DOI: 10.18411/vntr2023-170-4

УДК 531.662/.7/.61+62-97/-98

ОБРАЗЦОВЫЕ УДАРЫ. ЗАКОНОМЕРНОСТИ. ПОГРЕШНОСТИ. ПРИМЕРЫ

© Дмитрий Зиновьевич Ямпольский
Общество с ограниченной ответственностью «УДАРМАШ», Москва, Россия
udarmash@mail.ru

Аннотация. *В статье рассматривается применение образцовых ударов для измерения энергии ударного импульса в рабочем инструменте машин ударного действия. Предложены методы измерений с использованием закона сохранения количества движения при ударе. Представлен анализ измерительных сигналов на градуировочном стенде по ГОСТ Р 55162. Проведены расчеты образцовых ударов пневматических отбойных молотков и бетоноломов в зависимости от скорости соударения с измерительной пикой. Даны оценки погрешностей измерения энергии ударного импульса предложенными методами.*
Ключевые слова*: образцовый удар, градуировочный стенд, отбойный молоток, бетонолом, энергия ударного импульса, метод измерения, погрешность измерения.*

EXEMPLARY STRIKES. PATTERNS. ERRORS. EXAMPLES OF TASKS

© D.Z. Yampolsky
The limited liability company «UDARMASH», Moscow, Russia
udarmash@mail.ru

Abstract. *The article discusses the use of exemplary impacts for measuring the energy of a shock impulse in a working tool of percussion machines. Measurement methods are proposed using the law of conservation of momentum upon impact. The analysis of measuring signals on a calibration stand according to GOST R 55162 is presented. Model impacts of pneumatic jackhammers and concrete breakers are calculated depending on the speed of impact with the measuring peak. Estimates are given for the errors in measuring the shock pulse energy by the proposed methods.*
Keywords: *exemplary impact, calibration stand, jackhammer, concrete breaker, impact pulse energy, measurement method, measurement error.*

Введение. В последнее время вырос интерес к методам и средствам определения энергетических параметров машин ударного действия. Он связан с массовым применением в промышленности электрических, пневматических и гидравлических отбойных молотков, бетоноломов, перфораторов, а также с появлением современной тензометрической аппаратуры и методов испытаний, позволяющих с высокой точностью регистрировать ударные деформации в рабочем инструменте: пиках, зубилах, штангах [1-6].

Ранее для этих машин традиционно определялась энергия единичного удара (ISO 2787, ГОСТ Р 55162) – кинетическая энергия бойка-ударника перед его соударением с рабочим инструментом.

Сегодня развиваются методы измерения энергии ударного импульса – энергии первой волны сжатия, возникающей в инструменте при ударе и распространяющейся по нему со скоростью звука [4-9].

Вопрос перехода к измерению энергии ударного импульса актуален, поскольку именно эта энергия передается объекту разрушения, и потому она более полно характеризует эффективность ударной машины[1].

В данной публикации пойдет речь об образцовых ударах, применяемых для определения коэффициента чувствительности измерительной системы [7-8], для ее проверки [4] или градуировки [1, 3, 5]. В ней рассмотрены закономерности формирования и регистрации ударных импульсов пневматических отбойных молотков и бетоноломов, выпускаемых отечественной промышленностью, а также определены погрешности измерений.

Согласно литературным данным, на сегодняшний день погрешность измерения энергии ударного импульса составляет 10 % для электрических ручных ударных машин [4] и 4 % для мощных бурильных установок с пневмо и гидроприводом [5][2].

С целью повышения точности измерений могут быть применены образцовые удары, обладающие высокой стабильностью и воспроизводимостью. С использованием образцовых ударов возможны следующие методы измерений энергии ударного импульса:

- регистрация среднего импульса[3] (в условных единицах) при работе машины, а затем воспроизведение этого импульса образцовым ударом на градуировочном стенде. При образцовом ударе используются тот же ударник и та же измерительная пика, что и при работе машины. Метод аналогичен измерению энергии удара пневмомолотков по ГОСТ Р 55162 [1, 8];
- выполнение образцового удара и определение коэффициента чувствительности измерительной системы, а затем проведение испытаний машины с той же пикой и теми же настройками измерений. При образцовом ударе возможно применить ударник, близкий по массе и геометрии к ударнику машины.

Величину энергии ударного импульса устанавливают расчетом согласно работам [7-8].

При анализе образцовых ударов мы будем ссылаться на Методику Европейской Ассоциации Производителей Электроинструмента (Методика EPTA) [4] как на единственный в настоящее время нормативный документ (корпоративный стандарт) по измерению энергии ударного импульса машин ударного действия.

Образцовые удары. Образцовые удары выполняются на специальных стендах [11]. В статье рассматривается градуировочный стенд по ГОСТ Р 55162, схема которого показана на рис. 1, *а*.

Удары выполняют следующим образом.

Рассмотрим эти процессы подробнее на рис. 1.

---

[1] При этом не вся энергия ударного импульса расходуется на разрушение, но, в силу разнообразия условий применения ударной машины, определить ее долю в общем случае не представляется возможным.

[2] В работе представлена измерительная аппаратура и оригинальный метод ее тарировки свободно падающими ударниками большой длины (> 300 мм). К сожалению, такой метод неприменим к большинству ударных машин, т.к. не учитывает энергию отскока, уносящего до 10 % исходной кинетической энергии ударника.

[3] В установившемся режиме работы машины средний ударный импульс совпадает с аналогичным импульсом при образцовом ударе при равенстве их амплитуд. Эта закономерность выявлена В.А. Кашаевым [1, 10].

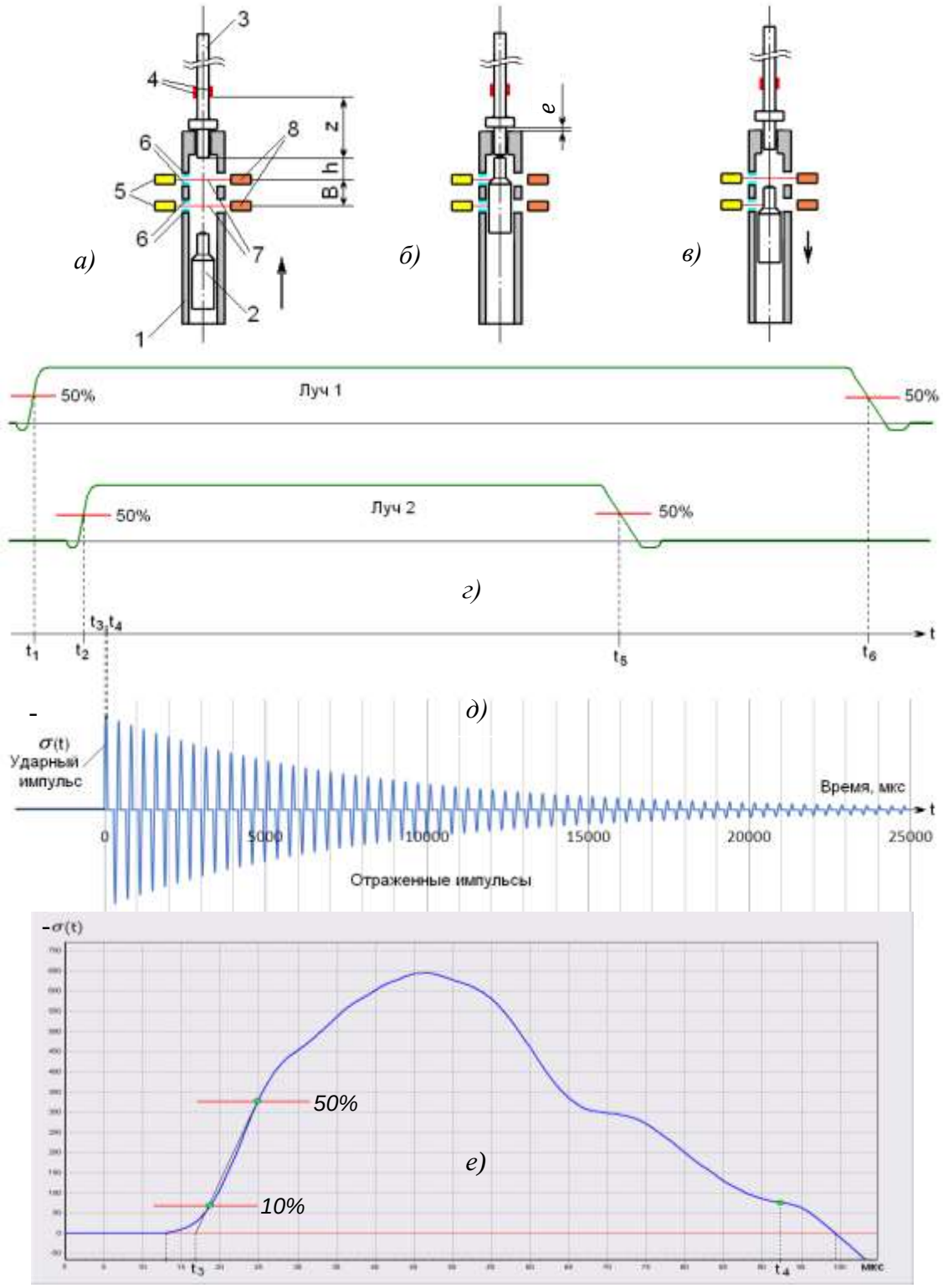


Рис. 1 – Схема градуировочного стенда и измерительные сигналы

а) измерение скорости удара; *б*) перемещение ударника за время контакта с пикой; *в*) измерение скорости отскока ударника; *г)* сигналы фотодетекторов и тензодатчиков; *е*) ударный импульс молотка МО-2Б

1 – вертикальная направляющая; *2* – ударник; *3* – измерительная пика; *4* – тензодатчики; *5* – световые излучатели; *6* – диафрагмы; *7* – световые лучи: 1 – нижний, 2 – верхний; *8* – фотодетекторы; стрелками показано направление движения ударника; t_1, t_2, t_5, t_6 – моменты времени пересечения лучей; t_3 – начало ударного импульса; t_4 – момент разрыва контакта ударника с пикой; $\sigma(t)$ – напряжения в измерительной пике (условные деления) в момент времени t, ноль времени соответствует моменту касания ударником торца пики; z – расстояние от торца пики до тензодатчиков; e – перемещение пики и ударника до отскока

В вертикальную направляющую стенда *1* устанавливают ударник *2* и измерительную пику *3* с тензодатчиками *4*. Ударник разгоняется сжатым воздухом и при свободном полете соударяемым торцом перекрывает световые лучи *7*, проходящие через диафрагмы *6* и отверстия в направляющей, формируя сигналы на фотодетекторах *8*, по которым определяют время прохода контрольного участка пути B – базы измерения скорости.

После ускорения ударник, двигаясь вверх под действием силы тяжести, последовательно пересекает лучи 1 и 2 в моменты времени t_1 и t_2 (рис. 1, *а* и *г*). Пересечением луча считается 50 %-е снижение сигнала фотодетектора.

Достигая торца измерительной пики, ударник формирует в ней волну деформации – ударный импульс, распространяющийся со скоростью звука c. Тензодатчики начинают регистрировать ударные деформации в момент t_3 с задержкой $\Delta t_* = z/c$, равной времени прохождения волны от соударяемого торца пики до места расположения тензорезисторов на ее боковой поверхности (рис. 1, *а* и *д*).

Сформированный ударный импульс показан на рис. 1, *е*. Для примера взят импульс пневматического отбойного молотка МО-2Б производства АО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева» (ТЭМЗ), полученный на установке «УИПУ-4М» [1] (давление сжатого воздуха 0,5 МПа, измерительная пика диаметром 24 мм и длиной 340 мм).

В процессе удара – от момента касания торцов t_3 до момента разрыва контакта t_4 – ударник и пика перемещаются вверх на некоторое расстояние e (рис. 1, *б*), после чего ударник отскакивает и далее продолжает движение вниз под действием силы тяжести. При этом он последовательно пересекает лучи 2 и 1 в моменты времени t_5 и t_6 (рис. 1, *в* и *г*).

Предударную скорость ударника v_y и скорость его отскока v_o получают расчетом:

$$v_y = \sqrt{\left\{\frac{B}{\Delta t_\uparrow} - \frac{g\Delta t_\uparrow}{2}\right\}^2 - 2gh}\,, \quad v_o = \sqrt{\left\{\frac{B}{\Delta t_\downarrow} - \frac{g\Delta t_\downarrow}{2}\right\}^2 - 2g(h+e)}, \qquad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; h – расстояние от верхнего луча до соударяемого торца пики; $\Delta t_\uparrow = t_2 - t_1$, $\Delta t_\downarrow = t_6 - t_5$.

Перемещение центра масс ударника за время контакта с пикой определяется по деформации тензодатчика $\varepsilon(t)$ соотношением: $e = c\int_{t_3}^{t_4}\varepsilon(t)dt$.

Если сигналы с фотодетекторов и измерительной пики регистрировать синхронно, например, используя три высокочастотных канала АЦП (~1 МГц), то расстояние h можно вычислить и оценить длительность контакта соударяемых деталей $\Delta t_к$:

$$h = \left(\frac{B}{\Delta t_\uparrow} - \frac{g\Delta t_\uparrow}{2}\right)\Delta t - \frac{g(\Delta t)^2}{2}, \quad \Delta t = t_3 - t_2 - \Delta t_*, \qquad (2)$$

$$\Delta t_к = t_5 - t_3 - \Delta v/g, \quad \Delta v = \frac{B}{\Delta t_\downarrow} - \frac{g\Delta t_\downarrow}{2} - v_o.$$

В работах [7-8] предложено использовать образцовые удары для проведения сквозной калибровки измерительного тракта и аттестации измерительного преобразователя (пики, штанги) путем определения коэффициента пропорциональности μ между измеряемым электрическим напряжением $u(t)$ и деформацией тензодатчика: $\varepsilon(t) = \mu u(t)$.

Преимущество этого способа по сравнению с методами классической тензометрии [4, 12] состоит в применении закона сохранения количества движения при ударе, что позволяет упростить расчеты энергии ударного импульса[4] и увеличить их точность.
Количество движения ударного импульса P, скорости удара и отскока ударника связаны соотношением:

$$P \equiv ES\int_0^T \xi(x,t)dt = m\left(v_\text{у} + v_\text{о}\right) \cong ES\int_0^{T'} \varepsilon(t)dt\,,\ \ \varepsilon(t) = \frac{1}{l}\int_0^l \xi(x,t)dt, \qquad (3)$$

где E – модуль Юнга измерительной пики; S – площадь ее поперечного сечения в месте расположения тензодатчика; $\xi(x,t)$ – мгновенная деформация сечения тензодатчика с координатой x; m – масса ударника; T – длительность импульса; $T' = T + l/c$ – длительность импульса по тензодатчику, l – длина решетки тензодатчика; скорости удара и отскока берутся по модулю (без знака).
Из (3) получаем:

$$\mu = \frac{m(v_\text{у} + v_\text{о})}{ES\int_0^{T'} u(t)\,dt}. \qquad (4)$$

Энергия ударного импульса W, соответственно, равна:

$$W \equiv cES\int_0^T \xi^2(x,t)dt = \frac{m}{2}\left(v_\text{у}^2 - v_\text{о}^2\right) - U_\text{у} - Q \cong cES\int_0^{T'} \varepsilon^2(t)dt = \mu^2 cES\int_0^{T'} u^2(t)dt, \qquad (5)$$

здесь $U_\text{у}$ – потенциальная энергия ударника в момент отскока от пики; Q – потери энергии на различные процессы, сопровождающие удар: трение, магнитострикцию, излучение звука.
Чем меньше длина решетки тензодатчика, тем ближе величина $\varepsilon(t)$ к мгновенной деформации измерительной пики, и тем точнее выполняются равенства (3) и (5).
Методика ЕРТА [4] регламентирует применение тензорезисторов с решеткой не более 6 мм. Для датчика длиной 5 мм в работе [8] выполнено сравнение ударных импульсов $\varepsilon(t)$ и $\xi(t)$ молотка МО-2Б ТЭМЗ при скорости соударения $v_\text{у}$ = 14,1 м/с: погрешность амплитуды ударного импульса составила 0,02 %, погрешность энергии импульса – 0,00 %.
Поскольку потери Q малы по сравнению с энергией удара [8], из (5) получаем:

$$W = A_\text{у}(1 - \lambda^2) - U_\text{у} \qquad (6)$$

и КПД ударной системы η при образцовом ударе:

$$\eta = \frac{W}{A_\text{у}} = 1 - \lambda^2 - \frac{U_\text{у}}{A_\text{у}},$$

где $A_\text{у} = mv_\text{у}^2/2$ – кинетическая энергия ударника; $\lambda = v_\text{о}/v_\text{у}$ – коэффициент отскока.

[4] Для расчета энергии импульса по Методике ЕРТА необходимо знать коэффициент усиления тензоусилителя, напряжение питания тензодатчиков, коэффициент тензочувствительности тензорезисторов и коэффициент Пуассона. В предлагаемом способе измерений эти данные не используются.

Остановимся подробнее на потенциальной энергии ударника и кинетической энергии отскока. После разрыва контакта с пикой ударник оказывается возбужденным, в нем возникает стоячая волна деформаций: скорость сечений ударника по его длине оказывается неодинаковой и колеблется в противофазе с напряжением.

При образцовом ударе регистрируется средняя скорость ударника, т.е. скорость его центра масс. Таким образом, потенциальная энергия U_y, входящая в формулу (6), есть разность между полной энергией ударника при отскоке и кинетической энергией, соответствующей скорости движения его центра масс. Из (5) и (6) следует:

$$U_y = A_y - W - mv_o^2/2 = A_y(1 - \lambda^2) - W. \quad (7)$$

Параметры ударных импульсов. Используя соотношения (5) - (7), рассмотрим, как изменяются параметры ударных импульсов современных пневматических отбойных молотков и бетоноломов при различных скоростях соударения.

Воспользуемся моделью продольного удара [13], которая показала хорошее соответствие с результатами экспериментов.

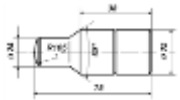
Методика EPTA [4] рекомендует применение измерительных пик без буртов (“steps” – ступенек), поэтому будем рассматривать в сравнении два варианта ударных взаимодействий: удар по пике постоянного поперечного сечения и удар по пике с буртом, который присутствует у инструмента большинства ударных машин.

Примем, что измерительная пика постоянного поперечного сечения имеет диаметр d = 24 мм и длину L = 1000 мм (длина пики выбрана так, чтобы отраженная волна не накладывалась на ударный импульс). Будем считать, что ударники и пика изготовлены из стали марки У8А[5]: модуль упругости стали E = 209 ГПа, плотность ρ = 7839 кг/м^3, коэффициент Пуассона 0,29, стержневая скорость звука c = 5164 м/с [14]. Соударяемый торец ударника (согласно чертежам) имеет радиус 105 мм, а торец пики плоский.

Выберем скорости удара 5 м/с, 10 м/с и 15 м/с, охватывающие весь диапазон упругих соударений, встречающийся на практике[6].

Таблица 1

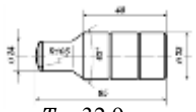
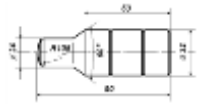
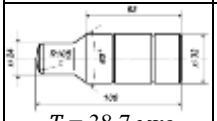
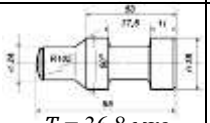
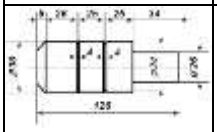
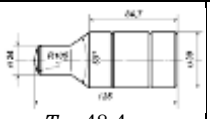
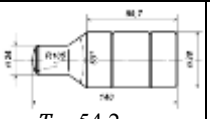
Параметры ударных импульсов отбойных молотков и бетоноломов

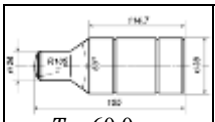
Модель ударной машины, чертеж и параметры ударника		v_y, **м/с**	λ	t_m, **мкс**	T, **мкс**	$-\sigma_{max}$, **МПа**	A_y, **Дж**	W, **Дж**	U_y, **Дж**	η, **%**
 T_c= 29,1 мкс	МО-1Б[7] m = 379 г d_y = 28,65 мм L_y = 75 мм	5	0,299	37,5	109,2	96,0	4,74	4,31	0,006	90,9
		10	0,257	34,3	99,1	207,5	18,95	17,66	0,038	93,2
		15	0,233	32,9	95,3	324,0	42,64	40,22	0,105	94,3

[5] Ударники и измерительные пики для испытаний пневматических отбойных молотков традиционно изготавливаются из стали У8А.

[6] При скоростях соударения более 20 м/с в деталях из стали возникают пластические деформации [15].

[7] Пневматические молотки МО-1Б … МО-4Б, МО-9К и бетоноломы Б-1 ... Б-3 производства ТЭМЗ, молоток МО-2К производства КНР (ранее выпускался в СССР под маркой ОМСП).

 T_c= 32,9 мкс	МО-2Б m =439 г d_y = 28,96 мм L_y = 85 мм	5	0,269	40,2	119,1	100,9	5,49	5,09	0,003	92,7
		10	0,229	37,2	109,0	217,0	21,95	20,79	0,009	94,7
		15	0,206	36,0	104,9	337,3	49,39	47,24	0,054	95,7
 T_c= 35,6 мкс	МО-3Б m = 471 г d_y = 29,16 мм L_y = 90 мм	5	0,255	41,6	123,9	103,2	5,89	5,49	0,017	93,3
		10	0,215	38,8	114,0	221,2	23,55	22,42	0,041	95,2
		15	0,193	37,7	110,0	343,1	52,99	50,89	0,126	96,1
 T_c= 38,7 мкс	МО-4Б m = 534 г d_y = 29,45 мм L_y = 100 мм	5	0,231	44,6	133,6	107,4	6,68	6,31	0,014	94,5
		10	0,192	42,1	124,2	228,6	26,70	25,66	0,056	96,1
		15	0,171	41,0	120,2		60,08	58,18	0,143	96,9
 T_c= 36,8 мкс	МО-9К m = 469 г d_y = 28,32 мм L_y = 95 мм	5	0,257	45,7	126,0	102,5	5,86	5,46	0,013	93,2
		10	0,217	43,3	113,9	214,4	23,45	22,28	0,066	95,0
		15	0,195	42,3	108,8	327,4	52,76	50,58	0,174	95,9
 T_c= 48,8 мкс	МО-2К m = 929 г d_y =34,61 мм L_y = 126 мм	5	0,105	51,85	196,8	127,1	11,61	11,48	0,002	98,9
		10	0,072	47,56	192,4	265,1	46,45	46,17	0,039	99,4
		15	0,056	43,80	191,6	405,5	104,51	104,07	0,112	99,6
 T_c= 48,4 мкс	Б-1 m = 919 г d_y = 34,56 мм L_y = 125 мм	5	0,126	53,9	194,2	124,6	11,49	11,30	0,008	98,4
		10	0,095	51,4	185,6	262,6	45,95	45,51	0,025	99,0
		15	0,079	50,5	183,0	403,5	103,39	102,66	0,084	99,3
 T_c= 54,2 мкс	Б-2 m = 1053 г d_y = 34,95 мм L_y = 140 мм	5	0,105	58,6	217,6	129,0	13,16	13,01	0,005	98,8
		10	0,076	56,5	211,1	270,0	52,65	52,27	0,076	99,3
		15	0,061	55,7	208,6	413,1	118,46	117,82	0,199	99,5

 T_c= 60,0 мкс	Б-3 m = 1186 г d_y = 35,25 мм L_y = 155 мм	5	0,087	63,6	239,8	132,5	14,83	14,70	0,018	99,2
		10	0,061	61,7	236,0	275,2	59,30	59,01	0,069	99,5
		15	0,048	61,1	234,8	419,2	133,43	132,93	0,186	99,6

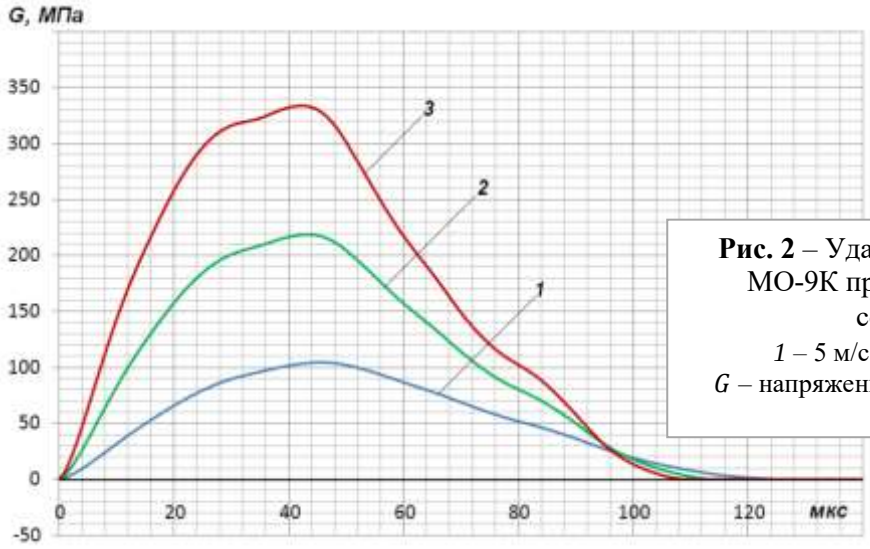


Рис. 2 – Ударные импульсы молотка МО-9К при различной скорости соударения v_y:
1 – 5 м/с; *2* – 10 м/с; *3* – 15 м/с;
G – напряжения сжатия в штанге ($G < 0$)

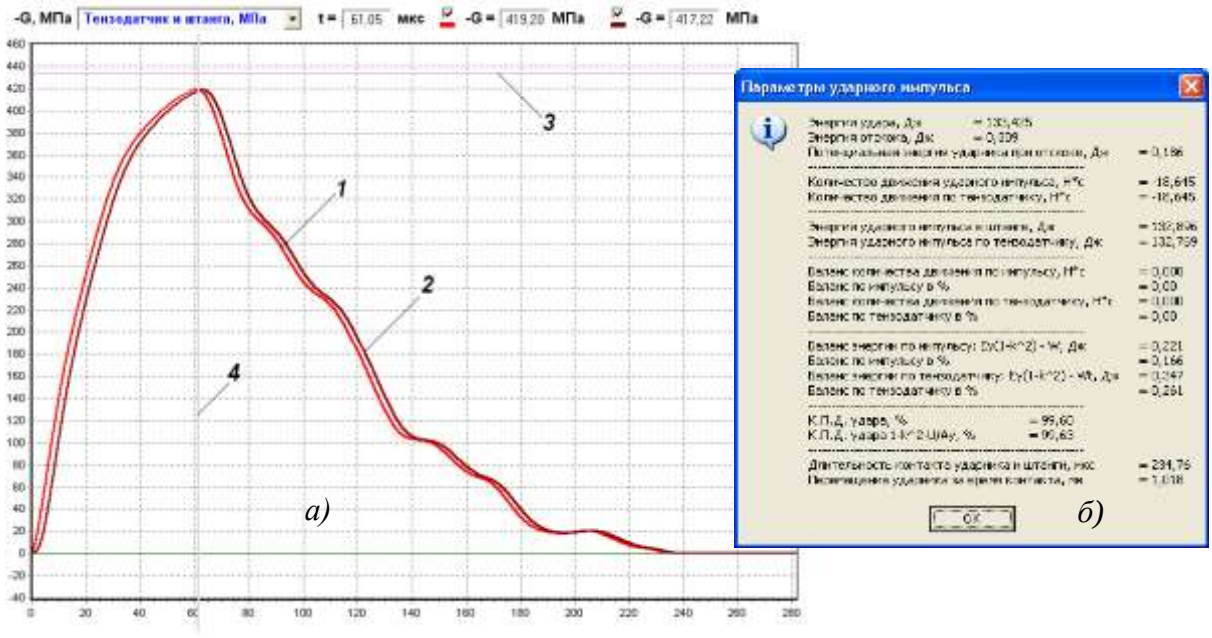


Рис. 3 – Ударный импульс бетонолома Б-3 (ТЭМЗ) при скорости соударения 15 м/с
а) зависимость напряжений от времени; *б*) расчетные параметры импульса
1 – напряжения в штанге; *2* – напряжения в штанге по тензодатчику с решеткой 25 мм; *3* – теоретический уровень напряжений при плоском ударе [2]; *4* – визир указывает значения времени и напряжений (вверху)

В таблице 1 приведены результаты расчетов (сетка 0,01 мкс × 0,1 мм).

Для справки в таблице указаны: L_y, d_y – длина и средний по длине диаметр ударника; $T_c = 2L_y/a$ – длительность удара по Сен-Венану, a – скорость звука в ударнике; t_m – время достижения максимума импульса; σ_{max} – максимальные напряжения в пике ($\sigma_{max} < 0$).

Из полученных данных следует, что с увеличением скорости соударения происходят следующие изменения:

- уменьшается длительность ударного импульса T и длительность переднего фронта t_m;
- амплитуда напряжения σ_{max} растет быстрее, чем скорость соударения (на 5...10 %);
- уменьшается коэффициент отскока ударника λ;
- возрастает КПД передачи энергии η.

На рис. 2 показано, как в зависимости от скорости соударения v_y меняются импульсы молотка МО-9К с «катушечным» ударником.

На рис. 3 представлен ударный импульс бетонолома Б-3 при скорости v_y = 15 м/с.

Справа даны значения параметров, которые позволяют оценить погрешности усреднения (длина решетки тензодатчика 25 мм):

- погрешность амплитуды ударного импульса – (1-418,32/419,20)·100 = 0,21 %;
- погрешность количества движения импульса – 0,00%;
- погрешность энергии ударного импульса – (1-132,77/132,90)·100 = 0,10 %.

До сих пор рассматривался удар по пике постоянного поперечного сечения.

Рассмотрим теперь образцовые удары по пике с буртом и проанализируем его влияние на ударный импульс.

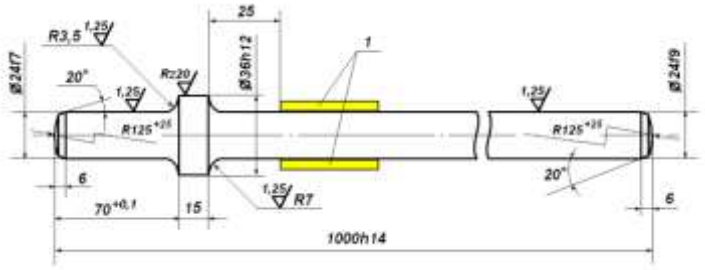


Рис. 4 – Измерительная пика с буртом
1 – тензорезисторы

Для расчетов выберем пику, аналогичную ГОСТ Р 55162, которая показана на рис. 4. Соударяемый торец пики также будем считать плоским.

Таблица 2

Параметры ударных импульсов при соударении с пикой, имеющей бурт

Модель ударной машины	v_y, **м/с**	λ	T, **мкс**	T_0, **мкс***)	t_m, **мкс**	σ_{max}, **МПа**	A_y, **Дж**	W, **Дж**	U_y, **Дж**	η, **%**
МО-1Б	5	0,336	102,5	183,7	39,4	89,3	4,73	4,19	0,006	88,5
	10	0,300	94,2	159,8	32,3	191,2	18,95	17,20	0,045	90,8
	15	0,279	90,2	121,0	30,9	300,8	42,64	39,17	0,151	91,9
МО-2Б	5	0,300	111,0	190,0	43,2	95,1	5,49	4,99	0,006	91,0

	10	0,263	102,5	167,6	39,2	202,2	21,95	20,40	0,032	92,9
	15	0,242	98,2	164,0	37,7	313,2	49,39	46,37	0,128	93,9
МО-3Б	5	0,282	115,4	196,6	44,5	98,0	5,89	5,41	0,012	91,9
	10	0,246	106,7	170,1	41,5	208,4	23,55	22,07	0,055	93,7
	15	0,225	102,5	135,0	39,7	322,1	52,99	50,13	0,177	94,6
МО-4Б	5	0,251	124,4	172,8	47,5	103,5	6,68	6,25	0,009	93,6
	10	0,214	115,2	216,6	44,4	220,0	26,70	25,41	0,067	95,2
	15	0,193	111,1	172,4	43,2	340,3	60,08	57,63	0,212	95,9
МО-9К	5	0,283	116,4	185,4	48,1	99,0	5,86	5,38	0,011	91,8
	10	0,248	104,8	142,4	45,6	207,8	23,45	21,95	0,058	93,6
	15	0,230	98,9	139,8	44,5	318,7	52,76	49,82	0,117	94,5
МО-2К	5	0,093	182,1	266,9	57,5	128,7	11,61	11,51	0,003	99,1
	10	0,055	175,8	231,1	51,9	268,7	46,45	46,29	0,020	99,7
	15	0,035	177,1	227,0	50,2	412,3	104,51	104,33	0,057	99,8
Б-1	5	0,119	181,7	227,2	57,7	124,9	11,49	11,33	0,001	98,6
	10	0,083	174,6	224,5	53,3	262,9	45,95	45,62	0,015	99,3
	15	0,064	171,4	222,5	51,8	405,7	103,39	102,91	0,057	99,5
Б-2	5	0,092	204,0	248,1	60,5	131,6	13,16	13,04	0,009	99,1
	10	0,058	198,6	245,5	58,7	277,0	52,65	52,41	0,063	99,5
	15	0,041	197,6	243,8	57,6	425,3	118,46	118,10	0,161	99,7
Б-3	5	0,071	232,9	267,6	63,6	135,4	14,83	14,74	0,015	99,4
	10	0,041	233,0	264,7	61,4	285,0	59,30	59,14	0,060	99,7
	15	0,027	234,7	264,9	60,8	437,3	133,43	133,16	0,173	99,8

В таблице 2 представлены результаты расчетов образцовых ударов вышеуказанных молотков и бетоноломов с такой пикой. Здесь T – длительность контакта ударника с пикой, T_0 – время достижения первого нуля напряжений.

Из сравнения Таблицы 2 с Таблицей 1 следует, что наличие бурта у измерительной пики приводит к следующим изменениям:

- сокращается длительность контакта ударника с пикой;

- для ударников отбойных молотков МО-1Б … МО-4Б и МО-9К (d_y~ 28…30 мм) увеличивается коэффициент отскока и уменьшается КПД удара;
- для бетоноломных ударников Б-1…Б-3 с массивной поршневой частью (d_y >34 мм) коэффициент отскока, наоборот, снижается, а КПД удара растет (но весьма незначительно).

Общая закономерность такова: чем длиннее ударник и массивнее его поршневая часть, тем менее длительность контакта деталей зависит от скорости соударения v_y. Так для ударника бетонолома Б-3 (L_y= 155 мм) при скоростях 5 м/с и 15 м/с она отличается всего на 0,8 %, а для ударника молотка МО-1Б (L_y= 75 мм) – на 12,0 %.

Наличие у пики бурта снижает амплитуду напряжений отбойных молотков и уменьшает энергию ударного импульса: у молотка МО-1Б при v_y= 15 м/с напряжения ниже на 7,2 %, а энергия – на 2,6 %, у МО-4Б снижение амплитуды составляет 3,5 %, а энергии – 0,9 %.

У бетоноломных ударников, наоборот, амплитуда напряжений увеличивается. Объяснить этот эффект можно так: волна, отраженная от бурта, претерпевает повторное отражение от массивной поршневой части бетоноломного ударника, поднимая уровень напряжений сжатия: так у бетонолома Б-3 при v_y= 15 м/с он даже на 3,1 % превосходит теоретический максимум, определяемый скоростью соударения и ударной жесткостью деталей [2]. У более коротких ударников такой эффект не наблюдается, т.к. волна разгрузки «гасит» нарастание напряжений. При этом бурт практически не влияет на величину энергии импульса бетоноломных ударников[8].

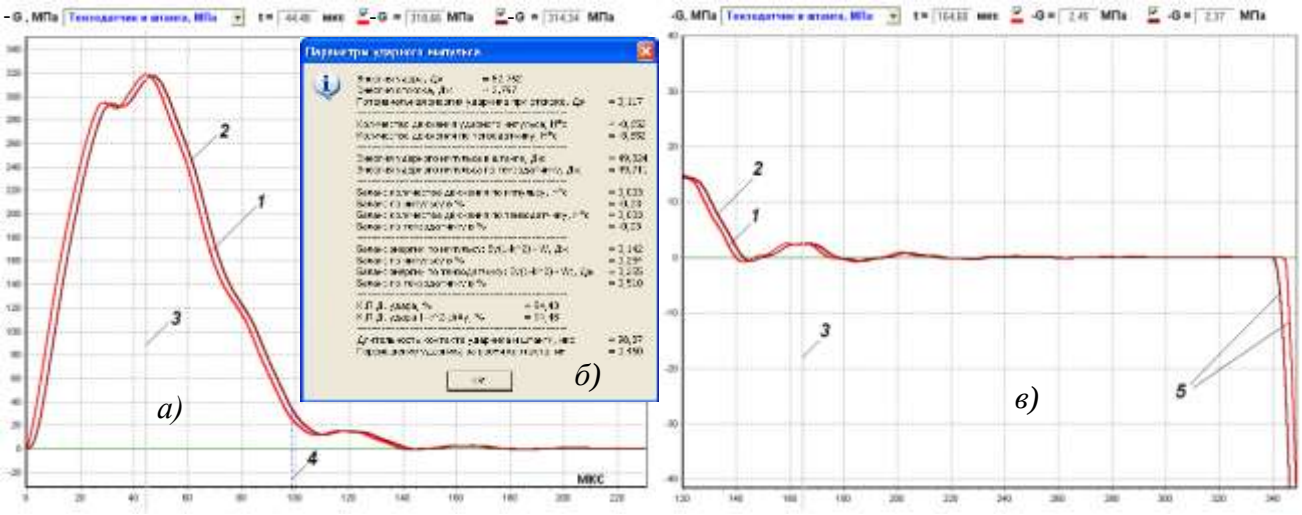


Рис. 5 – Ударный импульс молотка МО-9К при скорости соударения 15 м/с: удар по пике с буртом

а) зависимость напряжений от времени; *б)* – расчетные параметры; *в)* «хвостовая» часть импульса
1 – напряжения в измерительной пике; *2* – напряжения в пике по тензодатчику (решетка 25 мм);
3 – визир: значения времени и напряжений даны вверху; *4* – момент разрыва контакта ударника с пикой;
5 – фронт отраженного импульса

Низкий уровень потенциальной энергии ударника при отскоке от пики, полученный расчетом во всем диапазоне реальных скоростей соударения для ударников различной массы

[8] Аналогичный вывод получен экспериментально в работе [5] для цилиндрических ударников длиной более 300 мм и сечением в 1,5…2,0 раза большим площади сечения буровой штанги. В таких системах ударник практически не отскакивает от пики [2], и вся его кинетическая энергия переходит в энергию ударного импульса.

и геометрической формы, показывает, что в правой части соотношения (6) можно пренебречь последним слагаемым.
Тогда:

$$W = A_y(1-\lambda^2) \text{ и } \eta = 1-\lambda^2, \text{ погрешность не превышает 0,5 \%.} \quad (8)$$

Для пики постоянного поперечного сечения длительность контакта соударяемых деталей совпадает с длительностью ударного импульса.
Для пики с буртом ударный импульс не завершается при разрыве контакта ударника с пикой. За счет отражения волны от бурта, вслед за основной («головной») частью ударного импульса появляется длинный знакочередующийся волновой процесс с убывающей амплитудой («хвост» импульса), показанный на рис. 5 на примере молотка МО-9К. При этом длительность контакта соударяемых деталей оказывается даже меньше длительности головной части ударного импульса: $T < T_0$ (рис. 5, поз. *4*).
Соответственно, при обработке образцовых ударов с пикой, имеющей бурт, возникает вопрос: как выбирать время интегрирования для расчета количества движения и энергии ударного импульса?
Постараемся ответить на этот вопрос.
При разрыве контакта с ударником, часть пики – от места расположения тензодатчика до торца хвостовика – оказывается возбужденной. А поскольку законы сохранения импульса и энергии в системе «ударник–пика» выполняются для всей протяженности тел соударяемых деталей, для правильного расчета необходимо «дождаться», когда весь ударный импульс пройдет через тензодатчик. Теоретически этот процесс занимает бесконечное время. Но для задачи калибровки измерительной системы важно установить, какой частью ударного процесса можно пренебречь, и какова при этом будет погрешность ограничения.
Методика ЕРТА предлагает интегрировать сигнал тензодатчика вплоть до прихода отраженной волны. Такой подход оправдан при расчете количества движения, переданного ударником пике. Следует только отметить, что время от начала импульса до фронта отраженной волны должно быть не менее $2T_0$, чтобы регистрируемые напряжения существенно снизились (по сравнению с амплитудой импульса).
При расчете энергии ударного импульса подход, предлагаемый Методикой ЕРТА, некорректен: интегрирование следует проводить только до первого нуля напряжений.
Такое решение вытекает из следующих соображений:
- ударная машина предназначена для разрушения прочных материалов, а напряжения за головной частью импульса находятся в зоне упругости большинства материалов и не разрушают их (в примере, показанном на рис. 5, напряжения при $t > T_0$ не превышают 1 % от амплитуды импульса, а энергия – 0,05 % от энергии головной части);
- напряжения растяжения «не способны» выполнять полезную работу разрушения, и включение в расчет таких участков, расположенных в «хвосте» волнового процесса, неоправданно завышает величину энергии ударного импульса[9].

Погрешности измерений. Дадим оценку погрешности коэффициента чувствительности измерительного тракта μ и энергии ударного импульса W при образцовом ударе молотка МО-9К на градуировочном стенде установки «УИПУ-4М» при скорости соударения v_y = 15 м/с.

[9] Мы рассматриваем одиночные удары. При работе ряда машин возникают или специально создаются повторные соударения ударника с пикой; в этом случае они также должны учитываться при интегрировании.

Технические характеристики стенда и измерительной аппаратуры [1]:
- база измерения скорости B = 45,00 мм;
- расстояние от верхнего луча до торца пики h = 10 мм;
- ширина диафрагмы (см. рис. 1) b = 0,06 мм (по уровню фотосигнала 30%...70%);
- электрическое сопротивление тензодатчика r = 800 Ом (2 тензорезистора с длиной решетки 25 мм, соединенных последовательно);
- электрическое сопротивление шунта R = 300 кОм.

При калибровке измерительного тракта Установки «УИПУ-4М» используется прецизионный шунт ($R \gg r$), что позволяет исключить погрешности, связанные с нестабильностью коэффициента усиления тензоусилителя и источника тока, погрешности от нестабильности напряжения питания и изменения сопротивлений тензодатчиков от температуры.
Достигнутая нестабильность измерительной пики $\delta_{\text{п}}$ составляет менее 0,15 % [1].
Погрешности величин, входящих в формулы (1)-(5), внесены в Таблицу 3.

Таблица 3

Погрешности исходных данных

Наименование погрешности	**Обозначение**	**Формула**	**Значение, %**
Погрешность модуля Юнга E	δ_E	$100\cdot(0{,}5\cdot10^9/E)$	0,24
Погрешность скорости звука c	δ_c	$0{,}5\cdot\delta_E$	0,12
Погрешность площади пики S	δ_S	$100\cdot2\cdot(10^{-5}/d)$	0,07
Погрешность базы измерения базы B	δ_B	$100\cdot(2\cdot10^{-5}/B)$	0,04
Погрешность измерения времени $\Delta t_{\uparrow}$= 3,00 мс	$\delta_{\Delta t_{\uparrow}}$	$100\cdot(10^{-6}/3\cdot10^{-3})$	0,03
Погрешность измерения времени $\Delta t_{\downarrow}= B/(\lambda\nu_{\text{y}})$ = 13,04 мс	$\delta_{\Delta t_{\downarrow}}$	$100\cdot(10^{-6}/(\lambda\nu_{\text{y}}))$	0,01
Погрешность измерения расстояния z=110 мм	δ_z	$100\cdot(0{,}5\cdot10^{-3}/z)$	0,45

Вычислим интервал времени Δt от момента пересечения ударником верхнего луча до момента начала регистрации ударного импульса тензодатчиком (см. рис. 1, *г*):

$$\Delta t \cong h/v_{\text{y}} + z/c = 10^{-2}/15+110\cdot10^{-3}/5164 = 6{,}88\cdot10^{-4}\ \text{с}.$$

Примем неопределенность нахождения начала ударного импульса по предложенной методике 10% – 50% от амплитуды импульса $\sim 3\cdot10^{-6}$ с (см. рис. 1, *е*). Тогда погрешность измерения интервала времени $[\,t_2,\ t_3]$ составит $\delta_{t_2t_3}= 100\cdot(2+3)\cdot10^{-6}/\Delta t$ = 0,73 %.
Погрешность расчета времени Δt:

$$\delta_{\Delta t} = \sqrt{\delta_{t_2t_3}^2 + \delta_z^2 + \left[\frac{z}{c\Delta t}\right]^2 \delta_c^2} = 0{,}86\ \%.$$

Соответственно, погрешность определения расстояния h по формуле (1) составит:

$$\delta_h = \frac{v_y \Delta t}{h}\sqrt{{\delta_B}^2 + \delta^2_{\Delta t_\uparrow} + \delta^2_{\Delta t}} = 0{,}89\ \%.$$

Погрешность измерения предударной скорости v_y будет:

$$\delta_{v_y} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta^2_{\Delta t_\uparrow} + \left(\frac{gh}{v_y^2}\right)^2 \delta_h^2} = 0{,}05\ \%.$$

Перемещение ударника за время контакта с пикой e = 0,460 мм (рис. 5, *б*), скорость отскока $v_o = \lambda v_y$ = 0,23·15 = 3,45 м/с. Поскольку $v_o^2 \gg 2ge$, перемещением ударника можно пренебречь. Тогда для погрешности скорости отскока получаем:

$$\delta_{v_o} = \sqrt{\delta_B^2 + \delta^2_{\Delta t_\downarrow} + \left(\frac{gh}{v_o^2}\right)^2 \delta_h^2} = 0{,}04\ \%.$$

Скорости удара и отскока измеряются практически с одинаковой погрешностью, поэтому можно считать, что $\delta_{v_o} = \delta_{v_y} = 0{,}05\ \%$.

Для регистрации ударного импульса и сигналов с фотодатчиков будем использовать аналого-цифровой преобразователь напряжения L-Card L-502, внесенный в государственный реестр измерений[10]. Предельная погрешность преобразователя $\delta_{\text{АЦП}}$, % при одноканальном режиме работы с частотой ввода данных 1 МГц в диапазоне частот сигнала свыше 100 кГц нормируется в виде:

$$\delta_{\text{АЦП}} = \pm\left[\alpha + \beta\left(\frac{X_{\text{оп}}}{\sqrt{2}X} - 1\right)\right],$$

где $X_{\text{оп}}$ – значение установленного предела измерений напряжения электрического тока; X – величина измеряемого напряжения электрического тока; α = 1,00 % и β = 0,03 % – соответственно, мультипликативная и аддитивная погрешности преобразователя.

Будем полагать, что амплитуда ударного импульса u_{max} находится в верхней трети шкалы установленного предела измерений преобразователя L-502, и она равна $X_{\text{оп}}/\sqrt{2}$.

Тогда погрешность интегрирования ударного импульса молотка МО-9К с помощью этого преобразователя составит:

$$\delta_1 = 100\frac{\int_0^{T_\leftrightarrow}[(\alpha-\beta)\psi(t)+\beta]dt}{\int_0^{T_\leftrightarrow}\psi(t)\,dt} = 1{,}03\ \%^{11},$$

[10] L-502 – 16-разрядный 16-ти канальный АЦП и ЦАП с частотой преобразования 2 МГц и входным диапазоном напряжений от ±0,2 до ±10,0 В. Метрологические характеристики преобразователя подтверждены Свидетельством об утверждении типа измерений RU.C.34.390.A № 68764 от 15.01.2018 г.

[11] Значение получено расчетом на модели удара [12].

где $T_{\leftrightarrow}$ – время от начала импульса до прихода отраженной волны, $T_{\leftrightarrow}$ = 343 мкс (см. рис. 5, *в*); $\bar{u}(t) = u(t)/u_{max}$ – безразмерный ударный импульс; $\psi(t)$ = [1+($\sqrt{2}$-1)$\bar{u}(t)$]/2 – импульс, приведенный к шкале [-1...+1].
Погрешность коэффициента чувствительности измерительного тракта δ_μ согласно (6) будет равна:

$$\delta_\mu = \sqrt{\delta_1^2 + \frac{1+\lambda^2}{(1+\lambda)^2}\delta_{v_y}^2 + \delta_E^2 + \delta_S^2 + \delta_п^2} = 1{,}04\ \%^{12},$$

а для погрешности интегрирования квадрата ударного импульса с помощью преобразователя L-502 получим:

$$\delta_2 = 100\,\frac{\int_0^{T_0}[(\alpha-\beta)\psi(t)\ +\beta)][(2+\alpha-\beta)\psi(t)\ +\beta]dt}{\int_0^{T_0}[\psi(t)]^2 dt} = 2{,}05\ \%.$$

Энергия ударного импульса – от начала импульса до первого нуля напряжения – вычисляется по формуле (5). Соответственно, ее погрешность δ_W оценим как:

$$\delta_W = \sqrt{\delta_2^2 + 4\delta_\mu^2 + \delta_c^2 + \delta_E^2 + \delta_S^2 + 4\delta_п^2} = 2{,}95\ \%.$$

На основе формулы (8) можно предложить другой метод определения энергии ударного импульса: регистрировать средний импульс при работе ударной машины и затем воспроизводить его на градуировочном стенде с расчетом кинетической энергии ударника и энергии его отскока. Критерием воспроизведения может служить амплитуда импульса или его площадь, которая пропорциональна количеству движения (см. формулу 3).
Тогда получается меньшая погрешность [16]:

$$\delta_W = \sqrt{\delta_1^2 + 4\delta_п^2 + 4(1+\lambda^2)\delta_{v_y}^2} + 0{,}5 = 1{,}58\ \%.$$

Достоинство этого метода состоит в одновременном получении и энергии ударного импульса, и энергии удара машины. Но зависимость (8) следует подтвердить экспериментально, и подтвердить ее для более широкого класса машин ударного действия, чем были рассмотрены в данном исследовании.

Заключение. Подведем итоги. Для оценки эффективности машин ударного действия целесообразен переход от измерения кинетической энергии ударника к измерению энергии ударного импульса в рабочем инструменте.
Задача повышения точности таких измерений может быть решена с помощью образцовых ударов, выполняемых на специальных стендах с оптической системой регистрации скорости ударника.
Для решения этой задачи в настоящей работе предложены:

[12] Погрешность длительности ударного импульса δ_T не учитываем, т.к. $\frac{\partial}{\partial T}\int_0^{T_0} u(t)dt = u(T_0) = 0$. Погрешности измерения массы ударника m и плотности ρ пренебрежимо малы – порядка 0,01 %.

- методы определения энергии ударного импульса с использованием закона сохранения количества движения;
- гипотеза и основанный на ней метод определения энергии ударного импульса как разности между кинетической энергией ударника перед ударом и его кинетической энергией при отскоке;
- вариант регистрации образцовых ударов с синхронной записью во времени сигналов оптической системы и измерительной пики, позволяющий более точно определять скорость ударника перед ударом и скорость его отскока, а также оценивать время контакта с пикой.

На примере образцового удара пневматического отбойного молотка МО-9К показано:
- применение закона сохранения количества позволяет аттестовать измерительный преобразователь (пику, штангу) и откалибровать измерительный тракт с погрешностью 1 %;
- с использованием аттестованного измерительного преобразователя возможно измерять энергию ударного импульса с погрешностью 3 % (без учета разброса экспериментальных данных, определяемого работой самой ударной машины);
- метод измерения, основанный на предложенной гипотезе, позволит измерять энергию ударного импульса с погрешностью порядка 2 %;
- снижение погрешности измерений возможно за счет более точных преобразователей напряжения электрического тока, применяемых для регистрации ударных деформаций.

На основании численного исследования ударных импульсов пневматических отбойных молотков и бетоноломов при скоростях соударения 5…15 м/с, охватывающих весь диапазон упругих соударений, установлены закономерности:
- с увеличением скорости соударения уменьшается длительность ударного импульса и скорость отскока ударника, увеличивается КПД передачи удара;
- при соударении с пикой постоянного сечения длительность контакта деталей совпадает с длительностью ударного импульса, а при соударении с пикой, имеющей бурт, длительность контакта оказывается меньше длительности импульса, а также меньше времени достижения нулевых напряжений;
- наличие бурта у измерительной пики, за счет отражения от него, приводит к возникновению низкоамплитудного знакопеременного волнового процесса, следующего за головной частью импульса;
- при отскоке от пики потенциальная энергия ударников современных отбойных молотков и бетоноломов во всем диапазоне скоростей упругого соударения не превосходит 0,5 % от энергии удара;
- при расчете количества движения ударного импульса следует интегрировать волновой процесс от его начала до прихода отраженной волны, а при расчете энергии импульса – только до первого нулевого значения регистрируемых напряжений.

Предложенные методы и проведенные исследования позволяют утверждать, что задача, поставленная Европейской Ассоциацией Производителей Электроинструмента по достижению 5 %-ой точности измерения энергии ударного импульса, является реальной, а применение образцовых ударов и приведенный анализ погрешностей измерений демонстрируют пути ее достижения.

Список литературы

1. 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: 06.12.2016).

2. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. - М.: Наука, 1969.–201 с.
3. Кашаев В.А. Специальная аппаратура для исследования рабочих процессов во взрывоимпульсных горных машинах / Разрушение горного массива машинами взрыво-импульсного действия. Коллективная монография. - М.: Наука, 1974. – С. 127-134.
4. EPTA – The European Power Tools Association. Procedure 05 “Measurement of the single impact energy of rotary hammers and breakers”. Version 2.0– 23 p., 2016 / Европейская Ассоциация Производителей Электроинструмента. Методика измерения единичной энергии удара перфораторов и отбойных молотков. Версия 2.0 - 2016. – 23 с.
5. Рындин В.П. Определение энергетических параметров и совершенствование динамики ударных систем бурильных машин: дис. … докт. техн. наук: 05.05.06. – Кузбасский государственный технический университет, Кемерово, 2005. – 330 с.
6. Городилов Л. В., Ефимов В. П. Экспериментальное исследование ударных импульсов в системе «боек-инструмент» ударного устройства при взаимодействии с массивом. / Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - Том 6, № 2. – С. 46-51.
7. Ямпольский Д.З., Ванаев В.С. Анализ методики испытаний электрических машин с целью определения энергии удара. // Вестник машиностроения. – 2018. - № 7. – С. 47-54.
8. Ямпольский Д.З. Энергия удара или энергия ударного импульса: что и как измерять? // Вестник научно-технического развития. - 2021. - № 160. - С. 65-86. https://www.vntr.ru/vols/ 2021-160/vntr2021-160-6.pdf (дата обращения 25.02.2021).
9. Will Didier. Development and Validation of a Mathematical Model for Predicting the Performance of Rotary Hammer Drills (2013). Theses and Dissertations. 88. University of Wisconsin-Milwaukee. https://dc.uwm.edu/etd/88.
10. 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).
11. Стихановский Б.Н., Стихановская Л.М. Определение коэффициентов восстановления скоростей при ударе бойка по инструменту в узлах строительных и горных машин. // Вестник СибАДИ. - 2017, выпуск 6 (58). – С. 8-16.
12. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 56 с.
13. 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).
14. 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.
15. Пути улучшения эксплуатационных показателей машин ударного действия. Краткий научный отчет / Александров Е.В., Соколинский В.Б. и др. – М.: Институт горного дела им. А.А. Скочинского, 1968. – 55 с.
16. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. –262 с.

Дата поступления: 29 июля 2023 г.