DOI: 10.18411/vntr2024-173-2

УДК 62-97/-98

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА МЕТОДОМ ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ

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

Аннотация. *В статье рассмотрена возможность определения энергии ударного импульса машины ударного действия методом индикаторных диаграмм давлений в ее рабочих камерах без тензометрирования напряжений в рабочем инструменте. На примере пневматического отбойного молотка МО-2М производства АО «Томский электромеханический завод им. В.В. Вахрушева» показана реализация такой возможности.*
Ключевые слова*: энергия ударного импульса, метод индикаторных диаграмм, отбойный молоток, бетонолом.*

ABOUT THE POSSIBILITY OF DETERMINING ENERGY OF THE SHOCK PULSE BY THE METHOD OF INDICATOR DIAGRAMS

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

Abstract. *The article considers the possibility of determining the energy of the shock pulse of an impact machine by the method of pressure indicator diagrams in its working chambers without strain measurement of stresses in the working tool. Using the example of a pneumatic jackhammer MO-2M manufactured by JSC Tomsk Electromechanical Plant named after V.V. Vakhrushev, the implementation of such a possibility is shown.*
Keywords: *impact pulse energy, indicator diagram method, jackhammer, concrete breaker.*

В настоящей статье пойдет речь об измерении энергетических параметров машин ударного действия – отбойных молотков, бетоноломов, перфораторов. В частности, об энергии ударного импульса – энергии первой волны сжатия, возникающей в рабочем инструменте машины при ударе по нему бойка-ударника и распространяющейся к объекту разрушения со скоростью звука [1, 2].

Вопрос измерения энергии ударного импульса стал актуальным после принятия Европейской Ассоциацией Производителей Электроинструмента в 2009 году новой методики определения энергии удара электрических машин (далее Методика EPTA) [3].

Данной теме посвящен ряд работ [4-17], обобщающих отечественный и зарубежный опыт разработки измерительной аппаратуры и исследования волновых процессов при механическом ударе.

Энергию ударного импульса W измеряют тензометрическим методом [4-7, 9-11], регистрируя ударные деформации в инструменте в зависимости от времени t, и определяют расчетом согласно соотношению:

$$W = cES\int_0^T \varepsilon^2(t)dt, \qquad (1)$$

где c, E, S – соответственно: скорость звука, модуль упругости и площадь поперечного сечения измерительной пики (штанги); T – длительность ударного импульса; ε – относительная деформация тензодатчика.

Мы предлагаем альтернативный способ: определение энергии ударного импульса без тензометрирования. В обоснование этого способа нам помогут исследования ударных процессов [1, 15-17] и расчеты соударений на модели [18].

Обратимся к отечественной истории развития тензометрического метода.

В 1980 г. установка «УИПУ-4» [5], разработанная инженером В.А. Кашаевым в Институте горного дела им. А.А. Скочинского, прошла государственную метрологическую аттестацию[1] и была внедрена на Томском электромеханическом заводе им. В.В. Вахрушева (АО «ТЭМЗ»). Установка предназначалась для измерения кинетической энергии бойка ударной машины перед его соударением с инструментом, в сложившейся терминологии – **энергии единичного удара** [15]. Установка применялась для пневматических молотков: отбойных, рубильных и клепальных[2], – и в ней использовался метод измерения по амплитуде ударных деформаций (амплитуде ударного импульса)[3].

В ходе дальнейших работ было обнаружено явление незатухания собственных колебаний ударника: стоячая волна в возбужденном ударнике, возникшая в нем после отскока от инструмента, накладывается при последующем соударении на новый ударный импульс, изменяет его амплитуду и приводит к погрешности измерений ~10 % [11, 17].

Исследования показали, что эту погрешность можно считать систематической и практически полностью исключить. Для этого достаточно усреднить ординаты от 20 до 50 следующих друг за другом ударных импульсов (в соответственные моменты времени, считая от их начала), и тогда результирующий импульс будет аналогичен получаемому при образцовом ударе на градуировочном стенде (при той же скорости соударения ударника с измерительной пикой). Такое усреднение впервые было применено в компьютерной версии установки «УИПУ-4М» (2001 г.)[4].

В работе [17] показано, что если возбужденный ударник наносит удары по пике с постоянной скоростью, но в различной фазе собственных колебаний, то усредненный импульс полностью совпадает с импульсом при градуировке (импульсом невозбужденного ударника).

Основываясь на этих закономерностях, перейдем к изложению предлагаемого способа определения энергии ударного импульса.

Пусть ударная машина (отбойный, молоток, бетонолом, перфоратор) работает в установившемся периодическом режиме.

---

[1] Подтверждены: погрешность измерительной аппаратуры 2,5 % и погрешность измерений (метода) 5,0 %.

[2] С помощью установки «УИПУ-4М» разработано более 20 модификаций пневматических молотков. Модификация установки работает на АО «ТЭМЗ» и в ООО «УДАРМАШ» по настоящее время.

[3] См. также ГОСТ Р 55162.

[4] До компьютерной версии усреднялась только амплитуда (максимальное значение) импульса.

Метод измерения по амплитуде деформаций предполагает совпадение ударных импульсов – среднего, регистрируемого при работе ударной машины, и получаемого при образцовом ударе на градуировочном стенде [11, 19].
Отсюда следует, что для среднего и градуировочного импульсов совпадают: скорости удара v_y, количество движения и скорости отскока ударника v_o[5], а также энергия ударного импульса W (см. формулу 1).
Тогда можно записать:
закон сохранения энергии при образцовом ударе (градуировке)

$$\frac{mv_y^2}{2} = \frac{mv_o^2}{2} + W + U_{yг}^+$$

и закон сохранения энергии для усредненного импульса[6]

$$\frac{mv_y^2}{2} + U_y^- = \frac{mv_o^2}{2} + W + U_y^+,$$

где m – масса ударника; $U_{yг}^+$ – потенциальная энергия собственных колебаний ударника при образцовом ударе; U_y^-, U_y^+ – средние значения потенциальной энергии собственных колебаний ударника в установившемся режиме машины до и после удара, соответственно.

Следовательно, $U_{yг}^+ = U_y^+ - U_y^-$.

Поскольку потенциальная энергия собственных колебаний зависит от их фазы, то величина $U_{yг}^+$ должна оцениваться по максимальному значению. Расчеты показывают, что для современных пневматических отбойных молотков и бетоноломов максимум собственных колебаний ударников не превышает 0,5 % от энергии ударного импульса [16].
Таким образом, с указанной точностью можно положить

$$W = \frac{m}{2}\left[v_y^2 - v_o^2\right]. \quad (2)$$

В диссертации [13] приведены результаты образцовых ударов при проверке измерительной системы согласно Методике EPTA для электроперфораторов с энергией ударного импульса порядка 2 Дж. В ней показано, что среднее значение энергий, определенных по формулам (1) и (2), отличается не более чем на 0,3 % и 3,0 %[7] в зависимости от применяемых измерительных штанг[8].
Но скорость удара и скорость отскока не обязательно определять при образцовом ударе: их можно рассчитать, используя метод индикаторных диаграмм – наиболее отработанный и широко используемый метод определения энергетических параметров машин ударного действия [20-21].

[5] Рассматривается скорость центра масс ударника
[6] Прочими потерями энергии, связанными с магнитострикцией, трением, излучением звука, в силу их малости по сравнению с энергией удара, пренебрегаем.
[7] Требование Методики EPTA к верификации ударной системы: расхождение должно быть не более 5 %.
[8] Штанга SDS PLUS длиной 600 мм и диаметром 10 мм, сталь ANSI 8630, масса металлического ударника 72 г. Скорость соударения 8 м/с, коэффициент отскока 1,3. К сожалению, в работе не указаны геометрические размеры, марка стали и твердость ударника.

Рассмотрим работу отбойного молотка МО-2М производства АО «ТЭМЗ» на стенде по ГОСТ Р 55162 при давлении сжатого воздуха 0,4 МПа и усилии нажатия 250 Н. Экспериментальная индикаторная диаграмма давлений в его рабочих камерах представлена на рис. 1.

Скорости удара и отскока определяются по индикаторной диаграмме согласно следующим соотношениям [21]:

$$v_{\text{у}} = \frac{\Delta}{t_{\text{ц}}} + \frac{1}{2} g t_{\text{ц}} cos\alpha + \frac{1}{m t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} F(t) t dt\,, \quad v_{\text{о}} = g t_{\text{ц}} cos\alpha + \frac{1}{m} \int_0^{t_{\text{ц}}} F(t) dt,$$

где Δ = 0,93 мм – глубина внедрения пики за удар; $t_{\text{ц}}$ = 51,6 мс –длительность рабочего цикла молотка; g – ускорение свободного падения; α = 0 – угол между осью движения ударника и вертикалью; m = 0,432 кг – масса ударника; t – время цикла, отсчитываемое от момента удара; $F(t) = (P_2 - P_1)S_{\text{у}}$ – пневматическая сила, действующая на ударник; P_1, P_2 – давления в камере холостого и прямого хода, соответственно; $S_{\text{у}}$= 4,52 10^{-4} м^2 – площадь поперечного сечения поршневой части ударника (диаметр 32 мм).

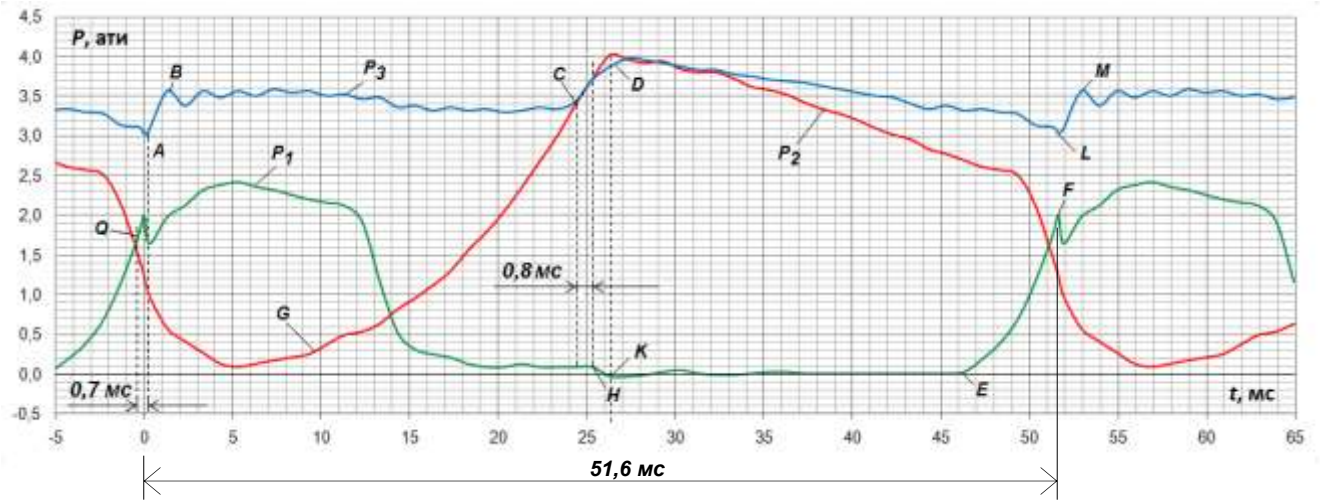
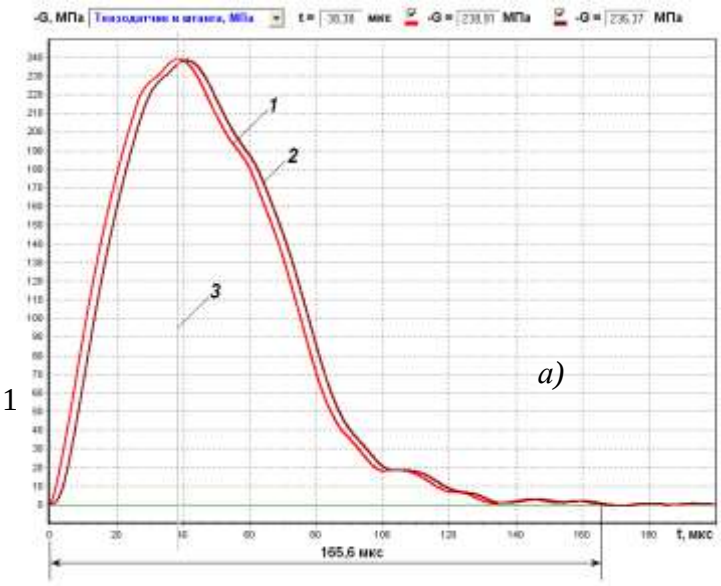
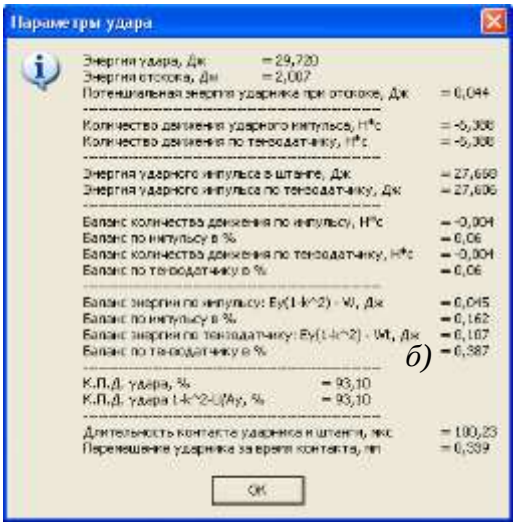


Рис. 1. – Индикаторная диаграмма отбойного молотка МО-2М на стенде по ГОСТ Р 55162 при давлении сжатого воздуха 0,4 МПа и усилии нажатия 250 Н

P_1 – давление в камере холостого хода; P_2 – давление в камере рабочего хода; P_3 – давление в предклапанном пространстве на входе в молоток; нуль времени t совмещен с моментом удара ударника по инструменту; участки $[AB]$ и $[LM]$ соответствует переброске клапана на холостой ход; участки $[CD]$ и $[HK]$ – переброске на рабочий ход; $[GC]$ и $[EF]$ – участки адиабатического сжатия в камерах молотка; точка Q – давление начала переброски клапана на холостой ход; точка C – давление начала переброски клапана на рабочий ход; обозначенные интервалы показывают величину волновой задержки вдоль тракта подачи воздуха на холостой ход



а)



б)

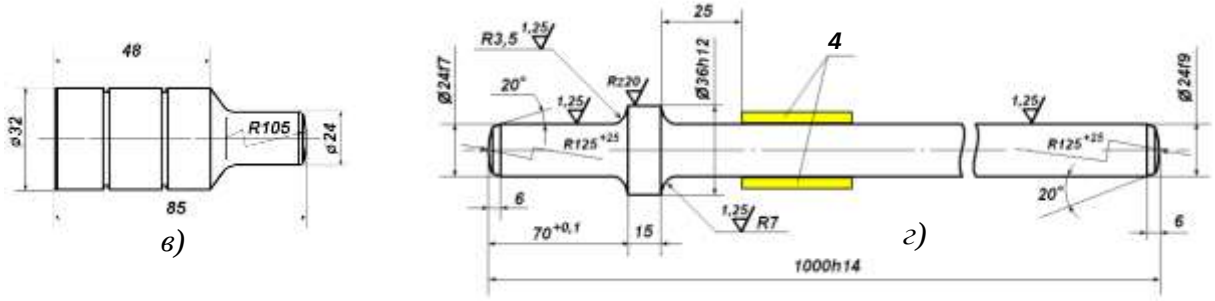


Рис. 2. – Ударные импульсы и ударная система молотка МО-2М АО «ТЭМЗ»

а) ударные импульсы при v_y = 11,73 м/с; *б)* параметры удара; *в)* ударник; *г)* измерительная пика

1, 2 – напряжения в измерительной пике и напряжения в пике по тензодатчику (решетка 25 мм);

3 – визир указывает значения времени и напряжений (вверху) при амплитуде импульса; *4* — тензодатчики

Расчетные параметры молотка, полученные методом индикаторных диаграмм, равны: энергия удара 29,72 Дж, скорость удара v_y= 11,73 м/с, скорость отскока v_o= 2,93 м/с, коэффициент отскока v_o/v_y= 0,25.

Согласно формуле (2) энергия ударного импульса составляет:

$$W = 0{,}432 \cdot (11{,}73^2 - 2{,}93^2)/2 = 27{,}86 \text{ Дж}.$$

На рис. 2, *а* представлен расчетный ударный импульс молотка МО-2М, полученный на модели [18][9] также при скорости соударения 11,73 м/с. В расчете использована измерительная пика аналогичная ГОСТ Р 55162 [11] длиной 1000 мм[10], показанная на рис 2, *г*. Стандартная пика длиной 340 мм не позволяет «увидеть» ударный импульс полностью из-за наложения на него отраженной волны (согласно Методике ЕРТА длина пики/штанги должна исключать такое наложение).

Справа на рис. 2, *б* показаны расчетные параметры удара: энергия ударного импульса составила 27,67 Дж[11], коэффициент отскока ударника 0,26, максимум потенциальной энергии собственных колебаний ударника 0,044 Дж (0,15 % от энергии удара).

По сравнению с расчетным значением, энергия ударного импульса, полученная методом индикаторных диаграмм, отличается менее чем на 1 %:

$$100\cdot(1\text{-}27{,}86/27{,}67) = \text{-}0{,}67\ \%.$$

Итак, на примере отбойного молотка второго типоразмера МО-2М нами продемонстрирована возможность определения энергии ударного импульса с использованием метода индикаторных диаграмм без тензометрирования напряжений в рабочем инструменте ударной машины.

Конечно, в статье рассмотрен лишь частный случай: необходимы исследования применимости данного способа к различным машинам ударного действия: пневматическим, гидравлическим, электрическим, – с анализом потерь энергии на сопутствующие удару процессы и определением погрешностей измерений.

Надеемся, что эта задача найдет своих исследователей.

[9] Расчетная сетка 0,05 мм ×0,005 мкс.

[10] Марка стали ударника и пики У8А, твердость 55…59 $HRC_э$ и 59…62 $HRC_э$ соответственно, модуль Юнга 209 ГПа, плотность 7839 кг/м^3, стержневая скорость звука 5164 м/с.

[11] Значение рассчитано от начала импульса до первого нуля напряжений в соответствии с рекомендацией [8].

Список литературы

1. Александров Е.В., В.Б. Соколинский. Прикладная теория и расчеты ударных систем. – М.: Наука, 1969. – 201 с.
2. Манжосов В.К. Модели продольного удара. – Ульяновск: УлГТУ, 2006 – 160 с.
3. 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.
4. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. – М; Машиностроение, 2000. – 416 с., ил.
5. 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.
6. Рындин В.П. К вопросу измерения энергии удара бурильных машин// Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2004. - Вып. 2. – С. 45-48.
7. Рындин В.П. Определение энергетических параметров и совершенствование динамики ударных систем бурильных машин: спец. 05.05.06 «Горные машины»: автореф. дисс. … д.т.н. / Рындин Владимир Прокопьевич; Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово: 2005. – 39 с.
8. Манжосов В.К. Слепухин В.В. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.
9. 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
10. Мехеда В.А. Тензометрический метод измерения деформаций: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм, ун-та, 2011. – 56 с.
11. Кашаев В.А., Ямпольский Д.З. Тензометрический метод измерения удара. Российский опыт. Достижения и перспективы // Вестник научно-технического развития – 2017. – № 2 (114). – URL: http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=1011
12. Ямпольский Д.З., Ванаев В.С. Анализ методики испытаний электрических машин с целью определения энергии удара. // Вестник машиностроения. – 2018. – № 7. – С. 47-54.
13. Will Didier. Development and Validation of a Mathematical Model for Predicting the Performance of Rotary Hammer Drills / Theses and Dissertations. University of Wisconsin-Milwaukee. – 2013. – № 88. – URL: https://dc.uwm.edu/etd/88.
14. 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. – 2019. - Том 6, № 2.– С. 46-51.
15. Ямпольский Д.З. Энергия удара или энергия ударного импульса: что и как измерять? // Вестник научно-технического развития. – 2021. – № 160. - С. 65-86. –URL: https://www.vntr.ru/vols/2021- 160/ vntr2021-160-6.pdf.
16. Ямпольский Д.З. Образцовые удары. Закономерности. Погрешности. Примеры. // Вестник научно-технического развития. – 2023. – № 170. - С. 51-67. – URL: https://vntr.ru/vols/2023-170/vntr2023-170-4.pdf.

17. Ямпольский Д.З. Некоторые особенности ударных импульсов машин ударного действия // Вестник научно-технического развития.- 2020.- № 4 (152). - С. 26-42. – URL: http://www.vntr.ru/vols/2020-04/vntr2020-152-4.pdf.
18. Ямпольский Д.З. Численное моделирование продольного удара. Сравнение с экспериментом. //Вестник научно-технического развития. - 2019. – № 9 (145). – С. 30-51. – URL: http://www.vntr.ru/vols/2019-09/vntr2019-145-4.pdf.
19. Стихановский Б.Н. Анализ точностных характеристик ударных испытательных стендов, исследование и разработка методов их определения. – Омск: 1987. – 144 с.
20. Суднишников В.Б, Тупицын Н.Н. , Есин К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: Сиб. отд. АН СССР, 1985. – 136 с.
21. 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. – Москва. – 2003. – Вып. 325. – С. 145-154.

Дата поступления: 5 июня 2024 г.