УДК 62-97/-98

# ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УДАРА. РОССИЙСКИЙ ОПЫТ. ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**© Кашаев Вадим Афанасьевич**
*Общество с ограниченной ответственностью «УДАРМАШ», г. Москва*
udarmash@mail.ru
**© Ямпольский Дмитрий Зиновьевич**
*Общество с ограниченной ответственностью «УДАРМАШ», г. Москва*
udarmash@mail.ru

***Аннотация.*** *В последние годы возрос интерес к методам и средствам измерения энергии удара ручных машин ударного действия. В статье изложен российский опыт, основанный на тензометрии ударных импульсов деформаций в рабочем инструменте машины. Представлен метод измерений и соответствующая аппаратура, разработанная в Институте горного дела им. А.А.Скочинского и ООО «УДАРМАШ», – серия установок «УИПУ». Даны примеры измерения пневматических и электрических ударных машин. Рассмотрены вопросы стабильности, точности, воспроизводимости измерений и перспективы развития метода.*

***Ключевые слова:*** *ручные машины ударного действия, энергия удара, тензометрический метод, средства измерения, точность, воспроизводимость, перспективы развития.*

# A STRAIN GAUGE METHOD FOR THE MEASUREMENT OF IMPACT. KNOWLEDGE AND EXPERIENCE IN RUSSIA. ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS

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

***Abstract****. In recent years, interest in methods and means of hand-held power tools impact energy measurement increased. The article describes knowledge and experience in Russia, based on strain gauge measurements of shock wave deformations in the inserted tool of the machine. A method of measurement and appropriate equipment were developed at the A.A. Skochinsky Institute of Mining (Lubertsy, Moscow region) and "UDARMASH" – the "UIPU" system modifications are presented. Examples of pneumatic and electric power tools measurement are given. Issues of stability, accuracy, reproducibility of measurements and prospects for the development of the method are considered.*

***Key words:*** *hand-held power tools, impact energy, strain-gauge method of measurement, means of measurement, accuracy, reproducibility, development prospects.*

Каков самый важный параметр ручной машины ударного действия – отбойного, рубильного, клепального молотка, перфоратора? Конечно, энергия удара: потребитель выбирает ручную машину по энергии удара, производитель стремится создать ручную машину с низкой массой, вибрацией и шумом, но с высокой энергией удара. Эти требования противоречивы, а современные ручные машины ударного действия столь совершенны, что новые технические ре-

шения для них приходится искать на уровне 10...15 %. Без измерения энергии удара решить такие задачи невозможно, причем погрешность в ±10 %, регламентируемая действующими нормативами [1], сегодня уже недостаточна: нужны более точные средства и методы измерений.

Известно множество методов измерения энергии удара машин ударного действия, их классификация дана в работах [2, 3]. Из всех методов следует выделить метод тензометрии импульсов деформации в рабочем инструменте машины – тензометрический метод измерения удара [4, 5]. Причин тому несколько: во-первых, это метод неразрушающего контроля без внесения изменений в конструкцию машины и ее рабочий инструмент; во-вторых, тензометрические измерения широко распространены в промышленности, и их метрология тщательно разработана; в-третьих, трудоемкость измерений этим методом невелика, а сами измерения воспроизводимы как в лабораторных, так и в натурных условиях; в-четвертых, за последние полвека метод получил широкое распространение и развитие.

Настоящая статья посвящена истории развития тензометрического метода, измерительной аппаратуре, разработанной для его реализации, и методикам измерений ударных процессов с использованием тензометрии.

Основы тензометрии ударных процессов в РФ заложены в 60-70-е годы XX века. Из работ того времени, следует выделить работы Института горного дела им. А.А.Скочинского (ИГД). Здесь в лаборатории удара и вибрации под руководством проф., д.т.н. В.Е.Александрова были выполнены фундаментальные исследования волновых явлений в стержневых ударных системах [6], создана специальная измерительная аппаратура – установка «УИПУ» [4], испытательные стенды типа «СОРП» [5]. По результатам этих исследований были спроектированы и поставлены на серийное производство мощные и надежные пневматические отбойные молотки, имеющие малую массу, низкую вибрацию и шум, которые с небольшими изменениями выпускаются в настоящее время отечественной промышленностью.

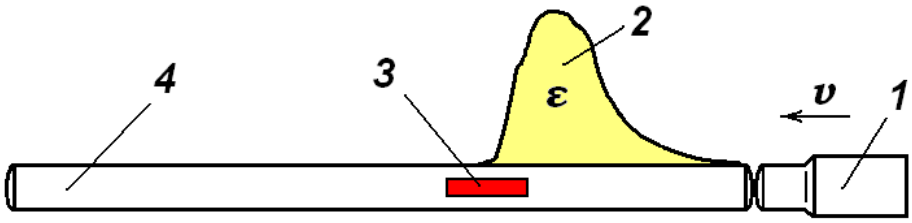



**Рис. 1**. Формирование ударного импульса
1 – ударник; 2 – импульс ударной деформации; 3 – тензодатчик;
4 - измерительный преобразователь; $\varepsilon$ – относительная деформация

Для изложения метода измерений, разработанного ИГД, рассмотрим машину ударного действия, в которой имеется ударник, совершающий возвратно-поступательное движение, и рабочий инструмент, по которому ударник периодически наносит удары. При ударе в рабочем инструменте возникает импульс деформации сжатия, как показано на рис. 1. Импульс распространяется к противоположному концу инструмента, деформирует обрабатываемый материал, отражается от его границы, возвращается обратно к соударяемому торцу и вновь отражается от него. Этот процесс повторяется многократно, обеспечивая разрушение материала и внедрение в него рабочего инструмента. В зависимости от условий отражения импульс сжатия трансформируется в импульс растяжения или снова в импульс сжатия, или в комбинированный импульс сжатия–растяжения. Таким образом, в рабочем инструменте формируется сложная волновая картина, которая полностью затухает к моменту следующего удара, как показано на рис. 2.

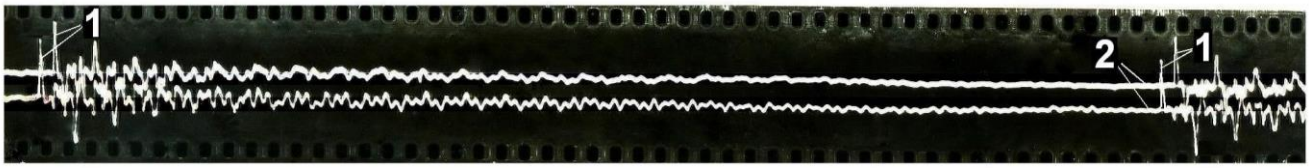



**Рис. 2**. Волновой процесс в буровой штанге
1 – первый (падающий) ударный импульс; 2 – затухание ударного процесса

Из всех импульсов, возникающих при ударе, только первый (падающий) импульс деформации несет в себе информацию о скорости соударения ударника с инструментом. Если ударник и инструмент имеют равные поперечные сечения и изготовлены из одного материала, то, согласно волновой теории удара, амплитуда импульса сжатия в инструменте $\varepsilon_{max}$ определяется формулой Сен-Венана:

$$\varepsilon_{max} = \frac{v}{2a}, \quad (1)$$

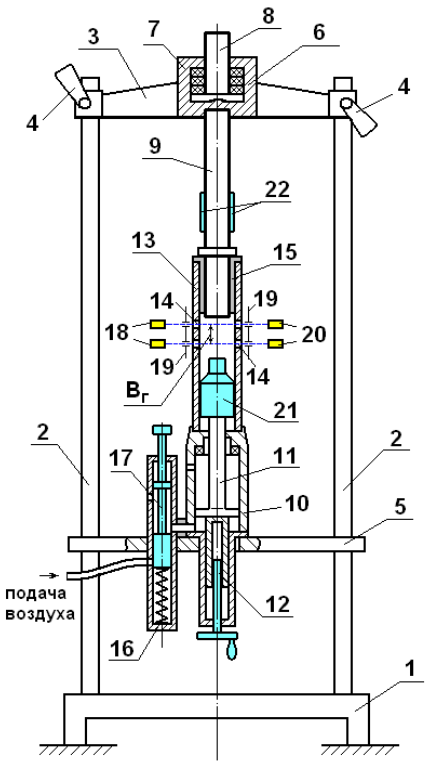
где $v$ – скорость ударника; $a$ – скорость звука (скорость продольной волны) в нем.

В реальных ударных системах, имеющих сложную геометрию и состоящих из различных материалов, амплитуда деформации зависит также и от других факторов: длины ударника, соотношения поперечных сечений ударника и инструмента, их плотности, радиусов и контактной жесткости торцов [6-8]. Но зависимость амплитуды от скорости, близкая к линейной, остается неизменной.

На этой физической закономерности строится метод измерения энергии удара по амплитуде ударного импульса (Метод по амплитуде), применяемый для пневматических молотков в установках «УИПУ». Под термином «энергия удара» здесь и далее мы понимаем кинетическую энергию ударника непосредственно перед его ударом по рабочему инструменту. Это традиционное определение энергии удара.



**Рис. 3а.** Градуировочный стенд «СГУ-3». Общий вид




*б)*

**Рис. 3**. Градуировочный стенд «СГУ-3»
а) общий вид, б) принципиальная схема

1 – станина; 2 – колонны; 3 – подвижная траверса; 4 – зажимы; 5 – неподвижная траверса; 6 – поглотитель энергии; 7 – резиновый буфер; 8 – пика поглотителя энергии; 9 – измерительная пика; 10 – пневматический ускоритель; 11 – поршень; 12 – микрометрический винт; 13 – направляющая; 14 – диаметральные отверстия; 15 – центрирующая втулка, 16 – пусковой механизм; 17 – золотник с ручным пуском; 18 – источники света; 19 – диафрагмы; 20 – фотодетекторы; 21 – ударник; 22 – измерительная пика с тензодатчиками

Суть метода состоит в следующем [5]. Отбойный молоток устанавливается на стенд «СОРП» и включается в номинальный режим работы. При каждом ударе измерительный блок установки «УИПУ» выделяет первый ударный импульс, поступающий с измерительной пики, измеряет его амплитуду и период следования импульсов. Результат измерений усредняется за 50...300 ударов.

Далее отбойный молоток разбирается, его ударник устанавливается на специальный градуировочный стенд «СГУ» (см. рис. 3), где этим ударником выполняют одиночные образцовые удары по той же измерительной пике. Стенд имеет пневматический механизм разгона ударника и оптическую систему с калиброванной базой для измерения предударной скорости ударника. Регулировкой длины разгона ударника добиваются амплитуды ударного импульса, равной средней амплитуде, измеренной при работе молотка. Регистрируемая таким образом скорость ударника определяет его кинетическую энергию $A$, т.е. энергию удара

$$A = \frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2}\left[\frac{B}{\tau}\right]^2, \qquad (2)$$

где $m$ – масса ударника; $B$ – база измерения скорости; $\tau$ – время пролета ударником базы стенда.

Установка «УИПУ» испытала 4 модификации, в 1978 году она прошла государственную метрологическую аттестацию, а в 1980 году внедрена на Томском электромеханическом заводе им. В.В.Вахрушева («ТЭМЗ») – в то время основном производителе пневматических молотков в СССР. Установка успешно проработала на заводе до 2001 года, с ее помощью разработано и поставлено на серийное производство более 20 моделей отбойных, рубильных и клепальных молотков, а с 2000 года – бетоноломов.

Достигнутая на установках «УИПУ» точность измерения энергии удара тензометрическим методом составляет ±2,5 %. Этот результат получен как за счет стабильности самого измерительного тракта, так и за счет стабильности измерительных преобразователей – пик.

Известно, что механический удар сопровождается множеством паразитных (с точки зрения измерений) явлений: намагничивание пики, магнитострикция, магнитоиндукция, трибоэффект и др. Они генерируют помехи, которые существенно снижают точность измерений. В ИГД разработаны прецизионные измерительные преобразователи, в которых влияние указанных факторов минимально, а нестабильность измерительного тракта «УИПУ» с учетом этих преобразователей не превышает 0,15 %.

На рис. 4 показаны результаты аттестации помехоустойчивой измерительной пики № 210. Пика тестировалась на 2-х различных установках «УИПУ» и двух градуировочных стендах «СГУ» в течение 6 месяцев, зимой и летом.

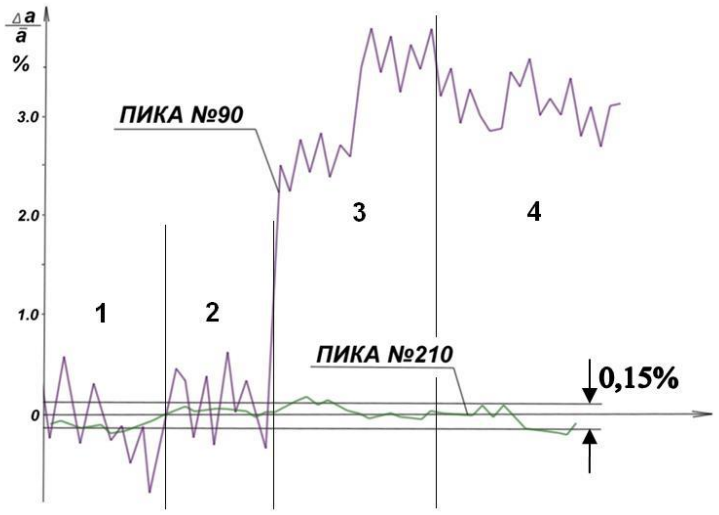
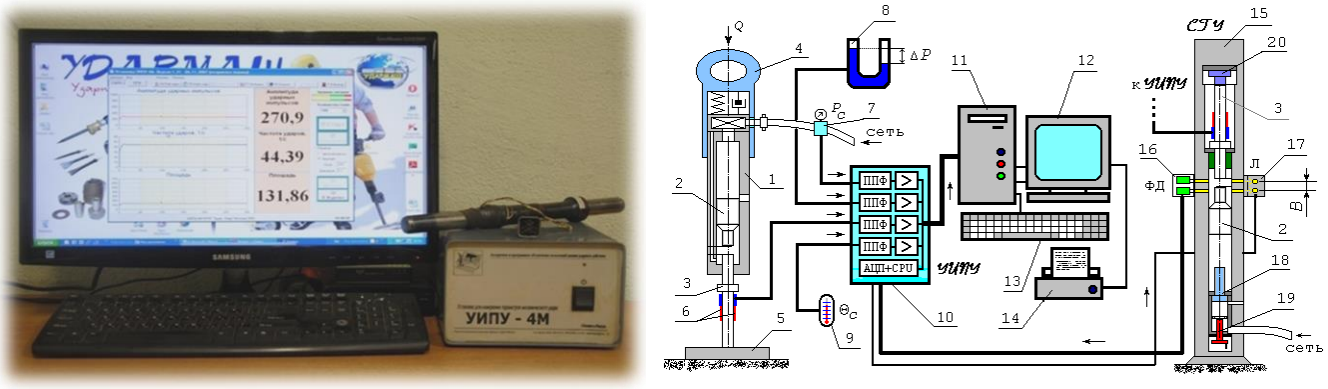



**Рис. 4**. Стабильность показаний при градуировке
1 – СГУ-2 № 2, ИПУ-4 № 2; 2 – СГУ-2 № 3, ИПУ-4 № 3;
3 – СГУ-2 № 2, ИПУ-4 № 2; 4 – СГУ-2 № 2, ИПУ-4 № 3

В 2001 году нашей фирмой ООО «УДАРМАШ» был разработан и поставлен на завод «ТЭМЗ» модернизированный компьютеризированный измерительный комплекс «УИПУ-4М» (установка «УИПУ-4М»)[1]. Фото измерительного блока комплекса и принципиальная схема измерений представлены на рис. 5.

Комплекс позволяет визуализировать процесс работы ударной машины и в реальном времени получать ее рабочие параметры: амплитуду и частоту ударов, давление и расход воздуха. Процесс можно наблюдать на экране монитора в виде синхронизированных по времени графиков, отображающих каждый рабочий цикл ударной машины. Программное обеспечение комплекса позволяет проанализировать серию зарегистрированных ударных импульсов и каждый импульс в отдельности, сравнить его со средним импульсом, а в дальнейшем выполнить градуировку образцовыми ударами на стенде.

[1] Разработчик установки «УИПУ» и прецизионных пик – Кашаев В.А., он же был руководителем разработки измерительного комплекса «УИПУ-4М».




а) б)

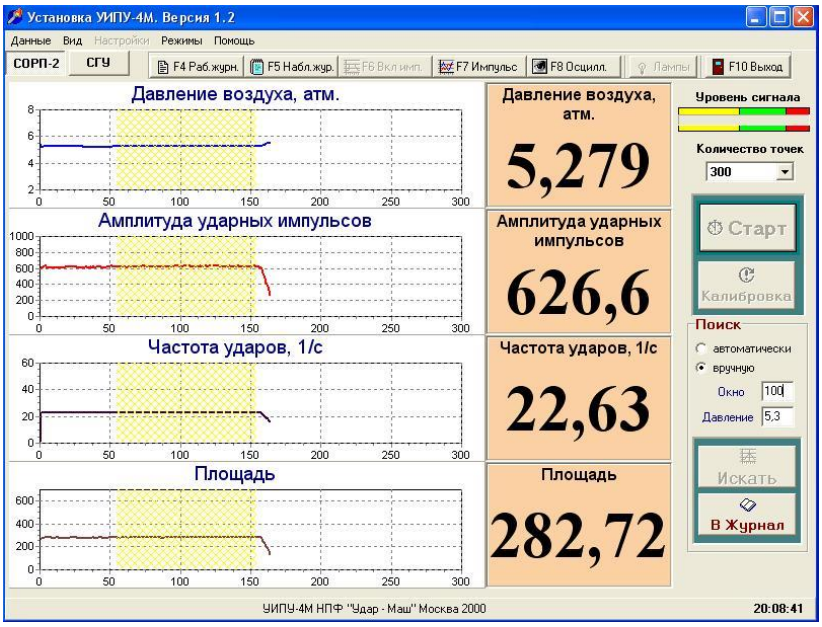
**Рис 5**. Измерительный комплекс «УИПУ-4М»
а) измерительный блок и пика; б) принципиальная схема измерений
1 – корпус ударной машины; 2 – ударник; 3 – вставной инструмент; 4 – рукоятка; 5 – приемник энергии удара; 6 – тензодатчики; 7 – датчик давления; 8 – дифманометр; 9 – датчик температуры воздуха; 10 – микропроцессорный измерительный блок с усилителями и АЦП; 11 – системный блок компьютера (АЦП+CPU); 12 – монитор; 13 – клавиатура; 14 – принтер; 15 – стенд СГУ; 16 – фотодетекторы (ФД); 17 – лампы накаливания с калиброванной диафрагмой (Л); 18 – разгонный поршень; 19 – винт регулировки разгона ударника; 20 – приемник энергии удара стенда; $Q$ – усилие нажатия; $P_c$ – давление в сети; $\Delta P$ – перепад давления на дифманометре; $\theta_c$ - температура сжатого воздуха; $B$ – калиброванная база стенда; ППФ – противоподменный фильтр.

Применение компьютерных технологий позволило повысить точность и оперативность измерений. Технические характеристики установки «УИПУ-4М» представлены в Таблице 1.

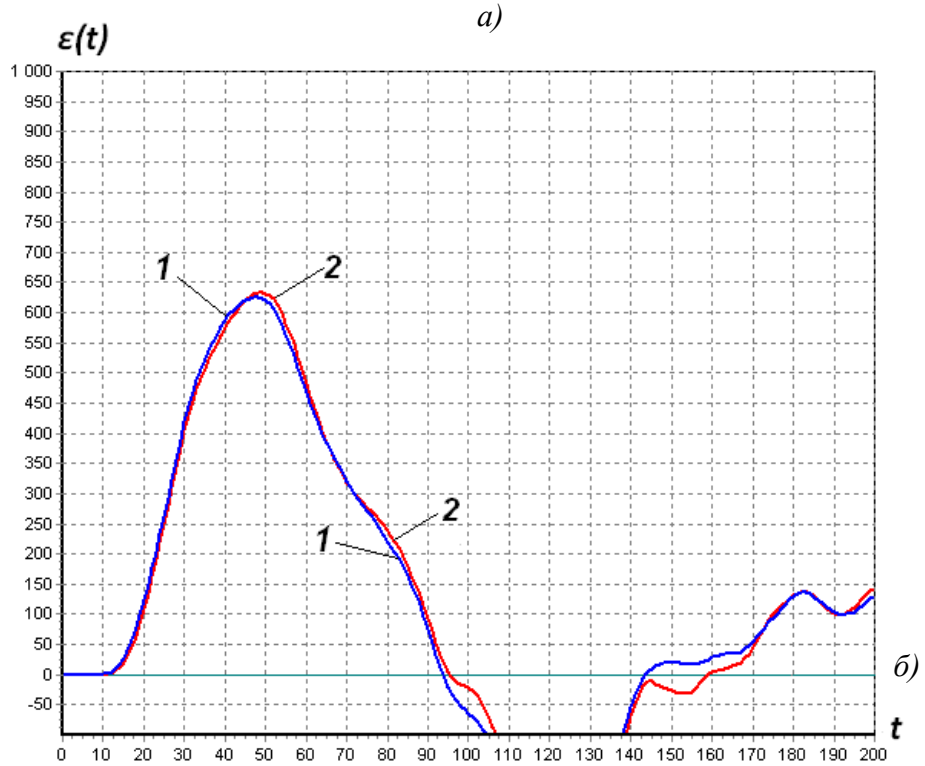
**Таблица 1** – Технические характеристики установки «УИПУ-4М

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Количество тензодатчиков | 2 |
| Электрическое сопротивление тензодатчика, Ом | 400 |
| Диапазон измерения энергии удара | 1...250 Дж |
| Диапазон измерения частоты ударов | 4...100 $с^{-1}$ |
| Основная погрешность измерения энергии удара | < 2,0 % |
| Основная погрешность измерения частоты ударов | < 0,01 % |
| Полоса пропускания тензоусилителя | 2 Гц…300 кГц |
| Частота выборки | 1 МГц |
| Разрядность АЦП | 12 бит |
| Динамический диапазон измерений | 110 дБ |

На рис. 6 представлены результаты испытаний на установке «УИПУ-4М» серийного отбойного молотка МО-2Б производства «ТЭМЗ», работающего при номинальном давлении сжатого воздуха 0,53 МПа с энергией удара 39,5 Дж. На рис. 6, *а* показаны графики давления воздуха, амплитуды и частоты ударов, площади ударных импульсов. Справа от графиков даны средние значения указанных параметров, соответствующие 100 последовательным циклам (см. выделение), выбранным для анализа.




*а)*




*б)*

**Рис 6**. Результаты испытаний отбойного молотка МО-2Б
а) последовательность рабочих циклов; б) ударные импульсы: 1 – средний, 2 – текущий;
$\varepsilon(t)$ – относительная деформация; $t$ – время в мкс;
Параметры импульсов в условных единицах:
средний: амплитуда 626,63, площадь 282,7, площадь квадрата 543,5;
текущий: амплитуда 632,75, площадь 284,3, площадь квадрата 547,3

На рис. 6, *б* показаны ударные импульсы молотка: средний и один из максимальных текущих импульсов, а также их характеристики: амплитуда, площадь и площадь квадрата импульса в условных единицах.

Видно, что молоток работает стабильно, помехи отсутствуют, текущий ударный импульс незначительно отличается от среднего: отличие по амплитуде – 1,0 %, по площади – 0,6 %, по площади квадрата импульса – 0,7 %.

Сличительные испытания между лабораториями ИГД и «ТЭМЗ» показали расхождение результатов по энергии удара и ударной мощности молотков не более 1,5 %. Столь высокая воспроизводимость результатов испытаний достигнута не только за счет стабильности измерительной аппаратуры «УИПУ» и стабильности измерительных преобразователей, но, в первую очередь, за счет использования стендов и за счет детальной отработки методики испытаний.

Мы рассказали об измерении энергии удара ударной машины, т.е. кинетической энергии ударника перед его ударом по рабочему инструменту. Но правильней машину ударного действия характеризовать энергией, прошедшей в рабочий инструмент, – энергией ударного импульса. Именно эта энергия далее пойдет на выполнение полезной работы – на разрушение.

Энергия ударного импульса $W$ определяется формулой[2]:

$$W = cES\int_0^T \varepsilon^2(x,t)dt, \qquad (3)$$

где $c$ – скорость звука в измерительной пике; $E$ – модуль Юнга пики; $S$ – площадь поперечного сечения пики; $\varepsilon(x,t)$ – относительная деформация пики под действием ударного импульса в сечении с координатой $x$ в момент времени $t$; $T$ – длительность ударного импульса.

Энергия ударного импульса более объективно характеризует ударную машину, чем кинетическая энергия ударника.

Для примера приведем сравнение рубильных молотков ИП-4126 производства ООО «Резолит» (РФ) и MS13A «ARCHIMEDES» (Польша). Измерения выполнены с помощью комплекса «УИПУ-4М» в 2005 году. Мы испытывали молотки при давлениях сжатого воздуха 0,53 МПа и 0,63 МПа в соответствии с ГОСТ 15997-81Е «Молотки рубильные пневматические. Технические условия» [9]. Энергия удара молотков $A$, частота ударов $f$ и ударная мощность $N$ определялась согласно Методу по амплитуде, изложенному выше. В дополнение для каждого молотка измерялась площадь квадрата ударного импульса $G$, пропорциональная энергии импульса, и рассчитывалась мощность ударных импульсов $P$, $P = G{\cdot}f$.

Ударные импульсы молотков представлены на рис. 7, а результаты расчетов – в Таблице 2.

Из анализа ударных импульсов следует:

– по площади квадрата импульса $G$ молоток MS13A превосходит молоток ИП-4126 на 27 % при давлении 0,53 МПа; а при давлении 0,63 МПа – на 23 %;

– по ударной мощности $P$, переданной инструменту, молотки MS13A и ИП-4126 практически одинаковы при давлении 0,53 МПа; а при давлении 0,63 МПа молоток MS13A уступает ИП-4126 всего 4 %.

– при примерно одинаковой длительности ударных импульсов, форма ударного импульса молотка ИП-4126 близка к треугольной, в то время как форма ударного импульса молотка MS13A ближе к прямоугольной, что, быть может, более выгодно для процесса разрушения, т.к. на объект рубки большее время действуют высокие напряжения;

– в то же время нужно отметить, что амплитуда ударного импульса, т.е. сила удара, у молотка ИП-4126 выше – на 1,7 % при давлении 0,53 МПа и на 4,7 % при давлении 0,63 МПа.

[2] Предполагается, что ударный импульс полностью укладывается на длине измерительной пики, и отраженный импульс не накладывается на него.

Таким образом, исходя из ударных импульсов, следует предположить, что производительность молотка MS13A по рубке будет примерно равна производительности молотка ИП-4126.

Совершенно иной вывод о соотношении энергетических параметров молотков следует из результатов, полученных Методом по амплитуде. Молоток MS13A значительно слабее молотка ИП-4126: он уступает по энергии удара 27 % при давлении сжатого воздуха 0,53 МПа и 23 % при давлении 0,63 МПа; ударная мощность молотка MS13A ниже на 46 % при давлении сжатого воздуха 0,53 МПа и на 43 % при давлении 0,63 МПа.

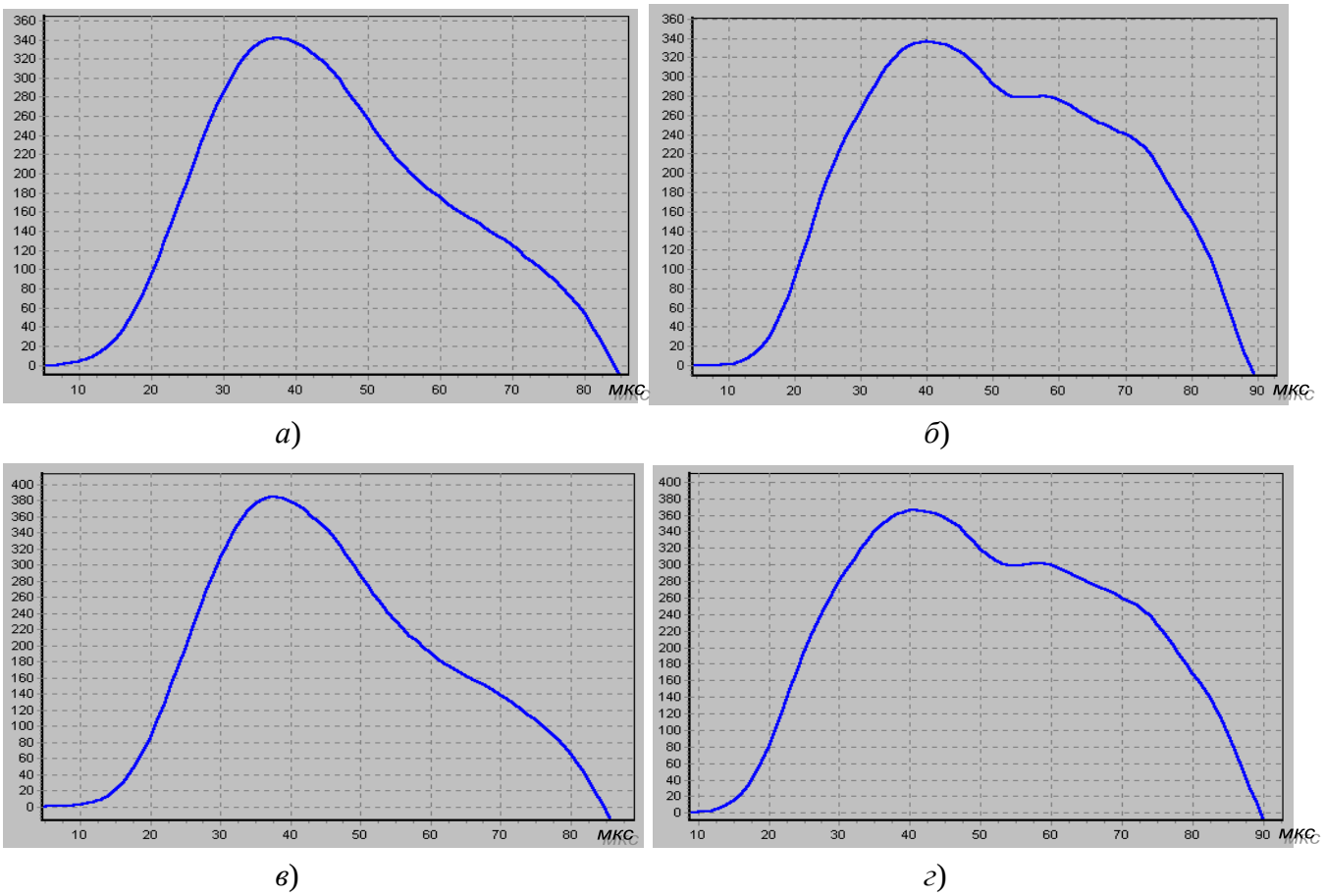



**Рис 7**. Ударные импульсы молотков ИП-4126 и MSA-13 “ARCHIMEDES”
при давлении 0,53 МПа: а) – ИП-4613, б) MSA-13;
при давлении 0,63 МПа: в) – ИП-4613, г) MSA-13.

**Таблица 2** – Энергетические параметры рубильных молотков

| Марка молотка | Давление сжатого воздуха, МПа | Амплитуда, дел. | Частота ударов $f$, $с^{-1}$ | Энергия удара, А, Дж | Энергия ударного импульса $G$, кв. дел.×с | Ударная мощность, $N=A\times f$, Вт | Мощность ударных импульсов $P$, кв. дел. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ИП-4126 | 0,53 | 343 | 36,5 | 13,2 | 134 | 482 | 4890 |
| MS13A | 0,53 | 337 | 26,8 | 9,7 | 183 | 260 | 4901 |
| ИП-4126 | 0,63 | 385 | 38,4 | 15,0 | 164 | 576 | 6294 |
| MS13A | 0,63 | 367 | 28,4 | 11,5 | 213 | 327 | 6047 |

Причина такого несоответствия – в различии ударников молотков. У молотка ИП-4126 ударник короткий, имеет длину 40 мм, массу 151 г и большую кривизну соударяемого торца. Согласно волновой теории удара коэффициент отскока такого ударника близок к 0,5. Таким образом, примерно четверть энергии удара уносится с отскоком ударника и не попадает в инструмент.

У молотка MS13A, наоборот, более длинный ударник – 70 мм, его масса 305 г, у него плоский торец и, соответственно, малый коэффициент отскока. Поэтому он бóльшую долю своей кинетической энергии передает в инструмент.

Мы видим, что в данном случае энергия ударного импульса действительно более полно характеризует эффективность ударной машины, чем его амплитуда.

Энергия ударного импульса включает в себя и к.п.д. двигателя ударной машины и к.п.д. ее ударной системы. Более того, переход к измерению энергии ударного импульса позволяет выполнять испытания без дополнительных градуировок, используя предварительно аттестованные измерительные преобразователи, для которых определены физические константы: скорость звука $c$, модуль Юнга $E$, площадь поперечного сечения $S$.

Такой метод был использован В.П. Рындиным в работах Кузбасского государственного технического университета при исследовании бурильных машин [3, 10]. К сожалению, эти работы не получили метрологического развития.

Нами метод был опробован при испытаниях на установке «УИПУ-4М» электрических молотков в 2015 году. Измерялись молотки: ИНТЕРСКОЛ М-10/1100Э, HILTI TE 500, Makita HMC0871C и перфоратор BOSCH GBH-5-4-DCE Professional. Это ударные машины примерно одного класса – по массе, габаритным размерам, паспортным значениям энергии удара.

Испытания проводилось на стенде «СОРП» при усилии нажатия 200 Н. Рабочие циклы молотков и их ударные импульсы показаны на рис. 8. Из графиков видно, что молотки работают устойчиво, без сбоев и помех, разброс амплитуд импульсов незначительный. Процесс измерений каждого молотка занял около 6 секунд, в течение которых было записано 300 последовательных ударов.

На графиках (рис. 8 *а, в, д, ж*) видно, как включаются молотки (первые 15...20 ударов), как они выходят на номинальный режим работы, как выключаются (последние 10...20 ударов). Для анализа и расчетов нами выбраны средние 200 ударов (см. выделение). Справа от графиков показаны значения амплитуды и частоты ударов, средние за эти 200 ударов. Амплитуда указана в условных единицах, частота – в $с^{-1}$ (Гц).

Ударные импульсы молотков показаны на рис. 8 *б, г, е, з*. Средние и текущие импульсы почти не отличаются друг от друга. Справа от графиков даны расчетные характеристики текущих и средних импульсов: амплитуда, площадь импульса и площадь квадрата импульса, выраженные в условных единицах.

Расчетные энергетические характеристики молотков представлены на четырех диаграммах рис. 9.

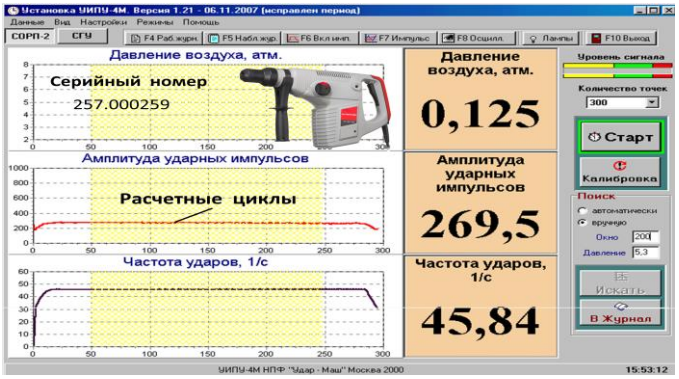
Молоток фирмы ИНТЕРСКОЛ показал самые низкие результаты – энергия 7,7 Дж, мощность 351 Вт, сила удара 51,8 кН. Перфоратор BOSCH и молоток HILTI показали равную энергию – 8,3 Дж и примерно одинаковую силу удара – 50 кН. Но ударная мощность молотка HILTI – 439 Вт выше, чем у перфоратора BOSCH – 400 Вт за счет более высокой частоты ударов.

Самым сильным оказался молоток Makita с энергией ударного импульса 10,9 Дж, мощностью 482 Вт и силой удара 60,4 кН.

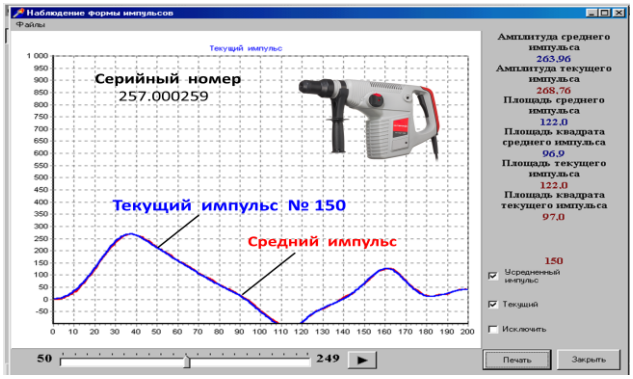
В 2009 году Европейская Ассоциация Производителей Электроинструмента «EPTA» разработала методику измерения энергии единичного удара перфораторов и отбойных молотков (Методика EPTA) [11], она регламентирует измерение энергии ударного импульса и

внесение ее значений в каталоги продукции[3]. Погрешность измерения энергии в Методике EPTA не указана, но анализ методики показывает, что она превышает ±5 %.

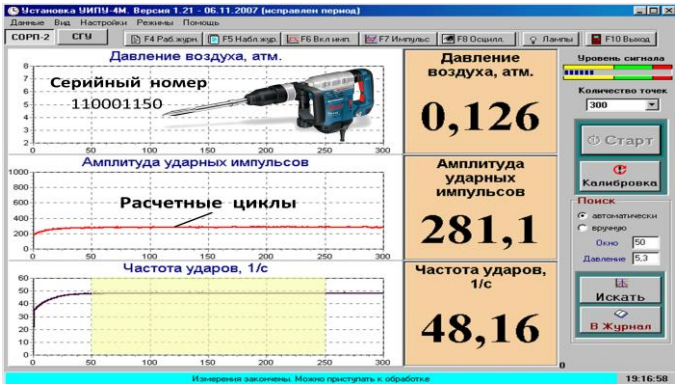
Паспортное значение молотка HILTI по Методике EPTA равно 7,5 Дж; наш результат 8,3 Дж выше на 10,7 %. Паспортное значение перфоратора BOSCH по Методике EPTA – 8,8 Дж; наш результат 8,3 Дж ниже на 5,7 %. Паспортное значение молотка Makita по методике EPTA – 8,1 Дж; наш результат 10,9 Дж выше на 34,6 %.



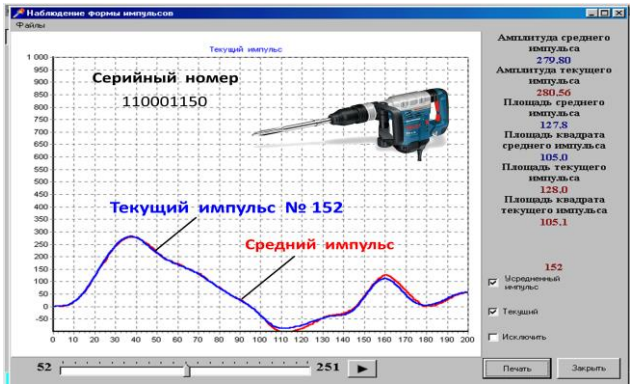

*а*)



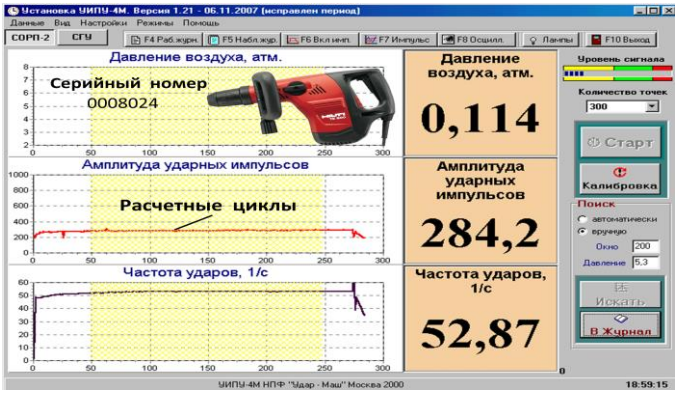

*б*)



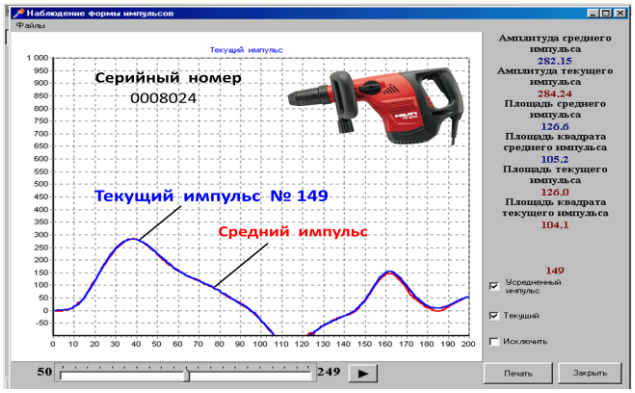

*в*)




*г*)

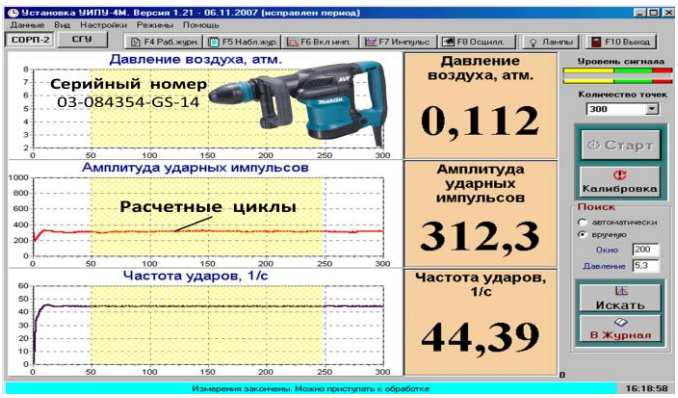


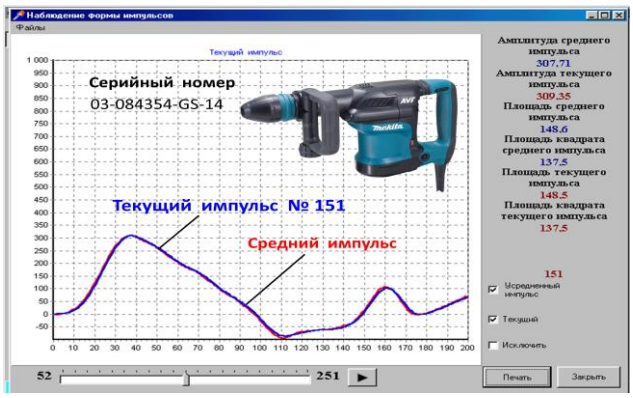

*д*)




*е*)

[3] 06.10.2016 г. принята новая редакция Методики EPTA.




*ж*) *з*)

**Рис 8**. Рабочие циклы электрических отбойных молотков и их ударные импульсы:
а), б) – ИНТЕРСКОЛ; в), г) – BOSCH; д), е) – Hilti; ж), з) – Makita

Мы не ставили задачу сопоставить наши измерения с паспортными значениями энергии импульса этих машин. Для нас было важно показать возможность использования аппаратуры «УИПУ-4М» для испытаний электрических молотков и измерения энергии ударного импульса, продемонстрировать ее стабильность и отсутствие помех. Выявленные расхождения, на наш взгляд, связаны с различием методик испытаний и различием аппаратуры. Они требуют детальных исследований, которые, мы надеемся, будут выполнены в дальнейшем.

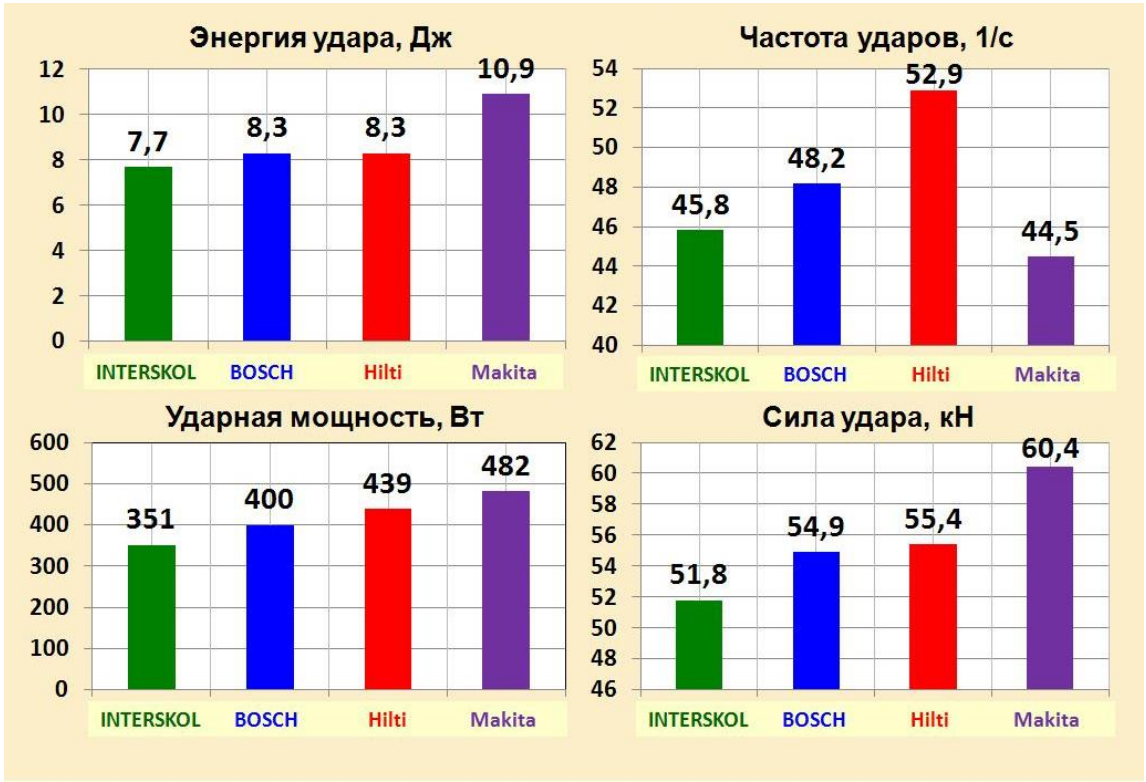



**Рис 9**. Энергетические характеристики электрических отбойных молотков

Но по относительным данным остаются вопросы.

Мы испытывали электроинструмент в одних и тех же условиях, по единой методике и с помощью стабильной аппаратуры, получив стабильные результаты. По нашим данным молоток Makita имеет энергию ударного импульса на 31,3 % выше, чем перфоратор BOSCH и молоток Hilti. По Методике EPTA выходит наоборот: он на 8,0 % слабее их, хотя по ударному импульсу

(см. рис. 8) видно, что амплитуда молотка Makita выше: 312 ед. против 281 ед. у BOSCH и 284 ед. у Hilti. К тому же импульс молотка Makita имеет бóльшую площадь[4].

Такое несоответствие ставит вопрос о сличительных испытаниях между лабораториями фирм и о воспроизводимости результатов испытаний по Методике EPTA.

Подведем итоги.

За последние 50 лет тензометрический метод измерения удара в РФ прошел большой путь совершенствования и развития.

Для ручных машин ударного действия создан уникальный компьютерный измерительный комплекс «УИПУ-4М», позволяющий измерять энергию удара с погрешностью ±2,0 % и не имеющий на сегодняшний день аналогов в мире по стабильности и точности измерений.

Разработаны методики измерений, испытательные стенды и методики испытаний, обеспечивающие высокую воспроизводимость результатов на уровне ±1,5 %.

Каковы же перспективы развития тензометрического метода?

Мы полагаем, что для всех машин ударного действия следует перейти к нормированию и измерению энергии ударного импульса и мощности ударных импульсов, которые более полно отражают эффективность ударной машины. Для этих целей необходимо отработать методики измерений и испытаний, провести комплекс метрологических исследований с целью определения погрешностей измерения энергии ударного импульса. По нашим оценкам, современный уровень техники позволяет снизить эту погрешность до ±1,0 %.

В натурных условиях эффективность ударной машины определяется ее производительностью. Вернемся к примеру сравнения рубильных молотков, ИП-4126 и MS13A, рассмотренному выше. Какой из молотков окажется на практике эффективней? Какой импульс предпочтительней с точки зрения разрушения тех или иных материалов – треугольный с высокой амплитудой, т.е. силой удара, или прямоугольный с большей площадью, т.е. большим количеством движения? В каком случае производительность молотка будет выше: при «легком» ударнике с высокой частотой и силой удара или при «тяжелом» ударнике с меньшей частотой и меньшей силой удара, но с большей энергией импульса?

Ответы на эти вопросы сегодня могут дать только натурные испытания молотков. Почему? – Потому, что не установлены зависимости производительности ударной машины от параметров ударного импульса – амплитуды, длительности, количества движения, энергии, формы импульса.

Современная тензометрическая аппаратура, тензометрический метод измерения удара позволяют такие зависимости получить. Эта задача, на наш взгляд, является весьма актуальной, и она ждет своих исследователей.

## Список литературы

1. ГОСТ 16844–93 Межгосударственный стандарт. «Вибрация. Требования к испытаниям механических молотков». М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
2. 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.
3. Рындин В.П. К вопросу измерения энергии удара бурильных машин // Вестник Кузбасского государственного технического университета – 2004 – №2. – С. 45-48.
4. Кашаев В.А. Определение энергетических параметров пневматических молотков тензометрическим методом // Сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1987. – С. 104-107

[4] Следует отметить, что по методике, применяемой фирмой Makita для собственных измерений, энергия удара молотка HMC0871C составляет 11,6 Дж.

5. ГОСТ 55162 – 2012 Оборудование горно-шахтное. Молотки отбойные пневматические. Требования безопасности и методы испытаний. М., Стандартинформ, 2014. – 28 с.
6. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М., «Наука». 1969 г. – 201 с.
7. Соколинский В.Б. Машины ударного разрушения (Основы комплексного проектирования). –М.: Машиностроение, 1982. – 184 с.
8. Манжосов В.К., Слепухин В.В. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры. Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.
9. ГОСТ 15997-81Е «Молотки рубильные пневматические. Технические условия». М.: Изд. стандартов, 1981 (В настоящее время отменен).
10. Рындин В.П. Ударные импульсы в штанге бурильной машины / В.П. Рындин // Вестник КузГТУ. – 2004. – №4. – С. 22-23.
11. EPTA – 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 с., 2016.

*Дата поступления статьи: 26 декабря 2016 года.*