний ударника (в момент разрыва контакта с пикой)	P_y	Дж	-	0,01	-
Потери энергии за счет рассеяния волн на бурте и в хвостовике пики	$A(1 - \lambda^2) - W - P_y$	Дж	-	0,46	-

Из таблицы видно, что энергия единичного удара больше энергии ударного импульса на 2,0 Дж; соответственно за счет отскока ударника и рассеяния волн на бурте пики теряется 4,7 % мощности молотка МО-2М.

Расчетные и экспериментальные параметры ударного импульса молотка достаточно близки: расхождение не более 5,1 %. Отметим также, что по расчету на модели потенциальная энергия собственных колебаний ударника (при образцовом ударе) весьма незначительна – 0,02 % от энергии единичного удара.

Оценим погрешность полученных результатов:

- основная погрешность измерения энергии единичного удара (согласно Паспорту установки «УИПУ-4М») $\theta_{уипу} = 2 \%$ [5];
- погрешность определения массы ударника $\theta_m = 0,2 \%$;
- погрешность определения предупредительной скорости ударника $\theta_v = 0,1 \%$ [5];
- максимальная погрешность измерительной пики²⁵ $\theta_p = 3,0 \%$
- погрешность определения модуля Юнга $\theta_E = 0,5 \%$;
- погрешность плотности измерительной пики $\theta_\rho = 0,1 \%$;
- погрешность площади поперечного сечения пики $\theta_S = 0,1 \%$;
- погрешность коэффициента пропорциональности μ^{26} $\theta_\mu = 1,0 \%$
- разброс амплитуд ударных импульсов $\Delta H = 7,0 \%$;
- разброс энергии ударных импульсов $\Delta W = 4,0 \%$;

При доверительной вероятности 0,97 погрешность θ_A измерения энергии единичного удара составит

$$\theta_A = \sqrt{\theta_{уипу}^2 + \theta_m^2 + \theta_p^2 + (2\theta_v)^2 + \left\{ 2,20 \frac{2}{\sqrt{100}} \left[\frac{\Delta H}{2} \right] \right\}^2} = 3,6 \%$$

Относительная погрешность θ_W определения энергии ударного импульса равна (см. рис. 10, б – средний импульс):

$$\theta_W = \sqrt{(\theta_E^2 + \theta_\rho^2)/4 + \theta_S^2 + \theta_p^2 + (2\theta_\mu)^2 + \left\{ 2,20 \frac{2}{\sqrt{100}} \left[\frac{\Delta W}{2} \right] \right\}^2} = 3,6 \%^{27}.$$

²⁵ По данным аттестации установки «УИПУ-4М».

²⁶ Нестабильность тока питания и коэффициента усиления установки «УИПУ-4М» в пределах 0,5 %.

8. **Заключение.** Настоящая статья является продолжением и дополнением обзора тензометрического метода, данного в работах [4-5, 21]. Она задумывалась как обобщение опыта измерения энергетических параметров машин ударного действия и разработки современной аппаратуры для тензометрии удара. Мы постарались отразить наиболее важные, по нашему мнению, аспекты измерений, которые не вошли или были неполно отражены в предыдущих публикациях.

Некоторые важные вопросы, например, снижение погрешности измерительных преобразователей (пик, штанг) не вошли в данный обзор, т.к. они требуют отдельного исследования.

В мире ежегодно производятся сотни тысяч ударных машин – от легких ручных молотков до мощных пневмоударников и гидромолотов, и для каждой из этих машин необходимо знать эффективность удара, а значит, измерять энергетические параметры и регистрировать ударные импульсы. Мы постарались ответить на вопросы, как это делать: как это измеряется сегодня и каковы задачи на будущее. А будущее, по нашему мнению, – за измерением энергии ударного импульса как меры эффективности ударной машины.

Мы надеемся, что, несмотря на трудности настоящего времени, найдутся энтузиасты создания средств и совершенствования методик таких измерений, и мы верим, что недалеко время, когда в паспорте каждой машины ударного действия будут указываться достоверные и точные данные о силе и энергии удара (энергии единичного удара и/или энергии ударного импульса).

Решение этой задачи объективно необходимо.

Список литературы

1. Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения (Основы комплексного проектирования). – М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
2. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1985. – 226 с.
3. 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.
4. Кашаев В.А. Определение энергетических параметров пневматических молотков тензометрическим методом // Сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1987. – С. 104-107.
5. Кашаев В.А., Ямпольский Д.З. Тензометрический метод измерения удара. Российский опыт. Достижения и перспективы. // Вестник научно-технического развития. – 2017. – № 2 (114). – <http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=1011> (дата обращения: 6 декабря 2016 года).
6. Стихановский Б.Н., Чернова Е.С. Анализ методов измерения параметров взаимодействующих тел при упругом ударе // Современные научные исследования и инновации. - 2011. - № 7 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2011/11/5200> (дата обращения: 16.09.2020)
7. Ямпольский Д.З., Соколинский В.Б., Кашаев В.А. Новые возможности метода индикаторных диаграмм для пневматических машин ударного действия. // Научн. сообщ. ИГД им. А.А.Скочинского. – М.: 2003. – Вып. 325. С. 145–154.

²⁷ Снизить погрешность измерения энергии импульса можно за счет меньшей погрешности пик.

8. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. - М.: Наука, 1969 г. – 201 с.
9. Ерофеев В.И., Кажаяев В.В., Семерикова Н.П. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 208 с.
10. Сирс И.Е. О продольном ударе металлических стержней с закругленными торцами. *Proceeding of the philosophical Society of Cambridge, 1908, vol. 14 или Trans. Cambridge, Phil. Soc. 1908, vol. 21, p.40.*
11. Hertz Н. Über die Berührung fester elastischer Körper Gesammelte Werke, Bd I., Leipzig, 1895.
12. Сен-Венан Б. Примечания к §§ 60 и 61 французского перевода книги “Clebsch Theorie der Elastiritöt fester Körper”, Paris, 1883.
13. Манжосов В.К. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры / В.К. Манжосов, В.В. Слепухин. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.
14. 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.
15. 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.
16. Александров Е.В., Флавицкий Ю.В., Хомяков К.С. Определение импульсов напряжения при продольном соударении упругих стержней произвольной геометрической формы. Краткий научный отчет. - М.: Институт горного дела им. А.А.Скочинского, 1965. – 40 с.
17. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
18. 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).
19. Ямпольский Д.З. Некоторые особенности ударных импульсов машин ударного действия. // Вестник научно-технического развития. - 2020. - № 4 (152). - С. 26–42. <http://www.vntr.ru/vols/2020-04/vntr2020-152-4.pdf> (дата обращения: 11.05.2020).
20. Ямпольский Д.З. Моделирование вибрации отбойного молотка и выбор рациональных параметров виброзащиты: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / АН СССР, Институт горного дела им. А.А. Скочинского. – Москва, 1991. – 278 с.: ил.
21. Ямпольский Д.З., Ванаев В.С. Анализ методики испытаний электрических машин с целью определения энергии удара. // Вестник машиностроения. – 2018. - № 7. – С. 47-54.
22. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: 2014. - 1216 с.

Дата поступления: 25 февраля 2021 г.