

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 006.057.2:620.178.746.2

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-64-81>



Оценка неопределенности измерений работы удара маятниковых копров: сравнительный анализ методов и метрологическая экспертиза ГОСТ 9454–2025*

В. В. Толмачев , Ю. С. Ченцова 

УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Екатеринбург, Россия
 sertif@uniim.ru

Аннотация: Пересмотр стандартов на методы определения механических свойств металлов выявил острую необходимость стандартизации подходов к оценке неопределенности, обеспечивающих метрологическую прослеживаемость к государственным первичным эталонам.

Цель работы – систематизация методов оценки неопределенности измерений работы удара и выявление доминирующих факторов, влияющих на точность.

На основе классической концепции, описанной в ГОСТ 34100.3–2017 (ISO/IEC Guide 98-3:2008) «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения», проведены математический и практический анализ и сравнение трех подходов.

Установлено: метод для копров, соответствующих ГОСТ 10708–82 «Копры маятниковые», – наиболее простой; метод калибровки по ISO 148-2:2016 «Metallic materials – Charpy pendulum impact test Part 2: Verification of testing machines» – наиболее прецизионный. Показано, что применение стандартных образцов утвержденного типа, в отличие от других методов, обеспечивает прослеживаемость к опорному значению и автоматически учитывает вклады от износа ножа и опор. В ходе исследования выявлены метрологические противоречия в новой версии ГОСТ 9454–2025 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах»: доказано, что предложенные в нем алгоритмы исключают потерю энергии на качание и потенциальную энергию маятника, что приводит к опасному занижению оценки неопределенности.

Вычисленные бюджеты неопределенности показали, что на практике доминирующими источниками являются разрешение шкалы и несовпадение центров удара. Полученные алгоритмы планируется включить в проект межгосударственного стандарта на поверку маятниковых копров и использовать при разработке новых стандартных образцов утвержденного типа.

Ключевые слова: ударный изгиб, испытания на ударный изгиб, оценивание неопределенности, оценка неопределенности, работа удара, механические свойства металлов

Для цитирования: Толмачев В. В., Ченцова Ю. С. Оценка неопределенности измерений работы удара маятниковых копров: сравнительный анализ методов и метрологическая экспертиза ГОСТ 9454–2025 // Эталоны. Стандартные образцы. 2026. Т. 22, № 1. С. 64–81. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-64-81>

* Публикация подготовлена на основе доклада, представленного на Международной научно-технической конференции «Механометрика 2025. Механические измерения и испытания», которая прошла 1–3 июля 2025 года во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии имени Д. И. Менделеева. Статья была принята к публикации после доработки рукописи и прохождения процедуры рецензирования.


Статья поступила в редакцию 01.12.2025; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 25.03.2026.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

Evaluation of Measurement Uncertainty for the Absorbed Energy of Pendulum Impact Testing Machines: a Comparative Analysis of Methods and Metrological Examination of GOST 9454–2025

Vladimir V. Tolmachev , Iuliia S. Chentsova 

UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Yekaterinburg, Russia
 sertif@uniim.ru

Abstract: The revision of standards for methods of determining the mechanical properties of metals has revealed an urgent need for the standardization of approaches to uncertainty evaluation that ensure metrological traceability to state primary standards.

The aim of this work is to systematize the methods for evaluating the measurement uncertainty of absorbed energy and to identify the dominant factors affecting accuracy.

Based on the classical concept described in GOST 34100.3–2017 (ISO/IEC Guide 98-3:2008) “Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement”, a mathematical and practical comparative analysis of three approaches was carried out.

It has been established that the method for impact testing machines compliant with GOST 10708–82 “Pendulum impact testing machines” is the simplest; the calibration method according to ISO 148-2:2016 “Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 2: Verification of testing machines” is the most accurate. It is shown that the use of certified reference materials, unlike other methods, ensures traceability to a reference value and automatically accounts for contributions from striking edge and support wear. During the study, metrological contradictions were identified in the new version of GOST 9454–2025 “Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature”: it has been proven that the algorithms proposed exclude friction loss and the initial potential energy of the pendulum, which leads to a dangerous underestimation of the uncertainty evaluation.

The calculated uncertainty budgets showed that, in practice, the dominant sources are scale resolution and misalignment of the centers of percussion. The obtained algorithms are planned to be included in the draft national standard for the verification of pendulum impact testing machines and to be used in the development of new certified reference materials.

Keywords: pendulum impact test, uncertainty evaluation, uncertainty value, absorbed energy, mechanical properties of metals

For citation: Tolmachev VV, Chentsova IuS. Evaluation of measurement uncertainty for the absorbed energy of pendulum impact testing machines: a comparative analysis of methods and metrological examination of GOST 9454–2025. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2026;22(1):64–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2026-22-1-64-81>

The article was submitted 01.12.2025; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 25.03.2026.

Введение

Анализ неопределенности измерений необходим для выявления основных источников несоответствий результатов измерений. Как правило, стандарты на продукцию содержат нормы характеристик материалов без учета неопределенности методик измерений. Чтобы минимизировать риск несоответствия продукции установленным требованиям, потребитель должен откорректировать результаты приемочных испытаний с учетом неопределенности измерений. По этой причине необходимо, чтобы оценки неопределенности, применяемые в испытательных лабораториях, являлись эффективными, проверенными на практике и стандартизованными.

Фундаментальное изложение подходов к анализу неопределенности измерений для испытаний на ударный изгиб содержит Руководство NIST [1], описывающее оценку по принципам Руководства по выражению неопределенности (GUM) с учетом стандартов ISO 148-2¹ и ASTM E23². В нем предложен алгоритм оценки систематической погрешности копра (bias) с использованием сертифицированных стандартных образцов, глубоко проработан уникальный метод трансформации погрешности измерения температуры в неопределенность поглощенной энергии для зоны вязко-хрупкого перехода. Предложенный авторами подход предполагает, что влияние инструментальных параметров сводится к минимуму при настройке, поэтому в рутинных расчетах эти источники неопределенности рекомендуются игнорировать.

Достоинством работы [2] является практическое применение статистического контроля качества. В работе дисперсионный

¹ ISO 148-2:2016 Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 2: Verification of testing machines.

² ASTM E23 Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.

анализ (ANOVA) и критерий нормализованной ошибки используются для строгого доказательства отсутствия значимого влияния оператора на результат. Однако модель не дает полного бюджета неопределенности поглощенной энергии, а эксперимент базируется на минимальной выборке (2 оператора по 3 образца), что ограничивает статистическую достоверность.

В работе [3] используется структуризация источников неопределенности (человек, машина, материал) с помощью диаграммы Исикавы. Приведен практический расчет для строительной стали S275JR, где влияние оператора корректно оценивается через дисперсию повторяемости в серии испытаний. Ограничением работы является сильное упрощение оценки вклада измерительной системы. Неопределенность вклада от копра маятникового сводится лишь к разрешающей способности шкалы и общей погрешности из сертификата калибровки без физического моделирования работы маятника.

К достоинствам статьи [4] относится высокая детализация инструментальной неопределенности калибровки копра. Составлены полные математические уравнения для оценки потерь энергии на сопротивление воздуха, трение в подшипниках, увлечение стрелки индикатора, а также учтены погрешности измерителей длины и массы. Однако модель не охватывает калибровку с использованием сертифицированных стандартных образцов, хотя именно неоднородность образцов и общая систематическая погрешность копра маятникового традиционно вносят доминирующий вклад в неопределенность результатов.

Автор работы [5] провел масштабный анализ в широком диапазоне работы удара (от 22 до 172 Дж), что позволяет оценить поведение неопределенности на разных участках шкалы. Дана четкая рекомендация по улучшению качества измерений – выбор стандартных образцов с минимальной собственной

неопределенностью. Предложенная модель сосредоточена преимущественно на калибровке копра с использованием стандартных образцов. Физические и геометрические параметры самого средства измерений (углы, трение, масса) не анализируются детально, а их влияние сводится к базовому разрешению шкалы, которое признается незначительным (около 1%).

Работа [6] характеризуется практической реализацией классического подхода GUM с детальной оценкой операционных факторов. Авторы учли не только приборные ошибки, но и процедурные огрехи, такие как смещение образца при установке (1–2 мм от центра) и влияние скорости удара маятника – это ценно для понимания роли человеческого фактора и настройки оборудования. Однако исследование носит узкий характер: испытания проводились только на одном материале (алюминиевый сплав) и на одном уровне поглощенной энергии (около 24 Дж). Кроме того, статистическая оценка по типу А базируется на минимальной выборке всего из 5 испытаний, что снижает достоверность оценки дисперсии.

К достоинствам статьи [7] можно отнести глубокую физико-математическую проработку уравнения измерений в соответствии с ISO 21748³. Авторами учтены прямые измеряемые величины (вес маятника, длина подвеса, углы). Главное достоинство – интеграция метрологической прослеживаемости к конкретному стандартному образцу утвержденного типа (ГСО), что критически важно для обеспечения сопоставимости результатов между разными лабораториями и решения арбитражных споров. Недостатком является избыточная сложность математической модели прямых измерений: авторы сами приходят к выводу, что вклад от инструментальных составляющих копра (веса маятника, длины подвеса, углов) в итоге оказывается метрологически незначительным по сравнению со вкладом от неоднородности стандартного образца. Выводы сделаны на основе калибровки лишь одного конкретного экземпляра маятникового копра.

Все рассмотренные работы концептуально и методологически соответствуют

³ ISO 21748-2017 Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty evaluation.

классической концепции GUM, который в Российской Федерации оформлен как ГОСТ 34100.3–2017⁴. Базовые принципы GUM (разделение оценок на тип А и тип В, расчет суммарной стандартной неопределенности, вычисление расширенной неопределенности с использованием коэффициента охвата) применяются во всех исследованиях.

Однако глубину и строгость математического моделирования в рамках GUM можно разделить на три уровня.

1 уровень. Модельный подход (строгое следование фундаментальному алгоритму GUM). Наиболее полно классической концепции ГОСТ 34100.3–2017 соответствуют работы [4] и [7]. В этих исследованиях:

- сформировано полное физическое уравнение измерений, связывающее измеряемую величину (работу удара) с входными величинами (весом маятника, длиной маятника, углами взлета и подъема);

- оценки неопределенности вычисляются с применением математического аппарата частных производных (коэффициентов чувствительности) для каждого компонента;

- корректно рассчитывается эффективное число степеней свободы по формуле Уэлча – Саттертуэйта для выбора точного коэффициента охвата (t-критерия Стьюдента).

2 уровень. Эмпирические модели (практическая реализация GUM через стандартизованные подходы). Руководство [1], публикации [5, 6] применяют принципы GUM, но не через дифференцирование физического уравнения копра, а через макрокомпоненты процесса.

Авторы используют концепцию GUM в связи с профильными стандартами (ISO 148-1, ISO 21748), где неопределенность оценивается сверху вниз – через дисперсию сходимости результатов, систематическое смещение (bias) и неопределенность стандартного образца. Данный подход полностью легитимен с точки зрения GUM, так как использует закон распространения неопределенностей (метод «корня из суммы квадратов») для независимых вкладов. Формула Уэлча – Саттертуэйта в этих работах также применяется безусловно.

⁴ ГОСТ 34100.3–2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

3 уровень. Упрощенная реализация принципов GUM. В работе [4] принципы GUM (типы А и В, прямоугольные и нормальные распределения, расширенная неопределенность) декларируются, однако их реализация носит упрощенный характер:

- источники неопределенности выявляются эмпирически – через диаграмму Исикавы;
- оценка по типу В для инструментальных погрешностей базируется на допущениях (разрешении шкалы, погрешности калибровки), которые просто суммируются без построения строгой математической связи с конечным результатом (в джоулях) через коэффициенты чувствительности.

В то время как международная практика калибровки копров с помощью стандартных образцов регламентирована стандартом ISO 148-3:2016⁵, а специфика испытательных лабораторий описана в руководствах Международной организации по аккредитации лабораторий ILAC, вопросы интеграции этих подходов с классической концепцией GUM в новых межгосударственных стандартах (таких как ГОСТ 9454–2025⁶) остаются недостаточно проработанными и содержат методологические противоречия.

Цель исследования:

- 1) провести сравнительный анализ и систематизацию подходов к оценке неопределенности измерений механической характеристики металлов при испытании на ударный изгиб (работы удара);
- 2) описать условия, влияющие на точность измерений.

В задачи исследования входит:

- проверить метод оценки неопределенности измерения работы удара без использования ГСО;
- проверить метод оценки неопределенности измерения работы удара с применением ГСО;
- провести критический метрологический анализ алгоритмов оценки неопределенности,

⁵ ISO 148-3:2016 Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 3: Preparation and characterization of Charpy V-notch test pieces for indirect verification of pendulum impact machines.

⁶ ГОСТ 9454–2025 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах.

заложенных в новой версии стандарта ГОСТ 9454–2025;

- определить факторы, влияющие на точность измерений характеристик механических свойств металлов при испытании на ударный изгиб.

В основу исследования положена следующая научная гипотеза: методы оценки неопределенности, заложенные в современных стандартах на испытания металлов (в частности, в новой версии ГОСТ 9454–2025), вступают в противоречие с классической концепцией анализа уравнений измерений, что приводит к критическому занижению бюджетов неопределенности из-за неучета доминирующих физических факторов процесса. Притом предполагается, что концептуальным решением проблемы обеспечения прослеживаемости и полноты учета инструментальных вкладов (включая износ геометрии копра) является переход от расчетных методов к методам, основанным на применении ГСО.

Материалы и методы

Методология

Материал для исследования:

- межгосударственный стандарт технических условий на копры маятниковые ГОСТ 10708–82⁷;
- международный стандарт методов верификации копров маятниковых ISO 148-2:2016;
- проект стандарта на поверку копров маятниковых [8];
- новая версия стандарта испытания на ударный изгиб ГОСТ 9454–2025.

Рассматриваемые методы отражают три главные парадигмы, в настоящее время применяемые в лабораториях:

- подтверждение соответствия нормам (поверка);
- детальное изучение метрологических характеристик (калибровка);
- контроль точности с передачей единицы величины (применение ГСО).

Основой для сравнения стали стандартизованные общие правила оценивания и выражения неопределенности измерения ГОСТ 34100.3–2017.

⁷ ГОСТ 10708–82 Копры маятниковые. Технические условия.

Процедуры определения и объединения компонентов неопределенности для оценки фактического процесса измерений опирались на рекомендации ГОСТ Р ИСО 22514-7-2024⁸, разработанные для простых процессов измерений на основе ГОСТ 34100.3-2017.

Использованный стандартизованный подход, основанный на анализе уравнения изменения, распространяется на проведение испытаний в соответствии с Государственной системой обеспечения единства измерений для обеспечения прослеживаемости к государственным первичным эталонам ГОСТ 34100.3-2017.

Алгоритмы и расчеты проверялись с использованием следующего оборудования:

- копер маятниковый серии РКР (модель РКР450, ZWICK GmbH Co. KG) с номинальной потенциальной энергией 300 Дж;
- динамометр электронный ДМУ-1/1-0,5МГ4 ($\delta = \pm 0,12\%$);
- оптический квадрант КО-2 (погрешность $\pm 5''$);
- секундомер СОСпр-26-2-010;
- ГСО 11934-2022 (аттестованное значение 25,8 Дж, погрешность $\pm 1,6$ Дж).

Метод оценивания неопределенности измерения работы удара на маятниковом копре, соответствующий стандарту технических условий ГОСТ 10708-82. Если проверка геометрических и механических характеристик копра на соответствие ГОСТ 10708-82 осуществлена в полном объеме, то для оценки неопределенности измерения работы удара маятниковым копром можно использовать уравнение измерения

$$K = E_{\alpha} - E_{\beta} + \Theta(K_s) + \Theta(H), \quad (1)$$

где K – результат измерения работы удара на маятниковом копре; E_{α} – запас потенциальной энергии, Дж; E_{β} – энергия маятника для измеренного угла взлета β , Дж; $\Theta(K_s)$ – составляющая смещения показаний работы удара для аналогового или цифрового отсчетного устройства копра, Дж; $\Theta(H)$ – составляющая смещения показаний работы удара за счет потерь энергии при свободном качании маятника за половину полного колебания, Дж.

⁸ ГОСТ Р ИСО 22514-7-2024 Статистические методы. Управление процессами. Часть 7. Воспроизводимость процессов измерений.

Предполагая, что все величины независимы, суммарная стандартная неопределенность работы удара может быть оценена по формуле

$$u_c(K) = \sqrt{u^2(E_{\alpha}) + u^2(E_{\beta}) + u^2(K_s) + u^2(H)}, \quad (2)$$

где $u(E_{\alpha})$ – стандартная неопределенность потенциальной энергии маятника, Дж; $u(E_{\beta})$ – стандартная неопределенность энергии маятника для измеренного угла взлета β , Дж; $u(K_s)$ – стандартная неопределенность показаний работы удара для аналогового или цифрового отсчетного устройства копра, Дж; $u(H)$ – стандартная неопределенность показаний работы удара за счет потерь энергии при свободном качании маятника за половину полного колебания, Дж.

Метод оценивания неопределенности измерения работы удара на маятниковом копре без априорной информации о соответствии стандарту технических условий ГОСТ 10708-82. Калибровка маятникового копра по методике ISO 148-2:2016 состоит из серии проверок геометрических и механических характеристик. Схема измеряемых геометрических величин приведена на рис. 1. Отклонение от номинальных значений этих характеристик вносит вклад в неопределенность результата измерения работы удара относительно истинного значения измеряемой величины. Для оценки неопределенности измерения работы удара маятниковым копром стандарт ISO 148-2:2016 предлагает использовать уравнение измерения

$$K = A_1 + \Theta(R) + \Theta(A) + \Theta(C) + \Theta(E) + \Theta(V) + \Theta(L-l) + \Theta(H) + \Theta(S) + \Theta(B), \quad (3)$$

где K – результат измерения работы удара на маятниковом копре; A_1 – неизвестное опорное (истинное) значение измеряемой величины; $\Theta(R)$ – составляющая смещения работы удара за счет вариации кривизны радиуса ножа маятника; $\Theta(E)$ – составляющая смещения работы удара за счет вариации геометрии упоров и опор; $\Theta(C)$ – составляющая смещения работы удара за счет вариации положения надреза образца при испытании на ударный изгиб; $\Theta(A)$ – составляющая смещения за счет погрешности вычисления работы удара по измеренным углам; $\Theta(V)$ – составляющая смещения работы удара за счет вариации скорости движения маятника в момент удара;

$\Theta(L-l)$ – составляющая смещения работы удара за счет несовпадения расстояния L от оси качания маятника до середины образца и расстояния l от оси качания маятника до центра удара; $\Theta(H)$ – составляющая смещения работы удара за счет потерь на трение; $\Theta(S)$ – составляющая смещения за счет погрешности показаний работы удара на аналоговой или цифровой шкале; $\Theta(B)$ – составляющая смещения работы удара за счет вариации геометрии испытываемого образца.

Предполагая, что все величины независимы, суммарная стандартная неопределенность работы удара может быть оценена по формуле

$$u_c(K) = \sqrt{u^2(R) + u^2(A) + u^2(C) + u^2(E) + u^2(V) + u^2(L-l) + u^2(H) + u^2(S) + u^2(B)}. \quad (4)$$

Влияние факторов (R, B) на поглощенную энергию считается незначительным:

– если они находятся в пределах допусков, подтвержденных при калибровке маятникового копра;

– если образцы для испытания на ударный изгиб соответствуют ГОСТ 9454–2025, ГОСТ Р ИСО 148-1-2013⁹.

Скорость движения маятника в момент удара является типичным параметром копра, ее значение рассчитывается из длины маятника и угла взлета. Поскольку относительная неопределенность измерений величин для расчета скорости удара мала, расчета неопределенности – составляющей смещения работы удара за счет вариации скорости движения маятника в момент удара – не требуется согласно методике ISO 148-2:2016.

Диаграмма Исикавы (рис. 2) приведена для последующего анализа основных источников неопределенности измерений работы удара.

С оценкой составляющей смещения работы удара за счет вариации положения надреза образца во время испытания на ударный изгиб $\Theta(C)$ можно ознакомиться в работах [1, 6].
Оценка составляющей смещения работы удара

⁹ ГОСТ Р ИСО 148–1–2013 Материалы металлические. Испытание на ударный изгиб на маятниковом копре по Шарпи. Часть 1: Метод испытания.

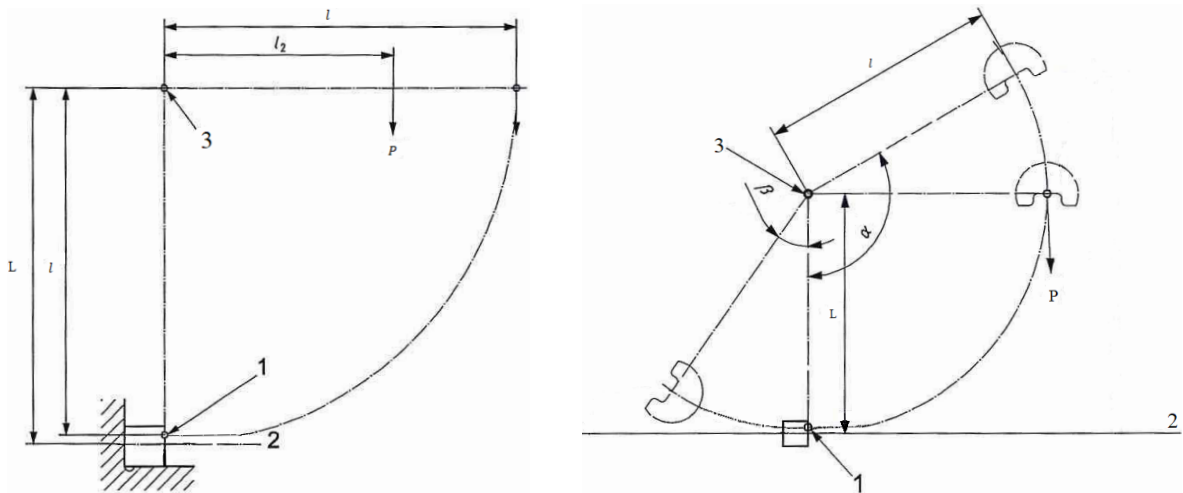


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Схема измеряемых геометрических величин работы удара:

1 – центр удара; 2 – середина образца; 3 – ось качания; P – вес маятника, Н; β – угол подъема маятника, градус; α – угол подъема маятника, градус; l_2 – расстояние от точки опирания кромки ножа на призму, м; l – расстояние между центром удара и осью качания (приведенная длина маятника); L – расстояние между осью качания и серединой образца

Fig. 1. Diagram of measured geometrical quantities for absorbed energy:

1 – center of percussion; 2 – centre of test piece; 3 – axis of rotation; P – weight of the pendulum, N; β – angle of rise, degrees; α – angle of fall, degrees; l_2 – distance to the point of application of the force P from the axis of rotation, m; l – distance between the center of percussion and the axis of rotation; L – distance between the axis of rotation and centre of test piece

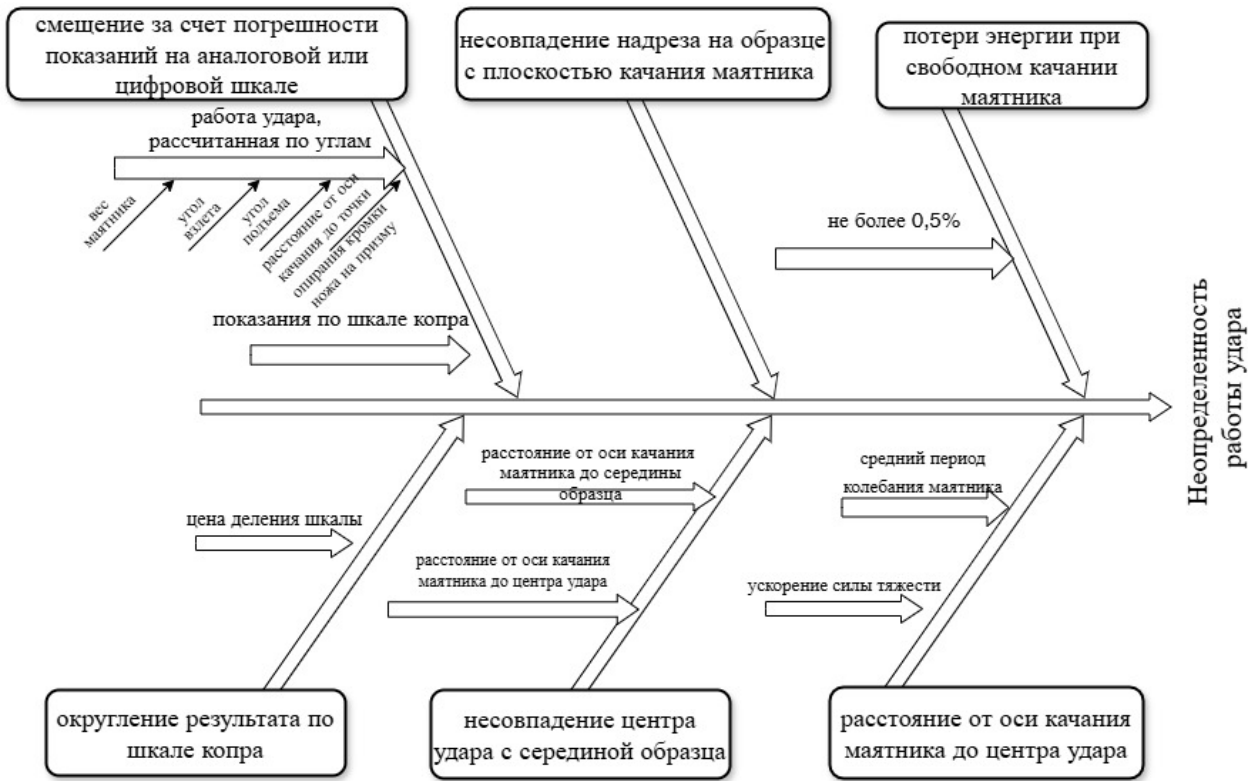


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Анализ источников неопределенности измерений работы удара на основе диаграммы Исикавы

Fig. 2. Analysis of uncertainty sources in absorbed energy measurements based on the Ishikawa diagram

за счет вариации геометрии упоров и опор $\theta(E)$ приведена в работе [6].

Маятник копра должен быть сконструирован таким образом, чтобы разность между расстоянием L от оси качания до середины образца и расстоянием от оси качания маятника до центра удара находилась в интервале от $0,99L$ до L . Для определения используют уравнение измерения

$$l = \frac{g \cdot t^2}{4 \cdot \pi^2}, \quad (5)$$

где l – расстояние между центром удара и осью качания (приведенная длина маятника), м; t^2 – средний период колебания маятника по трем измерениям при 100, 50, 25 колебаниях.

Если измерение времени T для 50 качаний выполняется с помощью средств измерения времени с погрешностью измерения $\Delta(T)$, то неопределенность l может быть рассчитана по формуле

$$u(l) = \frac{2g \cdot T}{4 \cdot \pi^2 \cdot 50^2}. \quad (6)$$

Так как расстояние от оси качания до середины образца измерить напрямую невозможно, неопределенность определяют как минимум тремя измерениями L_1, L_2, L_3 . Пусть штангенциркуль для измерения малых длин L_1, L_3 имеет погрешность $\Delta(L_1) = \Delta(L_3) = \pm 0,03$ мм, штангенциркуль для измерения большей длины имеет погрешность $\Delta(L_2) = \pm 0,1$ мм, тогда неопределенность измерения длины маятника:

$$u(L) = \sqrt{(\Delta^2(L_1) + \Delta^2(L_2) + \Delta^2(L_3)) / 3}. \quad (7)$$

Неопределенность отклонения положения центра удара от положения середины образца $(L-l)$ рассчитывается с учетом приведенных выше неопределенностей измерений согласно ГОСТ Р ИСО 22514–7–2024 следующим образом:

$$u(L-l) = \sqrt{u^2(L) + u^2(l) + (L-l)^2 / 3}. \quad (8)$$

Для вычисления работы удара A по измеренным углам используется следующее уравнение измерений:

$$A = P \cdot l_2 \cdot (\cos\beta - \cos\alpha), \quad (9)$$

где P – вес маятника, Н; l_2 – расстояние от оси качания до точки опирания кромки ножа на призму, м; β – угол взлета маятника, градус; α – угол подъема маятника, градус.

Для суммарной стандартной неопределенности работы удара, вычисленной по измеренным углам, используют формулу

$$u(A) = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{\partial A}{\partial l_2}\right)^2 u^2(l_2) + \left(\frac{\partial A}{\partial \beta}\right)^2 u^2(\beta) + \left(\frac{\partial A}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha)}, \quad (10)$$

где коэффициенты чувствительности равны:

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha} = P \cdot l_2 \cdot \sin\alpha,$$

$$\frac{\partial A}{\partial \beta} = -P \cdot l_2 \cdot \sin\beta,$$

$$\frac{\partial A}{\partial P} = l_2 \cdot (\cos\beta - \cos\alpha),$$

$$\frac{\partial A}{\partial l_2} = P \cdot (\cos\beta - \cos\alpha).$$

Суммарную стандартную неопределенность измерения веса маятника динамометром вычисляют по формуле

$$u(P) = \frac{\delta}{\sqrt{3}} P,$$

где δ предел допускаемой относительной погрешности измерений силы, %.

$$u(l_2) = \frac{\Delta l_2}{\sqrt{3}},$$

где Δl_2 – погрешность определения расстояния от оси качания до точки опирания кромки ножа на призму.

Систематическая погрешность отсчетного устройства S представляет собой разность между показаниями работы удара на аналоговой шкале копра или цифровым значением, отображаемым, например, на персональном компьютере копра, и рассчитанным значением работы удара. Систематическая погрешность описывается формулой

$$S = K_s - A, \quad (11)$$

где S – составляющая погрешности отсчетного устройства, остающаяся постоянной при

повторных измерениях работы удара; K_s – показание работы удара на аналоговой шкале копра или цифровое значение, отображаемое на персональном компьютере копра; A – значение работы удара, рассчитанное по измеренным углам.

Суммарная стандартная неопределенность, согласно ГОСТ Р ИСО 22514-7-2024:

$$u(S) = \sqrt{u^2(K_s) + u^2(A) + (K_s - A)^2 / 3}, \quad (12)$$

где

$$u(K_s) = \frac{a}{\sqrt{12}},$$

где a разрешение шкалы, наименьшая определяемая разность между двумя измеренными значениями.

Метод оценивания неопределенности измерения работы удара на маятниковом копре с использованием стандартных образцов утвержденного типа. Метод оценки неопределенности измерения работы удара, связанный с использованием ГСО, позволяет получить оценки характеристик качества измерений в виде показателя правильности измерений V и показателя прецизионности измерений u_v . Значения характеристик качества измерений требуются для расчета неопределенности результатов испытаний, выполняемых с помощью маятникового копра с использованием ГСО.

Основным результатом использования ГСО является оценка смещения (систематической погрешности) результата измерений работы удара:

$$B = \bar{K} - K_{\text{ГСО}}, \quad (13)$$

где \bar{K} – среднее арифметическое значений работы удара из пяти образцов, входящих в ГСО; $K_{\text{ГСО}}$ – аттестованное значение работы удара ГСО.

Стандартная неопределенность значения смещения (систематической погрешности) равна сумме стандартных неопределенностей двух членов в формуле (13).

Стандартная неопределенность аттестованного значения работы удара $u_{\text{ГСО}}$ рассчитывается на основе расширенной неопределенности $U_{\text{ГСО}}$, указанной в паспорте ГСО, путем деления $U_{\text{ГСО}}$ на соответствующий коэффициент охвата из паспорта ГСО.

Неопределенность, связанная с \bar{K} , рассчитывается по формуле

$$u(\bar{K}) = \frac{b}{\sqrt{5}}, \quad (14)$$

где b – оценка среднеквадратического отклонения.

Стандартную неопределенность показателя смещения (систематической погрешности) измерения работы удара оценивают по формуле

$$u(B) = \sqrt{\left(\frac{b}{\sqrt{5}}\right)^2 + u_{\text{ГСО}}^2}. \quad (15)$$

Для компенсации оцененного систематического эффекта можно использовать поправку к шкале работы удара. Однако из-за износа упоров и частей молота невозможно обеспечить стабильное значение поправки в период между двумя поверками. Поэтому измеренное значение смещения считают вкладом в суммарную неопределенность величины работы удара для маятникового-копра, поверенного с использованием ГСО:

$$u_c = \sqrt{B^2/3 + u(B)^2}. \quad (16)$$

В случае корректировки измеренных значений работы удара смещение, равное B , вычитают из результата измерения. Обязательным условием для корректировки является достоверность и стабильность значения смещения. Достоверность знаний о стабильности поправки к шкале работы удара конкретного маятникового копра может быть достигнута в результате анализа тренда серии поверок и/или использования контрольных карт, с помощью которых можно предоставить необходимые доказательства стабильности смещения копра.

В тех случаях, когда это необходимо, вычисляют расширенную неопределенность U по формуле

$$U = k \cdot u_c, \quad (17)$$

где k – коэффициент охвата (числовой коэффициент, используемый как множитель при суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности).

Коэффициент охвата k выбирают в соответствии с формулой

$$k = t_p(v_{\text{eff}}), \quad (18)$$

где $t_p(v_{\text{eff}})$ – квантиль распределения Стьюдента с эффективным числом степеней свободы v_{eff} и доверительной вероятностью (уровнем доверия) p . Значения коэффициента $t_p(v_{\text{eff}})$ приведены в ГОСТ 34100.3–2017.

Эффективное число степеней свободы определяют по формуле

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u(\bar{K})^4}{4} + \frac{u_{\text{ГСО}}^4}{v_{\text{ГСО}}} + \frac{B^4}{4}}. \quad (19)$$

Значение $v_{\text{ГСО}}$ берется из документации на ГСО.

ГСО содержит пять образцов, неоднородность материала которых имеет значение. Поэтому число эффективных степеней свободы чаще всего недостаточно велико, чтобы использовать коэффициент охвата k , равный 2. По согласованию допускается использовать другие значения коэффициента охвата k .

Результаты и обсуждение

В исследовании систематизированы три метода оценки неопределенности измерений механических характеристик металлов при испытании на ударный изгиб:

- метод оценки неопределенности измерения работы удара на маятниковом-копре, соответствующим межгосударственному стандарту технических условий ГОСТ 10708–82, подтвержденному путем поверки по МИ 1782–87¹⁰ [8];

- метод оценки неопределенности измерения работы удара на маятниковом-копре, откалиброванном по методике ISO 148–2:2016 без применения ГСО;

- метод оценки неопределенности измерения работы удара на маятниковом-копре с использованием ГСО.

Если при поверке копра по [8] установлено соответствие его технических характеристик требованиям ГОСТ 10708–82, то бюджет неопределенности измерения работы удара копром для уравнения измерения (1) представлен в табл. 1. Предполагалось, что цена деления аналогового отсчетного устройства копра составляет 2 Дж согласно ГОСТ 10708–82.

¹⁰ МИ 1782–87 Государственная система обеспечения единства измерений. Копры маятниковые. Методика поверки.

Таблица 1. Бюджет неопределенности работы удара для копра, соответствующего ГОСТ 10708–82

Table 1. Uncertainty budget for the absorbed energy of a pendulum compliant with GOST 10708–82

Величина	Измеренное значение, Дж	Предел допускаемой погрешности	Закон распределения	Стандартная неопределенность, Дж	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность K Дж
E_a	300	$\pm 0,5\%$	равномерный	0,866	1	0,866
E_β	от 30 до 240	$\pm 3,0$ Дж	равномерный	1,73	1	1,73
K_s	от 30 до 240	2 Дж	равномерный	0,577	1	0,577
H	от 30 до 240	0,5 %	равномерный	0,433	1	0,433
Суммарная стандартная неопределенность $u_c(K)$						2,06
Расширенная неопределенность измерений ($k=2, P=0,95$)						4,1 Дж

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

Новая версия стандарта для испытания на ударный изгиб ГОСТ 9454–2025 содержит схожий алгоритм для оценивания неопределенности измерений. Его анализ позволил выявить противоречащие ГОСТ 34100.3–2017 положения. Для оценки неопределенности работы удара в Приложении Ж ГОСТ 9454–2025 предлагается учесть стандартную неопределенность, вызванную инструментальной погрешностью копра, и стандартную неопределенность, связанную с разрешающей способностью копра. Используя формулы Ж.2, Ж.3 и Ж.5 ГОСТ 9454–2025, суммарную неопределенность работы удара можно переписать с учетом приведенных в настоящей работе обозначений:

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{E_\beta}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (20)$$

В формуле (20) отсутствуют вклады от потенциальной энергии маятника и от потери энергии при качании маятника, которые согласно табл. 1 дают существенный вклад в суммарную стандартную неопределенность работы удара. Следует отметить, что формула Ж.5 ГОСТ 9454–2025 для стандартной неопределенности, связанной с разрешающей способностью копра, противоречит п. 4.3.7 ГОСТ 34100.3–2017, предписывающему для описания дисперсии

равномерного распределения между соседними показаниями копра и использовать формулу

$$u^2 = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}.$$

Приложение Ж представляет собой набор инженерных эвристик, которые лишь декларируют соответствие ГОСТ 34100.3–2017. Документ демонстрирует подмену понятий стандартной и расширенной неопределенности, ошибочно работает с полуширинами прямоугольного распределения. Использовать предлагаемые формулы для строгих метрологических расчетов или калибровки лабораториям, работающим по стандарту ГОСТ ISO/IEC17025–2019¹¹, не рекомендуется без их предварительной адаптации под истинные требования GUM.

Пример оценки неопределенности работы удара 48 Дж приведен для копра маятникового серии RKP¹², откалиброванного по ISO 148-2:2016 с номинальным значением потенциальной энергии маятника 300 Дж. Бюджет неопределенности для работы удара приведен в табл. 2.

¹¹ ГОСТ ISO/IEC17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

¹² Копер маятниковый серии RKP (модель RKP450, изготовитель ZWICK GmbH Co. KG, Германия).

Исходные данные для вычисления $u(P)$, $u(l_2)$, $u(\alpha)$, $u(\beta)$ в уравнении (10):

– вес маятника на расстоянии от оси качания до точки опирания кромки ножа на призму $l_2 = 757,0$ мм, $P = 212,3$ Н;

– предел допускаемой относительной погрешности измерений силы для динамометра электронного ДМУ-1/1-0,5МГ4 $\delta = \pm 0,12\%$;

– расстояние от оси качания до точки опирания кромки ножа на призму $l_2 = 757,0$ мм;

– погрешность измерения расстояния: $\Delta l_2 = \pm 0,3$ мм;

– угол взлета: $\beta = 124,6^\circ$; угол подъема: $\alpha = 149,7^\circ$;

– погрешность измерения углов квадрантом оптическим КО-2 по ГОСТ 14967–80¹³: $\Delta\alpha = \Delta\beta = \pm 5''$.

Исходные данные для вычисления $u(K_s)$, $u(A)$ в уравнении (12):

– значение, считанное с аналоговой шкалы копра: $K_s = 48,0$ Дж;

– разрешение шкалы $a = 1$ Дж;

– работа удара, рассчитанная по измеренным углам $A = 47,7$ Дж;

– расширенная неопределенность работы удара, рассчитанной по измеренным углам $U(A) = 0,11$ Дж;

– разность между работой удара по шкале копра и работой удара, рассчитанной

¹³ ГОСТ 14967–80 Квадранты оптические. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования.

по измеренным углам, не должна превышать $\pm 0,5\%$ от номинального значения потенциальной энергии маятника, $|K_s - A| \leq 1,5$ Дж.

Исходные данные для вычисления $u(L)$, $u(l)$ в уравнении (8):

– период 50 колебаний $T(50) = 87,0$ с;

– предел допускаемой основной погрешности измерения интервала времени 87 с секундомером СОСпр-2б-2-010 составляет $\pm 0,6$ с;

– рассчитанное расстояние от оси качания маятника до центра удара $l = 753,0$ мм;

– разность между расстоянием L от оси качания до середины образца и расстоянием l от оси качания маятника до центра удара должна находиться в интервале от $0,99L$ до L , где $L = l_2 = 757,0$ мм.

Исходные данные для вычисления H :

– суммарные потери энергии составляют $0,5$ Дж.

Исходные данные для вычисления $u(C)$ взяты из [1]:

– если образцы подвергаются удару не по центру (на 1–2 мм), то смещение величины работы удара будет находиться в диапазоне от 2 до 4 Дж.

Исходные данные для вычисления $u(E)$ взяты из [1]:

– для малых значений работы удара смещение оценивается как $0,05$ Дж.

Диаграмма бюджета неопределенности работы удара приведена на рис. 3. Наибольший

Таблица 2. Бюджет неопределенности работы удара

Table 2. Uncertainty budget for absorbed energy

Величина	Измеренное значение	Характеристика качества измерений		Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность
		Исходные данные	Закон распределения			
P	212,3 Н	$\pm 0,12\%$	равномерный	0,147 Н	0,224 Дж/Н	0,0329 Дж
l_2	757,0 мм	$\pm 0,3$ мм	равномерный	0,173 мм	62,7 Дж/м	0,0109 Дж
β	$124,6^\circ$	$\pm 5''$	равномерный	2,89''	80,3 Дж/рад	0,0113 Дж
α	$149,7^\circ$	$\pm 5''$	равномерный	2,89''	78,3 Дж/рад	0,0110 Дж
K_s	48,0 Дж	1 Дж	равномерный	0,289 Дж	1	0,289 Дж
A	47,7 Дж	0,074 Дж	нормальный	0,037 Дж	1	0,055 Дж
$K_s - A$	0,3 Дж	0,3 Дж	равномерный	0,173 Дж	1	0,173 Дж

Окончание табл. 2
End of Table 2

Величина	Измеренное значение	Характеристика качества измерений		Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность
		Исходные данные	Закон распределения			
L	757,0 мм	$\pm 0,3$ мм	равномерный	0,173 мм	62,7 Дж/м	0,0108 Дж
l	753 мм	0,12 мм	нормальный	6 мм	62,7 Дж/м	0,376 Дж
$L-l$	4 мм	4 мм	равномерный	2,31 мм	62,7 Дж/м	0,145 Дж
H	300 Дж	0,5 Дж	равномерный	0,144 Дж	1	0,144 Дж
C	–	2 Дж	равномерный	1,15 Дж	1	1,15
E	–	0,05 Дж	равномерный	0,0144 Дж	1	0,0144 Дж
Суммарная стандартная неопределенность $u_c(K)$						1,27 Дж
Расширенная неопределенность измерения ($k=2, P=0,95$)						2,5 Дж

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

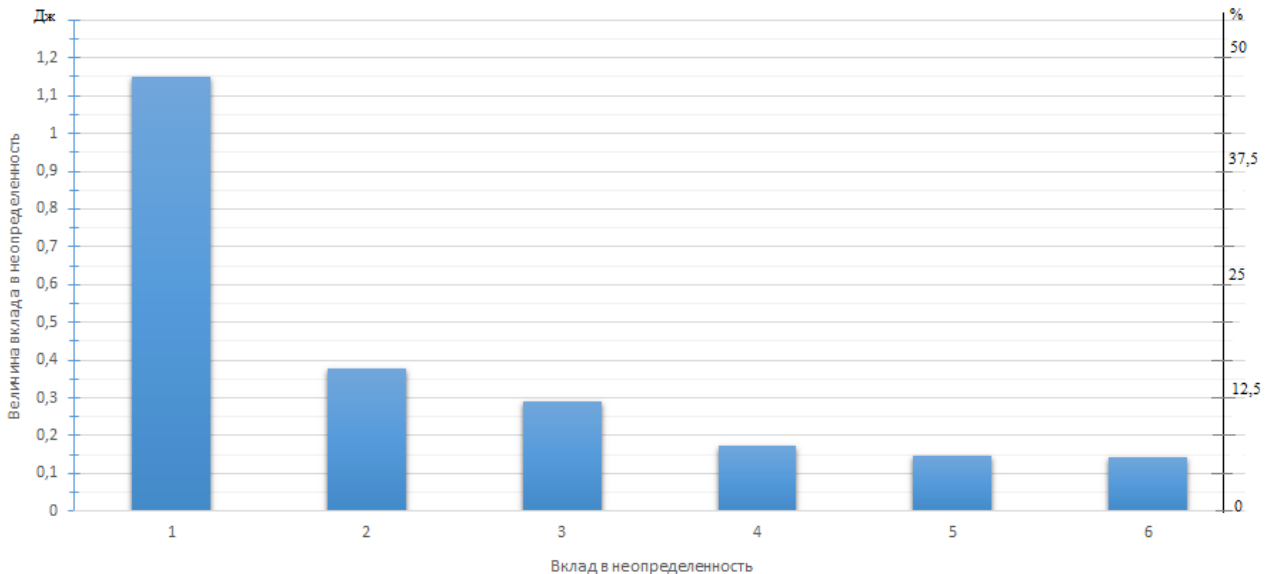


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Диаграмма бюджета неопределенности работы удара для вкладов, превышающих 5% (оценка по международному стандарту ISO 148-2): ось слева – величина вклада в неопределенность, Дж; ось справа – доля вклада в неопределенность, %; 1 – несовпадение надреза на образце с плоскостью качания; 2 – расстояние от оси качания маятника до центра удара; 3 – округление результата по шкале копра; 4 – смещение за счет погрешности показаний на аналоговой или цифровой шкале; 5 – несовпадение центра удара с серединой образца; 6 – потери энергии при свободном качании

Fig. 3. Uncertainty budget diagram for absorbed energy contributions exceeding 5% (evaluation according to the international standard ISO 148-2): the left axis is the value of the uncertainty contribution, J; the right axis is percentage of the uncertainty contribution, in %; 1 – notch of the test piece mismatch with the swinging plane; 2 – distance to the centre of percussion from the axis of rotation; 3 – scale accuracy; 4 – the error of the measured energy; 5 – the centre of percussion mismatch with the centre of test piece; 6 – friction loss

вклад в бюджет неопределенности дают: округление результата по шкале копра, несовпадение центра удара с серединой образца, потери энергии при свободном качании маятника, несовпадение надреза на образце с плоскостью качания маятника. Влияние на работу удара факторов, связанных с вариацией кривизны радиуса ножа маятника, вариацией геометрии образца, скоростью движения маятника в момент удара, считается незначительным, если они находятся в пределах допусков, предусмотренных ГОСТ 9454–2025, ISO 148-2:2016, ГОСТ Р ИСО 148–1–2013. Отметим, что оценка расширенной неопределенности, включающая нормы величин $L-l$, K_s-A согласно ISO 148-2:2016, дает более консервативную оценку 3,0 Дж.

Пример результата оценивания неопределенности работы удара с использованием

ГСО 11934-2022. Результаты (табл. 3) получены на ГСО с аттестованным значением работы удара 25,8 Дж и погрешностью аттестованного значения $\pm 1,6$ Дж при 30 степенях свободы (значения взяты из документации на стандартный образец).

Суммарная неопределенность измерения работы удара относительно велика, поскольку состоит из суммы $u(B)$ и $B/\sqrt{3}$. Если бы измеренное значение работы удара было скорректировано на значение систематической погрешности B , то суммарная неопределенность работы удара была бы существенно меньше $u(B)=2,63$ Дж. В данной работе использован подход из рекомендаций ГОСТ Р ИСО 22514–7–2024 и статьи [7], отличающийся от ISO 148-2:2016 в части вычисления расстояния между значением, соответствующим стандартному образцу, и средним арифметическим результатов

Таблица 3. Бюджет неопределенности величины работы удара при использовании ГСО
Table 3. Uncertainty budget for the absorbed energy value when using GSO

Результаты испытаний и данные из паспорта ГСО		Оценивание значений неопределенностей	
Образец 1	33,1 Дж	\bar{K}	29,4 Дж
Образец 2	26,1 Дж	$b=1,48 \text{ median}(1,9;3,3;3,7;4,2;6,6)$	5,5 Дж
Образец 3	22,8 Дж	$u(\bar{K})$	2,46 Дж
Образец 4	33,6 Дж		
Образец 5	31,3 Дж		
Аттестованное значение СО	25,9 Дж	$B=\bar{K}-K_{\text{ГСО}}$	3,6 Дж
Значение погрешности аттестованного значения СО $\Delta_{\text{ГСО}}$	$\pm 1,6$ Дж	$u_{\text{ГСО}}$	0,924 Дж
		$u(B)=\sqrt{\left(\frac{b}{\sqrt{5}}\right)^2+u_{\text{ГСО}}^2}$	2,63 Дж
		$u_c=\sqrt{B^2/3+u(B)^2}$	3,35 Дж
Число степеней свободы СО	30	$v_{\text{eff}}=\frac{u_c^4}{\frac{b^4}{100}+\frac{u_{\text{ГСО}}^4}{v_{\text{ГСО}}}+\frac{B^4}{4}}$	8
Коэффициент охвата $k=t_p(v_{\text{eff}})$ при $P=0,95$ и $v_{\text{eff}}=8$	2,31	$U=k \cdot u_c$	7,7 Дж

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

измерений. Отметим, что оценка расширенной неопределенности, выполненная по алгоритму ISO 148-2:2016, дает более консервативную оценку 10,3 Дж.

Заключение

Рассмотрение примеров для трех методов оценки неопределенности измерений механических характеристик металлов при испытании на ударный изгиб (рис. 4) позволяет сделать следующие выводы.

Наиболее простым в использовании является метод оценки неопределенности измерения работы удара на маятниковом-копре, соответствующий межгосударственному стандарту технических условий ГОСТ 10708–82. Для оценивания неопределенности работы

удара достаточно использовать предельные значения параметров для конкретной модели маятникового копра (табл. 2) ГОСТ 10708–82 или в описании типа. Недостатком метода является отсутствие учета неопределенности, связанной с прослеживаемостью к опорному значению.

Наиболее прецизионным является метод оценки неопределенности измерения работы удара на маятниковом-копре, откалиброванном по методике ISO 148-2:2016 без использования ГСО. Метод имеет ограничение: незначительными считаются вклады в неопределенность работы удара, связанные с вариацией кривизны радиуса ножа маятника, вариацией геометрии упоров и опор. Необходимость оценивания неопределенности

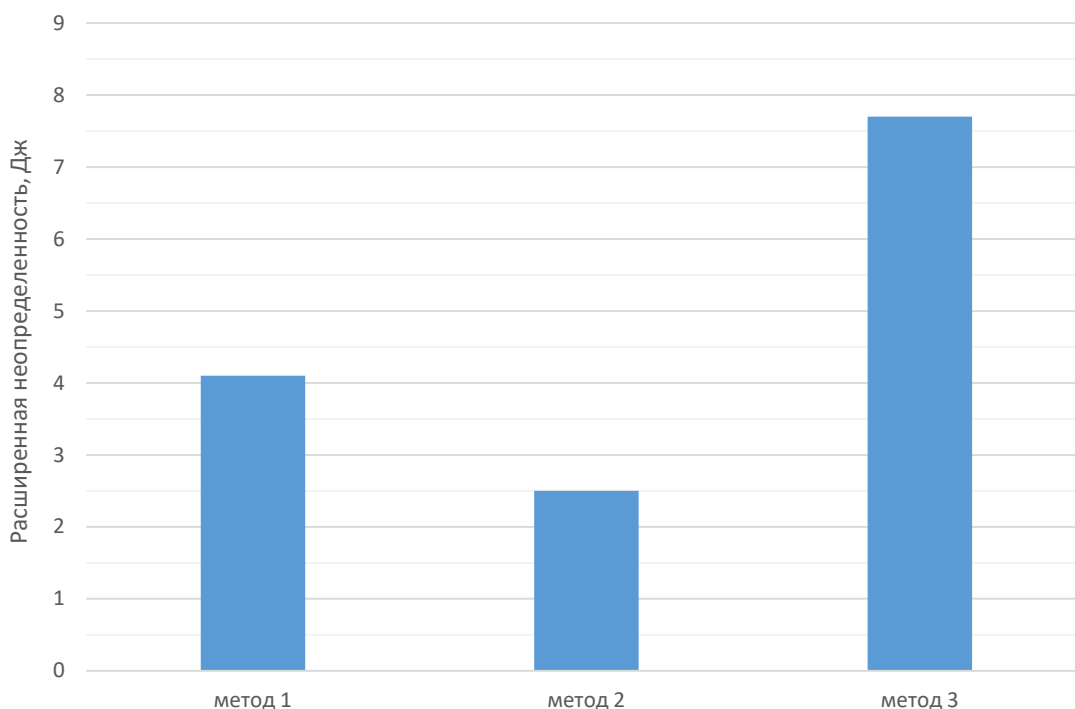


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Сравнительная диаграмма трех методов оценки неопределенности измерений при испытании на ударный изгиб: метод 1 – расширенная неопределенность работы удара для поверенных копров, имеющих метрологические и технические характеристики по ГОСТ 10708–82; метод 2 – расширенная неопределенность работы удара для копров с оценкой метрологических и технических характеристик по методике калибровки ISO 148–2:2016; метод 3 – расширенная неопределенность работы удара для копров с учетом прослеживаемости к ГСО 11934-2022

Fig. 4. Comparative diagram of three methods for evaluating measurement uncertainty in impact bending tests: method 1 – expanded uncertainty of absorbed energy for verified pendulums with metrological and technical characteristics according to GOST 10708–82; method 2 – expanded uncertainty of absorbed energy for pendulums with evaluation of metrological and technical characteristics according to the ISO 148–2:2016 calibration procedure; method 3 – expanded uncertainty of absorbed energy for pendulums considering traceability to GSO 11934-2022

для конкретного значения угла взлета маятника позволяет минимизировать значение неопределенности работы удара, но приводит к необходимости повторить составление бюджета неопределенности для другого значения угла взлета маятника, если испытывается материал с другим значением работы удара. Отсутствие в бюджете неопределенности вклада, связанного с прослеживаемостью к опорному значению, так же является недостатком метода.

Преимущества метода оценки неопределенности измерения работы удара на маятниковом-копре с использованием ГСО:

- во-первых, обеспечение учета прослеживаемости результата к опорному значению стандартного образца;

- во-вторых, автоматический учет в неопределенности работы удара вкладов, связанных с вариацией кривизны радиуса ножа маятника, вариацией геометрии упоров и опор, которые в остальных методах считаются незначительными.

Кроме того, данный метод является экспрессным, позволяющим оперативно оценить неопределенность полученного результата. К его недостаткам следует отнести необходимость иметь ГСО для той области работы удара, где проводятся испытания материала.

Анализ новой версии стандарта ГОСТ 9454–2025 выявил существенные недостатки в Приложении Ж «Оценка неопределенности измерения». Приведенные для оценки неопределенности измерения работы удара «упрощенные формулы» противоречат базовым концепциям современной метрологии, их использование приводит к занижению оценки неопределенности работы удара и ударной вязкости соответственно.

Таким образом, поставленные задачи исследования решены полностью. Перспективными направлениями исследования являются:

- верификация полученных аналитических моделей методами численного моделирования (например, методом Монте-Карло для нелинейных тригонометрических уравнений);

- исследование бюджетов неопределенности для испытаний при экстремальных (пониженных и повышенных) температурах, заявленных в ГОСТ 9454–2025.

Отмечая практическое значение работы, подчеркнем:

- результаты исследования планируется включить в проект стандарта на поверку копров маятниковых;

- испытательные лаборатории могут использовать результаты (оцененные неопределенности) как интервалы приемки, что позволит корректно интерпретировать результаты приемочных испытаний металлопродукции и минимизировать риск выпуска брака (несоответствия продукции установленным требованиям);

- полученные бюджеты и алгоритмы послужат основой для разработки новых ГСО.

Благодарности: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора. Авторы благодарят заведующую лабораторией УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» Лидию Александровну Трибушевскую за консультации и плодотворное обсуждение полученных результатов.

Acknowledgments: This study did not receive any grant-based financial support from organisations in the public, commercial, or non-profit sectors. The authors thank L. A. Tribushevskaya, Head of the Laboratory, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, for her consultations and fruitful discussion of the obtained results.

Вклад авторов: Все авторы внесли свой вклад в концепцию и дизайн исследования. Толмачев В. В. – разработка концепции исследования, разработка методологии, проведение исследования, работа с источниками литературы, проверка и редакция текста статьи; Ченцова Ю. С. – формальный анализ, валидация, редакция текста статьи.

Contribution of the authors: All authors contributed to the concept and design of the study. Tolmachev V. V. – research concept development, methodology development, research implementation, review of literature sources, verification and editing of the article; Chentsova Iu. S. – formal analysis, validation, and editing of the article.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Conflict of interest: The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. NIST recommended practice guide: computing uncertainty for Charpy Impact machine test results / J. D. Splett [et al.]. Washington : U. S. Government printing office, 2008, 36 p.
2. Quality assurance of absorbed energy in Charpy Impact Test / C. L. F. Rocha [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 733. P. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012009>
3. Incesu A., Usta B. Measurement uncertainty calculation for Charpy Impact Test of S275JR quality steel // *UDCS'17 : Proceedings 3rd Iron and Steel Symposium, Karabuk, 3–5 April 2017*. Karabuk : Karabuk University, 2017. P. 341–344.
4. Abu-Sinna A., Saher H. R. A proposed estimation of the expanded uncertainty of Charpy Impact Testers // *Asian Journal of Applied Sciences*. 2020. Vol. 8, Iss. 5. P. 240–246. <https://doi.org/10.24203/ajas.v8i5.6326>
5. Aydemir B. Uncertainty analysis in the notch impact test, for materials with different energy levels // *Acta Polytechnica Hungarica*. 2021. Vol. 18, № 7. P. 187–200. <https://doi.org/10.12700/APH.18.7.2021.7.10>
6. Awachat P., Dakr V. Analysis of various parameters responsible for measurement uncertainty in Charpy Impact Testing // *AIP Conference Proceedings : 2nd International Conference on Advanced Materials Behaviour and Characterization, Chennai, 24–26 April 2021*. Chennai : AIP Publishing, 2021. P. 050002. <https://doi.org/10.1063/5.0072681>
7. Ченцова Ю. С., Толмачев В. В., Забелина А. А. Оценивание неопределенности при испытаниях на ударный изгиб с использованием стандартного образца // *Эталоны. Стандартные образцы*. 2023. Т. 19, № 4. С. 143–150. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-143-150>
8. Толмачев В. В. Основные положения проекта стандарта «Копры маятниковые. Методика поверки» // *Механометрика: Материалы конференции «Механометрика 2025. Механические измерения и испытания»*, г. Санкт-Петербург, 1–3 июля 2025 г. / ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Санкт-Петербург : ВНИИМ, 2025. С. 57–58.

REFERENCES

1. Splett JD, Iyer HK, Wang C–M, McCowan CN. NIST recommended practice guide: computing uncertainty for Charpy Impact machine test results. Washington: U. S. Government printing office; 2008. 36 p.
2. Rocha CLF, Fabricio DAK, Costa VM, Reguly A. Quality assurance of absorbed energy in Charpy Impact Test. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016;733:012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/733/1/012009>
3. Incesu A, Usta B. Measurement uncertainty calculation for Charpy Impact Test of S275JR quality steel. In: *UDCS'17: Proceedings 3rd Iron and Steel Symposium*, 3–5 April 2017, Karabuk, Turkey. Karabuk: Karabuk University; 2017. P. 341–344.
4. Abu-Sinna A, Saher HR. A proposed estimation of the expanded uncertainty of Charpy Impact Testers. *Asian Journal of Applied Sciences*. 2020;8(5):240–246. <https://doi.org/10.24203/ajas.v8i5.6326>
5. Aydemir B. Uncertainty analysis in the notch impact test, for materials with different energy levels. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2021;18(7):187–200. <https://doi.org/10.12700/APH.18.7.2021.7.10>
6. Awachat P, Dakr V. Analysis of various parameters responsible for measurement uncertainty in Charpy Impact Testing. In: *AIP Conference Proceedings: 2nd International Conference on Advanced Materials Behaviour and Characterization*, 24–26 April 2021, Chennai, India. Chennai: AIP Publishing; 2021. P. 050002. <https://doi.org/10.1063/5.0072681>
7. Chentsova IuS, Tolmachev VV, Zabelina AA. Estimation of uncertainty in Charpy Pendulum Impact Test using the reference material. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(4):143–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-143-150>
8. Tolmachev VV. Basic provisions of the draft standard «Pendulum scales. Verification method». In: *Mekhanometrika 2025. Mechanical measurements and tests: Collection of abstracts of reports of the international scientific and technical conference*, 1–3 July 2025, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: VNIIM; 2025. 10–11 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толмачев Владимир Валерьянович – канд. физ.-мат. наук, заведующий отделом метрологии механических и геометрических величин и характеристик, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
e-mail: sertif@uniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6122-1734>

Ченцова Юлия Сергеевна – ведущий инженер лаборатории менеджмента риска и метрологического обеспечения безопасности технологических систем, УНИИМ – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

620075, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 4
e-mail: Chentsova@uniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir V. Tolmachev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Metrology of Mechanical and Geometric Quantities and Characteristics, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: sertif@uniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6122-1734>

Iuliia S. Chentsova – Lead Engineer of the Laboratory for Risk Management and Metrological Safety Assurance of Technological Systems, UNIIM – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology

4 Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620075, Russia
e-mail: Chentsova@uniim.ru