



Доктор технических наук, профессор,
Заслуженный метролог Российской Федерации

ИСАЕВ ЛЕВ КОНСТАНТИНОВИЧ

в мае 2026 года
отметил 90 лет со дня рождения

Лев Константинович Исаев стоял у истоков современного метрологического обеспечения в Российской Федерации. При его непосредственном участии заложены основы международного сотрудничества в области метрологии и стандартизации.

Значительный отрезок трудовой карьеры Льва Константиновича заняла деятельность в Госстандарте СССР и Госстандарте России. Пик научной и организаторской активности пришёлся на сложный период, связанный с перестройкой, изменением законодательной базы нашей страны в области стандартизации и метрологии, вступлением в действие «Закона о техническом регулировании», пересмотром «Закона об обеспечении единства измерений».

Значимую долю в жизни Льва Константиновича занимает преподавание: он автор базового учебника для вузов по направлению «Метрология, стандартизация и сертификация», на котором выросло не одно поколение метрологов и стандартизаторов.

Бесценную помощь Льва Константиновича помнит и гордится ею коллектив научно-технического журнала «Эталоны. Стандартные образцы».

Редакция журнала и коллектив ВНИИМ им. Д. И. Менделеева сердечно поздравляют Льва Константиновича Исаева с юбилеем.

Желаем Льву Константиновичу блестящих идей и творческих сил для их реализации, бодрости духа и крепкого здоровья!

Для справки

Родился 9 мая 1936 г. в г. Свердловске.

В 1960 г. окончил Московский физико-технический институт.

В 1965 г. завершил обучение в аспирантуре Института автоматики и телемеханики АН СССР.

1996–97 гг. – заместитель председателя Государственного комитета РФ по стандартизации, метрологии и сертификации.

1997–1999 гг. – статс-секретарь – заместитель председателя Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации.

Интервью с юбиляром

ЛЕВ ИСАЕВ: «НА ЛЮБОМ ПОСТУ НУЖНО ДОБРОСОВЕСТНО ТРУДИТЬСЯ НА БЛАГО ДЕЛА»
читайте в журнале «Главный метролог», № 2 (176), 2026 год. <https://doi.org/10.32446/2587-9677gm.2026-2-7-11>

*фото заимствовано из источника
https://vk.com/wall-190057296_390*



ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 53.089.68

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-2-8-18>



Разработка и испытание макета эталонной установки для поверки и калибровки преобразователей ударного ускорения

Л. В. Степанов  

ООО «ГТЛАБ», г. Саров, Нижегородская обл., Россия
 lev@gtl.ru

Аннотация: Требования к точности и широте диапазонов измерений ударных ускорений возрастают по мере усложнения производственной базы в науке и технике. В этой связи актуальная метрологическая задача – снижение погрешностей при поверке и калибровке ударных акселерометров. Один из способов увеличения точности измерений ударных ускорений – снижение у эталонных средств погрешностей, возникающих при воспроизведении и передаче единицы ударного ускорения.

Воспроизведение ударных ускорений реализовано во множестве установок, работающих на различных физических принципах. Однако ни одной из существующих установок, ни серией однотипных установок не удастся перекрыть полностью весь диапазон встречаемых на практике пиковых значений ускорений и длительностей импульсов. Отечественные метрологические лаборатории испытывают потребность в эталонной установке, способной перекрыть диапазон значений ударных ускорений средних интенсивностей, широко востребованный для поверки и калибровки ударных акселерометров, а также для испытаний при разработке и производстве такого оборудования.

Цели исследования – разработать, изготовить и испытать макет ударной установки, которую впоследствии, после апробирования, будет возможно использовать в качестве прототипа эталонной ударной установки для поверки и калибровки преобразователей ударного ускорения.

Отправной точкой исследования стал обзор характеристик и возможностей Государственного первичного специального эталона единицы ускорения при ударном движении ГЭТ 57–84, рабочих эталонов 2-го разряда (поверочных ударных установок и вибростендов, работающих в ударном режиме) и мировых аналогов. На основе анализа литературных данных выбрана оптимальная схема с пневматическим поршнем, реализованная в конструкции ударной установки для вторичного метода калибровки акселерометров SE-201 (производитель SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH). Оборудование для исследования: модуль сбора данных D002 (производитель ООО «ГТЛАБ»); зарядовый кондиционирующий усилитель NEXUS2692-A (производитель Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement); акселерометр 1C301HA (производитель ООО «ГТЛАБ»). Реализованы методы численного моделирования и численного расчета; экспериментальный и измерительный методы. Применены программные продукты: GTL (разработчик ООО «ГТЛАБ»); Ansys LS-DYNA (разработчик ANSYS, Inc.).

Разработаны, изготовлены и апробированы модели молота и наковальни (двух соударяющихся тел) массой по 1 кг из закаленной стали 40X. На их основе разработан и изготовлен макет ударной установки. Экспериментально подтверждены результаты численного моделирования ударного взаимодействия молота и наковальни на разработанном макете: ударная установка воспроизводит необходимые режимы ударных импульсов, соответствующих рабочему эталону 2-го разряда (пиковые значения ударных ускорений – в диапазоне до 10^5 м/с² при длительностях импульсов – от 0,1 мс).

Оценено влияние пластических деформаций молота и наковальни на амплитуду и длительность ударного импульса. Приведены зависимости пиковых ускорений и длительностей импульсов от материала и толщины демпфирующих прокладок и высоты сброса молота. Наконец, показаны возможности разработанной установки послужить прототипом эталонной ударной установки для поверки и калибровки преобразователей ударного ускорения.

В развитие описанной в статье темы автор запланировал исследования, направленные на оптимизацию моделей молота и наковальни, например, на уменьшение их веса. Также будет изучено влияние геометрии и массы наковальни на ее собственные частоты. Рассматривается возможность внедрения лазерного интерферометра в эталонную установку для обеспечения калибровки и поверки абсолютным методом.

Ключевые слова: эталонная установка, ударная установка, ударное ускорение, поверка преобразователей, калибровка преобразователей, ударная скорость, длительность импульса, молот, наковальня

Для цитирования: Степанов Л. В. Разработка и испытание макета эталонной установки для поверки и калибровки преобразователей ударного ускорения // Эталоны. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 2. С. 8–18. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-2-8-18>

Статья поступила в редакцию 15.07.2025; одобрена после рецензирования 02.03.2026; принята к публикации 25.06.2026.

MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

Development and Testing of a Reference Installation Mock-up for Verification and Calibration of Shock Acceleration Transducers

Lev V. Stepanov  

GTLAB LLC, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

 lev@gtl.ru

Abstract: Requirements for the accuracy and width of measurement ranges of shock accelerations increase as the production base in science and technology becomes more complex. In this regard, a relevant metrological task is to reduce errors in the verification and calibration of shock accelerometers. One way to increase the accuracy of shock acceleration measurements is to reduce the errors in reference means that arise when reproducing and transferring units of shock acceleration.

The reproduction of shock accelerations is implemented in many installations operating on different physical principles. However, none of the existing installations, nor a series of identical installations, can cover the entire range of peak acceleration values and pulse durations encountered in practice. Domestic metrological laboratories need a reference installation capable of covering the range of medium-intensity shock accelerations, which is widely required for verification and calibration of shock accelerometers, as well as for testing during the development and production of such equipment.

The objectives of the research are to develop, manufacture and test a shock installation mock-up that, after validation, could be used as a prototype of a reference shock installation for verification and calibration of shock acceleration transducers.

The starting point of the research was a review of the characteristics and capabilities of the State Primary Special Standard of the unit of acceleration during shock motion GET 57–84, working standards of the 2nd class (shock testing installation and vibration exciters operating in shock mode), and global analogues. Based on the analysis of literature data, an optimal scheme with a pneumatic piston was selected, implemented in the design of the shock installation for the secondary calibration method of accelerometers SE-201 (manufacturer: SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH). Equipment used in the research: data acquisition module D002 (manufacturer: GTLAB LLC); charge conditioning amplifier NEXUS2692-A (manufacturer: Brüel & Kjær Sound and Vibration Measurement); accelerometer 1C301HA (manufacturer: GTLAB LLC). Methods of numerical simulation and numerical calculation, experimental and measurement methods were implemented. Software used: GTL (developed by GTLAB LLC); Ansys LS-DYNA (developed by ANSYS, Inc.).

Models of the hammer and anvil (two colliding bodies) with masses of 1 kg each made of hardened 40X steel were developed, manufactured and tested. Based on them, a shock installation mock-up was developed and manufactured. The results of numerical simulation of the impact interaction between the hammer and the anvil on the developed mock-up were experimentally confirmed: the shock installation reproduces the required shock pulse modes corresponding to a working standard of the 2nd class (peak shock accelerations in the range up to 10^5 m/s^2 with pulse durations from 0.1 ms). The influence of plastic deformations of the hammer and anvil on the amplitude and duration of the shock pulse was estimated. Dependences of peak accelerations and pulse durations on the material and thickness of damping pads and on the drop height of the hammer are presented. Finally, the capabilities of the developed installation to serve as a prototype of a reference shock installation for verification and calibration of shock acceleration transducers are shown. In continuation of the topic described in the article, the author has planned research aimed at optimizing the hammer and anvil models, for example, reducing their weight. The influence of the geometry and mass of the anvil on its natural frequencies will also be studied. The possibility of incorporating a laser interferometer into the reference installation to provide calibration and verification by an absolute method is being considered.

Keywords: reference setup, shock setup, shock acceleration, transducer verification, transducer calibration, impact velocity, pulse duration, hammer, anvil

For citation: Stepanov LV. Development and testing of a reference installation mock-up for verification and calibration of shock acceleration transducers. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(2):8–18 (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-2-8-18>

The article was submitted 15.07.2025; approved after reviewing 02.03.2026; accepted for publication 25.06.2026.

Введение

Условно весь диапазон ударных ускорений, встречаемых на практике, можно разделить на области низких, средних и высоких интенсивностей. При том характерно сочетание высоких интенсивностей ускорений с малыми длительностями импульсов и низких интенсивностей с большими длительностями [1]. Воспроизведение ударных ускорений реализовано во множестве установок, работающих на различных физических принципах, но перекрыть полностью весь диапазон пиковых

значений ускорений и длительностей импульсов одной или даже серий однотипных установок не удается.

Воспроизведение и передача единицы ускорения в области низких интенсивностей реализованы в различных калибраторах и камертонах в гармоническом режиме: они обеспечивают широкий частотный диапазон, но ограничены в амплитудном диапазоне. Для воспроизведения ускорений высоких интенсивностей используются установки, основанные на принципе стержня Гопкинсона, в которых импульс ускорения

генерируется в баллистическом режиме упругой волной, выходящей на торец стержня. Такой метод обеспечивает широкий диапазон амплитуд, но ограничен в диапазоне длительностей.

Единичные предложения ведущих мировых производителей и отсутствие на рынке отечественных эталонных установок, перекрывающих диапазон средних интенсивностей ударных ускорений (от 10 до 10^5 м/с² в диапазоне длительностей ударных импульсов от $0,1$ до 100 мс), наглядно иллюстрируют потребность метрологического сообщества в такой установке.

Цель исследования – разработать, изготовить и испытать макет ударной установки, способный перекрыть диапазон средних интенсивностей ударных ускорений.

С указанной целью поставлены следующие задачи:

1) проанализировать характеристики и возможности Государственного первичного специального эталона единицы ускорения при ударном движении ГЭТ 57–84, рабочих эталонов 2-го разряда (поверочных ударных установок и вибростендов, работающих в ударном режиме) и мировых аналогов;

2) выбрать на основе предшествующего обзора оптимальную схему конструкции ударной установки;

3) численно рассчитать в соответствии с избранной схемой модели молота и наковальни, на их основе разработать макет установки;

4) подтвердить экспериментальным путем результаты численного моделирования ударного взаимодействия на разработанном макете;

5) определить зависимости пиковых ускорений и длительностей импульсов от материала и толщины демпфирующих прокладок и высоты сброса молота.

Материалы и методы

Обзор законодательной базы

ГЭТ 57–84 включает комплекс средств измерений:

– установку для воспроизведения ударного ускорения при длительности импульса от 20 до 400 мкс по ГОСТ ISO 16063–1–2013¹,

¹ ГОСТ ISO 16063–1–2013 Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 1. Основные положения. Переоформление ГОСТ Р (ГОСТ Р ИСО 16063–1–2009, ГОСТ ИСО 5347–0–95).

ГОСТ Р ИСО 16063–13–2012² и ГОСТ Р ИСО 16063–22–2012³;

– установку для воспроизведения ударного ускорения при длительности импульса от $0,40$ до 100 мс по ГОСТ ISO 16063–1–2013, ГОСТ Р ИСО 16063–13–2012 и ГОСТ Р ИСО 16063–22–2012;

– комплект аппаратуры передачи размеров единиц ударного ускорения, ударной скорости и ударной силы (эталон сравнения) в составе: акселерометра высокой интенсивности ускорения; акселерометра низкой интенсивности ускорения; виброметра лазерный; эталонных гирь (ударников); преобразователя силы; комплекса вспомогательных устройств и специальных инженерных сооружений.

ГЭТ 57–84 обеспечивает воспроизведение единицы ускорения при ударном движении, а также связанных величин ударной скорости и ударной силы.

Диапазон пиковых значений единицы ускорения при ударном движении составляет от 10 до $2 \cdot 10^6$ м/с² (в зависимости от формы и длительности ударного импульса) в диапазоне длительностей однополярного и биполярного ударного импульса от 20 до 100 мс при монотонно возрастающем переднем фронте.

В качестве рабочих эталонов 2-го разряда используют поверочные ударные установки и вибростенды, работающие в ударном режиме в диапазоне пиковых значений ударных ускорений (1 – 10^5) м/с², ударной скорости (10^{-1} – 40) м/с и ударной силы ($5 \cdot 10^{-1}$ – 10^5) Н в диапазоне длительностей ударного импульса от $0,1$ до 100 мс, а также генераторы ударных импульсов. В качестве эталонного виброизмерительного преобразователя в ударном режиме может быть использован рабочий эталон 1-го разряда согласно приказу Росстандарта № 2772⁴.

Взамен ГОСТ Р ИСО 16063–1–2009, ГОСТ ИСО 5347–0–95.

² ГОСТ Р ИСО 16063–13–2012 Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 13. Первичная ударная калибровка методами лазерной интерферометрии.

³ ГОСТ Р ИСО 16063–22–2012 Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 22. Ударная калибровка сравнением с эталонным преобразователем.

⁴ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений виброперемещения, виброускорения и углового ускорения :

Выбор оптимальной схемы

Устройства и методы воспроизведения ударных импульсов различной формы и длительности рассмотрены в [2]. Для воспроизведения и передачи единицы ударного ускорения в необходимом диапазоне амплитуд и длительностей используются различные варианты баллистических установок, как правило, содержащих два соударяющихся тела, на одном из которых крепятся эталонный и поверяемый преобразователи. К основным типам таких установок относятся:

- гравитационные;
- маятниковые;
- электромагнитные;
- пневматические.

Схема с пневматическим поршнем обладает рядом преимуществ: простотой конструкции, небольшими габаритами установки при широком диапазоне воспроизводимых ускорений, отсутствием электромагнитных полей, искажающих сигналы с преобразователей и некоторыми другими.

Опишем вкратце принцип работы такой схемы. Стальной молот разгоняется сжатым

воздухом по стволу вертикально вверх. За счет контроля давления воздуха и длительности его воздействия молот набирает необходимую ударную скорость для передачи ударного импульса наковальне, на которой расположены поверяемый (калибруемый) и эталонный акселерометры. Наковальня располагается в корпусе с демпфирующими механизмами и отделена от корпуса виброизолирующей проставкой. Молот после ударного взаимодействия с наковальней, избегая повторных соударений, плавно спускается по стволу в начальную позицию. Для растяжения длительности ударного импульса на контактный торец наковальни устанавливаются демпфирующие прокладки из различных материалов и различных толщин. Исследование влияния толщин демпфирующих прокладок, например из войлока, на длительность ударного импульса приведено в [3].

Аналогом является ударная установка SE-201 (производитель SPEKTRA⁵) для вторичного метода калибровки акселерометров: далее приведены ее внешний вид (рис. 1) и основные характеристики (табл. 1). Установка имеет перспективы применения в первичной калибровке преобразователей ускорения [4].

Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2018 года № 2772.

⁵ SPEKTRA. URL: <https://www.spektra-dresden.com/> (Accessed 15 July 2025).



Фотография заимствована / The photograph is reproduced**

Рис. 1. Вид установки SE-201 компании SPEKTRA

Fig. 1. Appearance of the SPEKTRA SE-201 installation

* SPEKTRA. URL: <https://www.spektra-dresden.com/> (Accessed 15 July 2025).

Таблица 1. Технические характеристики установки SE-201 компании SPEKTRA
Table 1. Technical characteristics of the SPEKTRA SE-201 installation

Амплитуда удара	50...100 000 м/с ²
Длительность импульса	0,1...5 мс
Максимальная масса калибруемого преобразователя	80 г
Максимальное давление воздуха	6 бар

Таблица составлена автором / The table is prepared by the author

Разработка макета

Численное моделирование проведено с применением программного комплекса Ansys LS-DYNA. Для проектирования прототипа установки разработан и испытан макет на основе результатов численного моделирования динамической задачи соударения молота и наковальни для отработки необходимых режимов удара и верификации расчета. Вид конечно-элементных моделей представлен на рис. 2.

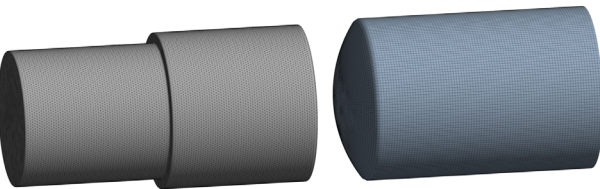


Рисунок подготовлен автором / The figure is prepared by the author

Рис. 2. Вид конечно-элементной модели наковальни (слева) и молота (справа)
Fig. 2. Appearance of the finite element model of the anvil (left) and hammer (right)

Конструктивные особенности. Масса для молота и наковальни выбрана по 1 кг, материал – сталь 40X, термообработанная до твердости (47,5–51,0) HRC. Контактные торцы молота и наковальни выполнены в конфигурации «сфера – плоскость» соответственно. Радиус сферической поверхности молота составил 40 мм. Геометрия наковальни определена с учетом условия формирования плоского фронта ударной волны из сферического при выходе на плоскость крепления преобразователей по соотношению $h > 2,5 \cdot r$, где h – длина и r – радиус стержня [5].

Расположение на одной плоскости эталонного и поверяемого преобразователя (рис. 3)

имеет преимущество перед соосным расположением⁶. Соосное расположение влечет необходимость использования составной наковальни (из нескольких деталей и крепежных изделий), что приводит (а) к искажениям геометрии фронта и амплитуды ударной волны, проходящей через сечения переменной толщины между преобразователями; (б) к дополнительным источникам вибраций.

Принцип действия. В макете ударной установки молот разгоняется по стволу сверху вниз за счет гравитации. Наковальня располагается в полимерной проставке, которая изолирует ее от металлических стенок корпуса. После удара, свободно пролетев около 6 мм, она упирается ступенью в тормозной механизм и плавно замедляется. На контактный торец наковальни клеятся демпфирующие прокладки для

⁶ГОСТ Р ИСО 16063–22–2012 Вибрация... Часть 22. Ударная калибровка сравнением с эталонным преобразователем.

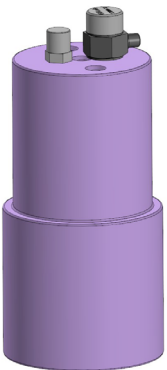


Рисунок подготовлен автором / The figure is prepared by the author

Рис. 3. Размещение преобразователей на наковальне

Fig. 3. Placement of converters on the anvil

растяжения длительности ударного импульса. Модель макета представлена на рис. 4.

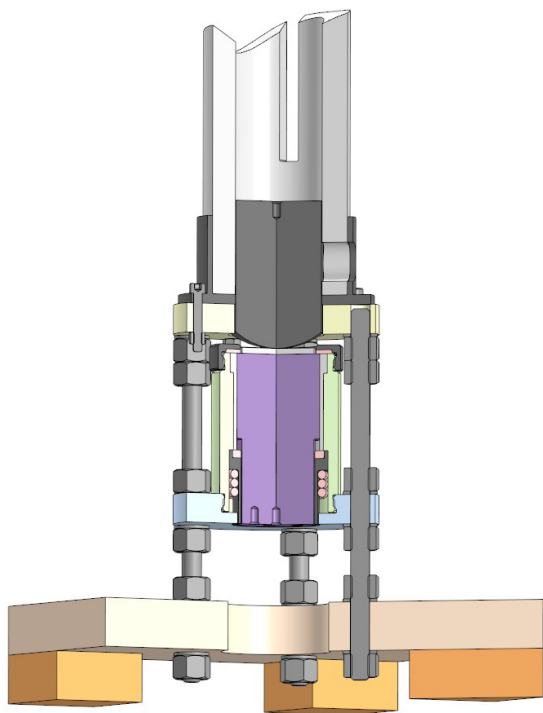


Рисунок подготовлен автором / The figure is prepared by the author

Рис. 4. Модель макета эталонной ударной установки

Fig. 4. Model of the mock-up of the reference shock installation

Испытания макета. Общий вид макета представлен на рис. 5. При испытаниях макета использовано оборудование:

- зарядовый кондиционирующий усилитель NEXUS2692-A (производитель B&K⁷);
- высокочастотный модуль сбора данных D002 (производитель «ГТЛАБ»⁸);
- программное обеспечение GTL (производитель «ГТЛАБ»);
- ударный акселерометр 1C301HA (производитель «ГТЛАБ»).

Далее представим общий вид акселерометра (рис. 6) и его характеристики (табл. 2).

Результаты и обсуждение

Результат численного расчета в программном пакете для конечно-элементного анализа Ansys LS-DYNA в постановке «сталь – сталь» показал пиковые ударные ускорения на поверхности крепления преобразователей, равные $115\,000\text{ м/с}^2$ при ударной скорости молота $5,5\text{ м/с}$ (рис. 7), что соответствует $1,54\text{ м}$ свободного падения. С учетом силы $F(H)$ сопротивления воздуха, рассчитанной по формуле

$$F = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2,$$

⁷ Bruel & Kjaer Sound and Vibration. URL: <https://bruel-kjaer-rus.ru/o-kompanii-brel-kjr/> (Accessed 15 July 2025).

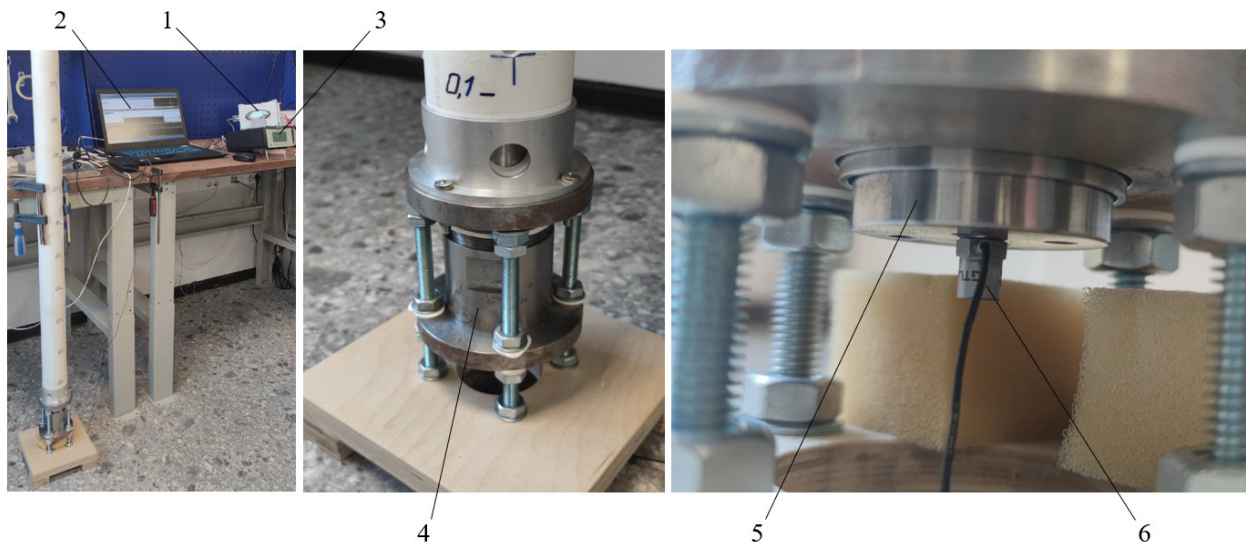
⁸ ООО «ГТЛАБ». URL: <https://gtlab.pro/> (дата обращения: 15.07.2025).

Таблица 2. Характеристики ударного акселерометра 1C301HA

Table 2. Characteristics of the 1C301HA impact accelerometer

Коэффициент преобразования ($\pm 30\%$)	0,0025 пКл/(м/с ²)
Относительный коэффициент поперечного преобразования	< 5 %
Максимальное значение амплитуды измеряемого ускорения	$\pm 1\,000\,000\text{ м/с}^2$
Максимальный удар (пиковое значение)	$\pm 1\,500\,000\text{ м/с}^2$
Диапазон рабочих температур	–60 ... +200 °C
Диапазон рабочих частот (неравномерность АЧХ $\pm 1\text{ дБ}$)	20 ... 50 000 Гц
Собственная частота в закрепленном состоянии	> 150 кГц
Сопротивление изоляции в нормальных условиях	> 10 000 МОм
Материал корпуса	нержавеющая сталь
Масса (без кабеля)	2,6 г

Таблица составлена автором / The table is prepared by the author



Фотография выполнена авторами / The photograph is taken by the authors

Рис. 5. Макет ударной установки для калибровки преобразователей ускорения: 1 – высокочастотный модуль сбора данных D002; 2 – программное обеспечение GTL; 3 – зарядовый кондиционирующий усилитель NEXUS2692-A; 4 – корпус; 5 – наковальня; 6 – ударный акселерометр IC301HA

Fig. Shock installation mock-up for calibration of acceleration transducers: 1 – high-frequency data acquisition modul D002; 2 – GTL software; 3 – NEXUS2692-A charge conditioning amplifier; 4 – housing; 5 – anvil; 6 – IC301HA shock accelerometer



Фотография выполнена автором / The photograph is taken by the author

Рис. 6. Общий вид ударного акселерометра IC301HA

Fig. 6. General appearance of the IC301HA impact accelerometer

где C_d – безразмерный аэродинамический коэффициент лобового сопротивления ($\approx 0,42$); ρ – плотность воздуха (кг/м^3); A – площадь поперечного сечения молота (м^2); v – скорость молота (м/с); длина ствола в макете – 2 м.

При сбросе молота с максимальной высоты в постановке «сталь – сталь» зафиксирован импульс с пиковым ударным ускорением $125\,500 \text{ м/с}^2$ и длительностью 86,5 мкс (рис. 8).

После первых испытаний в постановке «сталь – сталь» на контактных торцах молота и наковальни образовались сферические площадки пластических деформаций. При достижении необходимой площади контакта эквивалентные напряжения при максимальной амплитуде ударного воздействия оказываются ниже уровня динамического предела текучести термообработанной стали 40X и рост площадки прекращается. Для обеспечения стабильности и повторяемости воспроизведения ударных импульсов было произведено несколько десятков сбросов молота с максимальной высоты до прекращения роста площадки. Диаметр установившейся контактной площадки составил 12 мм.

В следующих испытаниях молот сбрасывался с различных высот, при этом использовались демпфирующие прокладки различных толщин и из различных материалов (текстолит, паронит, силикон). В результате испытаний макета ударной установки получены зависимости пиковых ударных ускорений и длительностей

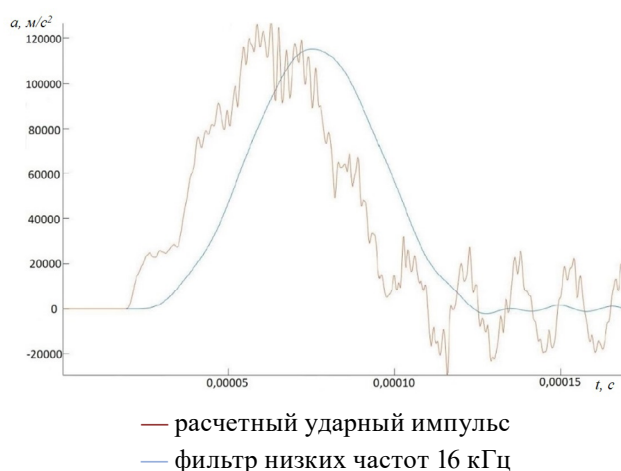


Рисунок подготовлен автором по собственным данным /
The figure is prepared by the author using their own data

Рис. 7. Результат численного моделирования конечно-элементной модели Ansys LS-DYNA (сталь – сталь; ударная скорость 5,5 м/с)

Fig. 7. Result of numerical simulation using the finite element model in Ansys LS-DYNA (steel-steel; impact velocity 5.5 m/s)

импульсов от высоты сброса молота и толщины и материала демпфирующих прокладок (табл. 3). При обработке сигналов применялся фильтр низких частот 16 кГц для выделения информативного воздействия в форме полусинуса.

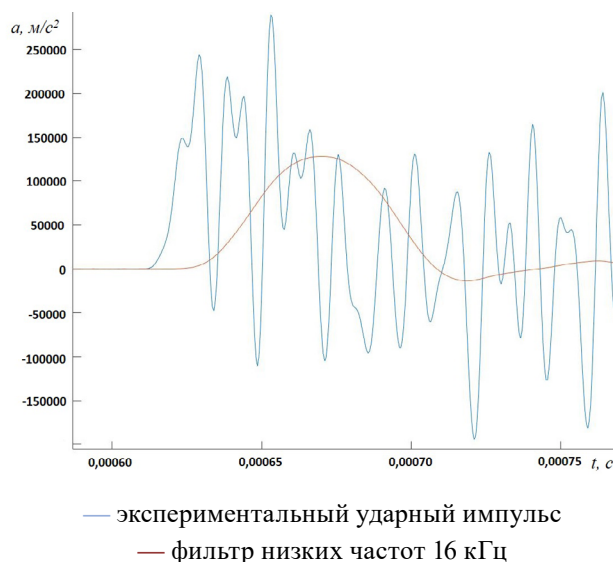


Рисунок подготовлен автором по собственным данным /
The figure is prepared by the author using their own data

Рис. 8. Импульс, зафиксированный при испытании макета ударной установки (сталь – сталь; высота сброса 2 м)

Fig. 8. Impulse recorded during testing of the shock installation mock-up (steel-steel; drop height 2 m)

Увеличение площади контакта молота и наковальни до 12 мм привело к снижению значения пикового ударного ускорения на 3,3 % и увеличению длительности импульса

Таблица 3. Зависимости пиковых ударных ускорений a и длительностей импульсов t от высоты сброса молота h и демпфирующих прокладок толщиной s из различных материалов

Table 3. Dependences of peak shock accelerations a and pulse durations t on the drop height h of the hammer and damping pads of thickness s made of various materials

	сталь – сталь		сталь – текстолит ($s=1$ мм)		сталь – паронит ($s=2$ мм)		сталь – силикон ($s=3,5$ мм)	
h , м	a , м/с ²	t , мкс	a , м/с ²	t , мкс	a , м/с ²	t , мкс	a , м/с ²	t , мкс
0,1	20 742	127	13 521	212	5 555	327	873	1 740
0,2	33 490	120	23 478	177	10 553	278	1 671	1 560
0,3	42 118	118	31 230	167	14 652	251	2 448	1 350
0,4	49 944	117	38 980	152	19 102	226	3 241	1 140
0,5	56 835	117	44 273	147	23 908	213	3 845	1 010
0,6	62 563	115	49 236	145	27 939	193	4 296	986
0,7	68 947	114	54 991	144	31 225	189	4 629	918

Окончание табл. 3

End of Table 3

	сталь – сталь		сталь – текстолит ($s=1$ мм)		сталь – паронит ($s=2$ мм)		сталь – силикон ($s=3,5$ мм)	
h , м	a , м/с ²	t , мкс	a , м/с ²	t , мкс	a , м/с ²	t , мкс	a , м/с ²	t , мкс
0,8	74 038	114	59 050	142	34 364	186	4 769	897
0,9	78 433	111	64 614	140	36 454	184	4 868	885
1,0	83 394	111	68 717	136	38 331	182	4 919	867
1,1	87 266	110	73 678	135	40 405	181	5 126	851
1,2	92 083	110	77 818	131	42 391	178	5 322	830
1,3	96 838	109	80 146	128	44 112	176	5 757	788
1,4	100 030	108	83 775	127	45 239	172	6 023	771
1,5	104 749	110	86 391	126	46 890	170	6 381	759
1,6	108 192	106	89 003	126	49 105	167	6 522	751
1,7	112 570	108	91 892	125	51 223	165	6 862	744
1,8	115 967	109	93 887	123	52 698	163	7 287	732
1,9	118 950	107	95 501	120	54 002	160	7 868	715
2,0	121 384	106	97 382	118	55 520	158	8 019	699

Таблица составлена автором по собственным данным / The table is prepared by the author using their own data

на 22,5 % по сравнению с первыми испытаниями (без пластических деформаций) в постановке «сталь – сталь» при высоте сброса 2 м.

Заключение

Разработаны модели молота и наковальни для численного моделирования динамической задачи. Разработан, изготовлен и испытан макет эталонной ударной установки. Получены зависимости пиковых ударных ускорений и длительностей импульсов от высоты сброса молота и материала и толщин демпфирующих прокладок. Подтверждены результаты численного моделирования: получены необходимые режимы ударных импульсов, соответствующие рабочему эталону 2-го разряда (пиковые значения ударных ускорений в диапазоне до 10^5 м/с² при длительностях импульсов от 0,1 мс).

Будущие исследования будут посвящены оптимизации моделей молота и наковальни. Уменьшение масс и применение материала с более высоким пределом текучести

необходимо для обеспечения минимальной площади контакта. Параллельно будет исследоваться влияние геометрии и массы наковальни на ее собственные частоты колебаний, что также влияет на погрешность при регистрации ударных ускорений.

С учетом оптимизированных моделей молота и наковальни будет разработан и исследован прототип эталонной ударной установки. Кроме того, планируется внедрение лазерного интерферометра в эталонную установку для обеспечения калибровки и поверки абсолютным методом⁹.

Благодарности: Автор выражает благодарность и глубокую признательность своему

⁹ ГОСТ ISO 16063–11–2013 Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 11. Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии. Переоформление ГОСТ Р (ГОСТ Р ИСО 16063–11–2009, ГОСТ ИСО 5347–1–96). Взамен ГОСТ Р ИСО 16063–11–2009, ГОСТ ИСО 5347–1–96.

научному руководителю – доктору технических наук Евгению Петровичу Кривцову за советы и ценные замечания при подготовке статьи.

Acknowledgements: The author expresses gratitude and deep appreciation to his scientific supervisor, Dr. Sci. (Eng.) Evgeny P. Krivtsov, for his advice and valuable comments during the preparation of the article.

Вклад автора: Автор подтверждает единоличную ответственность за следующее: концепцию и дизайн исследования, сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Author contributions: The author confirms sole responsibility for the following: study concept and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

Конфликт интересов: Автор подтверждает, что у него нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье. Работа выполнена в рамках диссертационного исследования «Эталонная установка для воспроизведения и передачи единицы ускорения при ударном движении в диапазоне до 100 000 м/с²» под научным руководством д-ра техн. наук Е. П. Кривцова.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest. The work was carried out within the framework of the dissertation research «Methods and means of metrological support for verification and calibration of shock acceleration transducers» under the scientific supervision of Dr. Sci. (Eng.) E. P. Krivtsov.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пеллинец В. С. Измерение ударных ускорений. М. : Издательство стандартов, 1975. 287 с.
2. Прокурин А. В. Воспроизведение ударных ускорений в лабораторных условиях. Снежинск : РФЯЦ–ВНИИТФ, 2017. 188 с.
3. Quasi-static calibration method of a high-g accelerometer / Y. Wang [et al.] // *Sensors*. 2017. Vol. 17 (2). P. 409. <https://doi.org/10.3390/s17020409>
4. Begoff P., Mende M. Primary calibration of shock transducers on a hammer-anvil shock exciter up to 100 000 m/s² // *Measurement: Sensors*. 2025. Vol. 38. P. 101743. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101743>.
5. Чернявский Д. И., Чернявская Д. Д. Изменение фронта ударной волны от сферы к плоскости в стержневых системах машин ударного действия // *Омский научный вестник*. 2008. № 4 (73). С. 70–72.

REFERENCES

1. Pellinets VS. Measurement of shock accelerations. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1975. 287 p. (In Russ.).
2. Proskurin AV. Reproduction of shock accelerations in laboratory conditions. Snezhinsk: RFNC–VNIITF; 2017. 188 p. (In Russ.).
3. Wang Y, Fan J, Zu J, Xu P. Quasi-static calibration method of a high-g accelerometer. *Sensors*. 2017;17(2):409. <https://doi.org/10.3390/s17020409>
4. Begoff P, Mende M. Primary calibration of shock transducers on a hammer-anvil shock exciter up to 100 000 m/s². *Measurement: Sensors*. 2025;38:101743. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101743>.
5. Chernyavsky DI, Chernyavskaya DD. Change of the shock wave front from sphere to plane in rod systems of impact machines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2008;4(73):70–72. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Степанов Лев Владимирович – ведущий инженер-исследователь, ООО «ГТЛАБ»
607189, Нижегородская обл., г. Саров, ул. Шверника, 176
mail: lev@gtl.ru
<https://orcid.org/0009-0005-3742-8419>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lev V. Stepanov – Leading Research Engineer, GTLAB LLC
17B Shvernika St., Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607189, Russia
mail: lev@gtl.ru
<https://orcid.org/0009-0005-3742-8419>