

КАЛИБРОВКА В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ



*Б.М. Гаврилов,
главный метролог частного
учреждения «Атомстандарт»,
Москва,
bmgavrilov@atomstandard.ru*



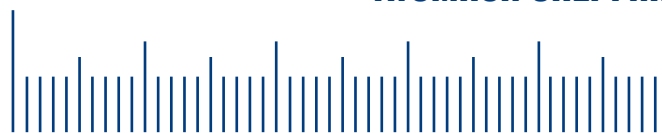
*О.М. Мекеня,
ведущий специалист частного
учреждения «Атомстандарт»,
Москва,
OMMekenya@rosatom.ru*



*Г.Е.Новиков,
главный специалист
Госкорпорации «Росатом»,
Москва,
GENovikov@rosatom.ru*

Огромный процент метрологов России (90%) под калибровкой понимают поверку, проводимую некомпетентной

организацией. Слово «некомпетентной» – конечно, гипербола. На самом деле, предприятие, проводящее «калибровку»,



может быть даже очень компетентным: располагать кадрами, помещениями, эталонами, оборудованием и т.д. и даже быть аккредитованным на поверку. Предприятие и проводит по сути поверку средств измерений (СИ) по утвержденным методикам, но называет эту процедуру калибровкой (так называемая «калибровка по методикам поверки»). Почему? Например, потому что измерения, проводимые «калибруемым» СИ не относятся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, следовательно, поверку проводить необязательно. Или потому, что из экономических соображений предприятие не хочет проходить аккредитацию на право поверки. Так, в большинстве случаев «калибровку» проводят по методикам поверки.

Большинство метрологов просто не понимают, что такое калибровка. Относительно неопределенности результатов калибровки многие заявляют: «всегда оценивали характеристики погрешности СИ, а теперь откуда-то взялась неопределенность; в чем разница?». Сравним два определения калибровки. Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» [1]: «Совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений». Международный словарь по метрологии VIM 3 [2]: «Опера-

ция, в ходе которой при заданных условиях на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующими показаниями с присущим им неопределенностями, а на втором этапе на основе этой информации устанавливают соотношение, позволяющее получать результат измерения, исходя из показания».

На первый взгляд эти два определения не имеют ничего общего. В результате российские специалисты не понимают своих зарубежных коллег. Если в России в подавляющем большинстве случаев используется поверка средств измерений, то в мировой практике поверка (verification) достаточно редка, зато широкое распространение получила калибровка (calibration) в международном понимании. Требования к калибровочным лабораториям, регламентированные стандартом ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [3], основаны на определении VIM 3, и зарубежные заказчики российской продукции требуют их соблюдения. Учитывая, что экспорт продукции и технологий занимает важнейшее место в деятельности Росатома и его организаций, такое взаимонепонимание может привести к срыву зарубежных контрактов.

Рис. 1 демонстрирует результаты калибровки в понимании [2].

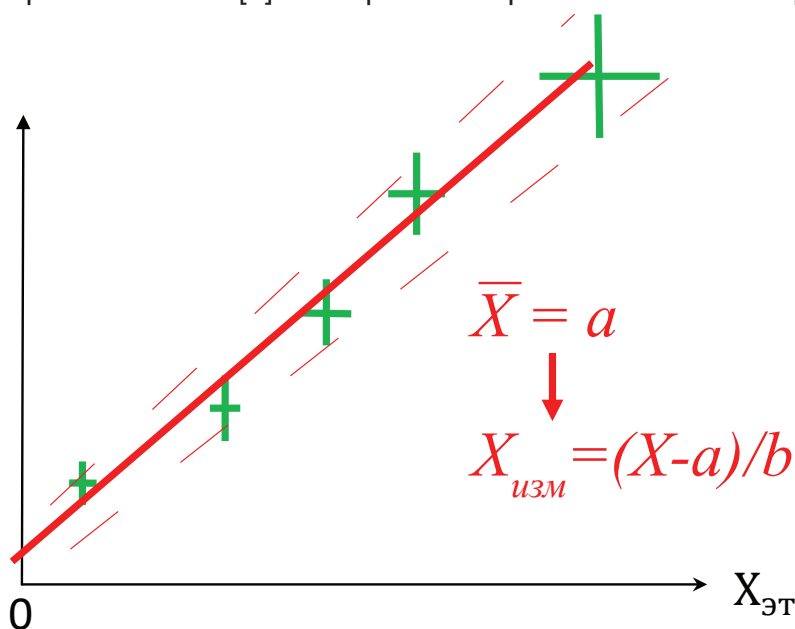


Рис. 1. Результаты калибровки согласно Международному словарю по метрологии

Зеленым цветом показаны «значения величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующие показания с присущими им неопределенностями». Красным цветом показано построенное по результатам измерений «соотношение» между ними – калибровочная характеристика (например, для линейного случая $\bar{X}=a+bX_{\text{эт}}$), из которой может быть установлено «соотношение, позволяющее получать результат измерения, исходя из показания» (например, $X_{\text{изм}}=(X-a)/b$). Красным пунктиром показаны границы доверительного интервала для калибровочной характеристики, которые и представляют неопределенность результатов калибровки («калибровочная или испытательная лаборатория, проводящая калибровку самостоятельно, должна иметь и применять процедуру оценки неопределенности измерений для всех калибровок и всех видов калибровки» [3]).

Но ведь описанное построение и применение калибровочной характеристики говорят о том, что она является метроло-

гической характеристикой (далее – МХ) калибруемого СИ. Как только мы назвали калибровочную характеристику МХ, становится ясно, что понятие калибровки по [1] соответствует определению калибровки по [2]. Ясно и что такое «неопределенности результатов калибровки»: при калибровке мы определяем действительные значения МХ СИ, в том числе и характеристик погрешности СИ, путем проведения измерений, а результатам измерений присуща неопределенность.

Что дает калибровка по [2]? На рис. 2 те же результаты калибровки представлены несколько в другом виде: по оси ординат отложены разности

$\Delta = \bar{X} - X_{\text{эт}}$, т.е. оценки погрешности Δ . Синим цветом показаны пределы допускаемой погрешности СИ $\pm \Delta_{\text{дон}}$. При поверке подтверждается нахождение погрешности СИ в пределах $\pm \Delta_{\text{дон}}$. Но если границы доверительного интервала (красный пунктир) уже, чем $\pm \Delta_{\text{дон}}$, калибровка дает возможность уменьшить погрешность измерений.

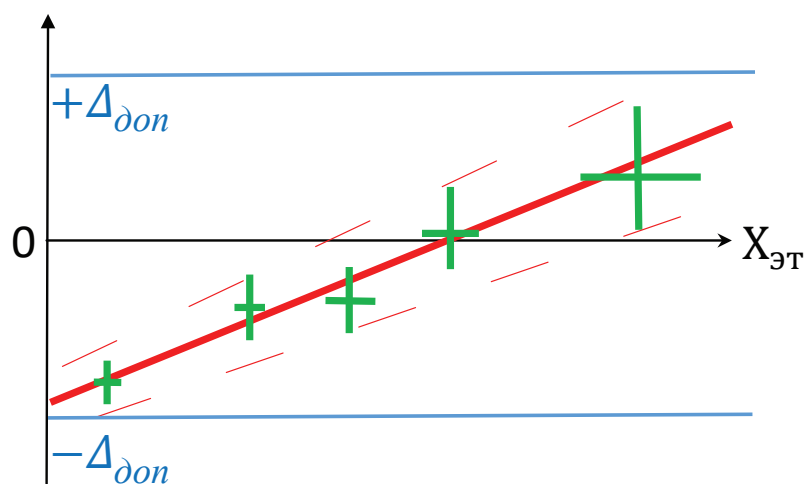
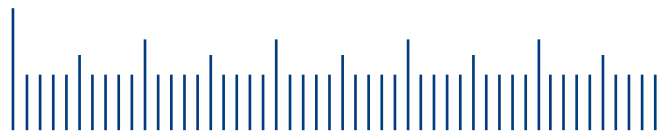


Рис. 2. Калибровка позволяет уменьшить погрешность измерений



Рассмотрим более детально несколько примеров применения калибровки.

Пример 1. «Индивидуальная» калибровка экземпляра СИ

Измерительная система на АЭС содержит измерительный канал, предназначенный для измерения плотности потока нейтронов в канале ядерного реактора. Канал содержит ионизационную камеру (первичный измерительный преобразователь), аналого-цифровой преобразователь (вторичный) и вычислительный компонент. Ионизационная камера преобразует величину плотности потока нейтронов N в величину электрического тока $I = \alpha N$. АЦП преобразует величину тока I в стандартный цифровой код $C = \beta I$. Вычислительный компонент по известным значениям коэффициентов α и β вычисляет величину плотности потока нейтронов $N = C / (\alpha\beta)$. Погрешность коэффициента β обычно мала (доли процента), а вот погрешность чувствительности ионизационной камеры $\Delta\alpha$ составляет $\pm(20-30)\%$. Собственно, эта величина и определяет погрешность измерительного канала. Большая погрешность чувствительности $\Delta\alpha$ обусловлена технологическим разбросом параметров ионизационных камер при их изготовлении. Эта погрешность приписывается всем экземплярам ионизационных камер такого типа.

В данном случае целесообразно определять чувствительность каждого экземпляра ионизационной камеры, т.е. проводить его индивидуальную калибровку. Это позволит уменьшить погрешность измерений плотности потока нейтронов в несколько раз.

Пример 2. Калибровка экземпляра СИ в рабочих условиях применения

Для целей учета ядерных материалов производится их взвешивание. В соответствии с требованиями работы с материалами взвешивание производится в перчаточном боксе. При этом работает вытяжная вентиляция и, соответственно, электромотор. Потоки воздуха и вибрации приводят к тому, что реальная погрешность взвешивания в 3-4 раза больше значения, определенного при испытаниях весов в целях утверждения типа, и под-

тверждаемого при поверке весов (и испытания и поверка проводятся в идеальных условиях – в отсутствие потоков воздуха и вибраций).

В данном случае калибровка весов в рабочих условиях применения позволяет правильно оценить характеристики погрешности взвешивания. А их знание необходимо для дальнейшего применения результатов измерений – оценки значимости инвентаризационной разницы, т.е. проверки наличия возможной утери или хищения ядерного материала.

Приведенные примеры говорят о том, что калибровка в ее понимании как определение действительных значений МХ СИ необходима – в первом случае калибровка позволяет уменьшить погрешность измерений, во втором – оценить реальную погрешность, которая оказывается больше паспортной.

Пример 3. Калибровка специализированных СИ

Наконец, еще одна ситуация, довольно часто встречающаяся в организациях Госкорпорации «Росатом». Организации разрабатывают специализированные СИ (установка измерения давления гелия в ТВЭЛе, установка контроля распределения гадолиния в таблетках снаряженного ТВЭЛа, установка контроля размеров труб из сплавов циркония и т.д.). Организации сами разрабатывают программы и методики их испытаний и методики поверки. При этом вместо термина «испытания» используется термин «аттестация СИ» (такой термин использовался в отмененном ГОСТ 8.326 «Нестандартизованные средства измерений»). Термин же «поверка» используется. На наш взгляд, это противоречит Закону «Об обеспечении единства измерений» и 1/10-НПА, где термин «аттестация СИ» отсутствует, а термин «поверка» применяется только к СИ утвержденного типа.

В то же время процедуры «аттестации» и «поверки» таких СИ в большинстве случаев технически правильны и при этом даже оценивается неопределенность оценки МХ. Правда, вместо термина «неопределенность» применяются другие термины, например, «доверительные гра-

ницы неисключенной систематической составляющей погрешности».

На наш взгляд, с технической точки зрения такой подход не только полностью оправдан, но и необходим. Но в этом случае требуется изменение терминологии: «первичная калибровка» вместо «аттестации» (нестандартизованных СИ) и «периодическая калибровка» вместо (ведомственной) поверки. В свою очередь, это требует введения понятия «межкалибровочный интервал». Однако, насколько мы понимаем, и Росстандарт и Росаккредитация пока не определились с тем, правильно ли вводить такие понятия. Во всяком случае ГОСТ Р 8.879-2014 [4] не содержит таких понятий, а стандарт [3] даже говорит об обратном: «Сертификат о калибровке не должен содержать рекомендаций о периодичности проведения калибровки, за исключением тех случаев, когда это согласовано с заказчиком. Это требование может быть изменено в соответствии с законодательством».

Наша точка зрения по этому вопросу следующая. Честно говоря, позиция стандарта [3] непонятна. Действительно, провели калибровку, определили действительные значения МХ СИ. В течение какого времени ими можно пользоваться? Год? Месяц? День? Час? Если это неизвестно, зачем тогда вообще нужна калибровка? Росатом использовал оговорку стандарта [3] об «изменении требования в соответствии с законодательством» и в нормативном правовом акте [5] написано: «должна быть определена периодичность проведения калибровки».

Пример 4. «Калибровка» по методике поверки

Итак, мы рассмотрели три примера проведения калибровки СИ в понимании [2]. Но все-таки в области использования атомной энергии самым частым случаем является «калибровка», проводимая по методике поверки. Действительно, калибровка по приведенным примерам 1-3 необходима далеко не всегда. В большинстве случаев для применения СИ достаточно операций поверки. Возникает вопрос о целесообразности «калибровки» по методике поверки. На наш взгляд, та-

кая процедура, безусловно, целесообразна, поскольку позволяет ответить на вопрос, пригодно ли СИ к применению.

Второй вопрос – насколько «калибровка» по методике поверки соответствует определению [2]? Вообще-то совсем не соответствует. Чтобы обеспечить соответствие, вводится понятие номинальной (типовой) калибровочной характеристики. Для измерительных преобразователей – это номинальная функция преобразования, для мер – номинальное значение меры, для измерительных приборов считается, что их показания совпадают с опорными значениями. В действительности такого совпадения нет и определенные при калибровке оценки систематической составляющей погрешности (разности между действительной и номинальной функцией преобразования, между действительным и номинальным значением меры, между показаниями калибруемого измерительного прибора и опорными значениями) проверяются на соответствие заранее заданным предельно допустимым значениям.

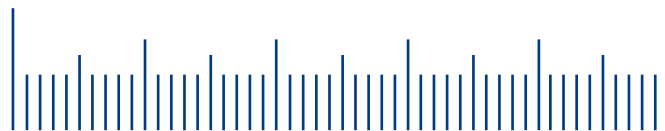
По сути операции этого способа (использование номинальной калибровочной характеристики) аналогичны операциям, проводимым при поверке СИ. Правда, есть определенная разница. В большинстве методик поверки нормируются требования к погрешности эталона $\Delta_{эм}$, например

$$|\Delta_{эм}| \leq 1/M |\Delta_{СИ}|, \quad (1)$$

где $\Delta_{СИ}$ – предел допускаемой погрешности поверяемого СИ, M – коэффициент, определяющий отношение пределов погрешности поверяемого СИ и эталона, как правило, находящийся в пределах от 3 до 5. Критерий положительного результата поверки при этом

$$|X_{СИ} - X_{эм}| \leq |\Delta_{СИ}|, \quad (2)$$

а требования методических указаний [6], к сожалению, давно забыты (здесь $X_{СИ}$ – показания поверяемого СИ; $X_{эм}$ – значение, воспроизводимое или измеряемое эталоном).



Впрочем, есть исключения. В стандарте [7] вместо критерия (2) используется критерий

$$|X_{СИ} - X_{эм}| + U(\hat{\Delta}) \leq |\hat{\Delta}_{СИ}|, \quad (3)$$

где $U(\hat{\Delta})$ – расширенная неопределенность оценки погрешности СИ

$$\hat{\Delta} = X_{СИ} - X_{эм}, \quad (4)$$

включающая и погрешность эталона $\Delta_{эм}$. Вот зачем нужна неопределенность результатов калибровки – она учитывается при принятии решения о годности СИ. Не надо смущаться тем, что стандарт [7] имеет подзаголовок «методика поверки». На самом деле, стандарт [7] может применяться и для калибровки термометров сопротивления, так как предусматривает построение индивидуальной калибровочной характеристики (зависимости «сопротивление – температура»).

Итак, мы рассмотрели примеры калибровки СИ, которые по сути сводятся к двум вариантам определения и использования калибровочной характеристики. При экспериментальном определении индивидуальной калибровочной характеристики экземпляра СИ ее описывают функциональной зависимостью, для каждой точки которой в калибруемом диапазоне оценивают соответствующую неопределенность. Далее калибровочную характеристику используют при проведении измерений в течение межкалибровочного интервала. Для измерительных приборов ее применяют для внесения поправок в показания измерительного прибора. Для измерительных преобразователей калибровочная характеристика суть одно и то же, что индивидуальная градуировочная характеристика. Для однозначных мер калибровочная характеристика сводится в точку: соотношение представляет собой пару значений – номинальное и действительное значения меры или номинальное значение и поправка к номинальному значению. Достоинство калибровки заключается в исключении систематической составляющей погрешности данного экземпляра СИ. Недостатками являются трудоемкость работ по проведению калибровки, необходимость

строгого определения межкалибровочного интервала, неудобство применения – в показании измерительного прибора при каждом измерении необходимо вносить поправки.

Второй вариант («калибровка» по методике поверки) заключается в использовании номинальной (типовой) калибровочной характеристики. Достоинствами этого варианта являются приемлемая трудоемкость, простота дальнейшего применения – отсутствие необходимости введения поправок, возможность использования в качестве методик калибровки утвержденных методик поверки. Фактически этот вариант применим для стандартизованных СИ, для которых МХ указаны в нормативной документации на СИ. Второй недостаток – способ не позволяет минимизировать систематическую составляющую погрешности СИ.

Пример 3 (калибровка специализированных СИ) можно рассматривать как совокупность первого и второго вариантов. Калибровочную характеристику определяют при проведении первичной калибровки СИ по первому варианту. При этом определяют и предельно допустимые значения МХ. Операции проведения периодической калибровки аналогичны операциям, описанным во втором варианте – при этом установленная при первичной калибровке калибровочная характеристика и предельно допустимые значения МХ рассматриваются как номинальные. Достоинством является возможность калибровки СИ, для которых отсутствуют утвержденные методики поверки.

Таким образом, описанные выше подходы сближают понимания калибровки [1] и [2]. И все-таки понятие калибровки [1] шире, чем [2]. Понятие калибровки по [2] фактически распространяется только на систематическую составляющую погрешности. Но ведь МХ СИ включают также случайную составляющую погрешности, функции влияния внешних величин, характеристики взаимодействия с подключенными ко входу и выходу компонентами и т.д. [8]. Эти МХ тоже могут и должны определяться при калибровке, должна оцениваться их неопределенность. Но здесь есть особенности. Так, при оценивании случайной составляющей погрешности СИ вычисляется верхняя доверительная граница среднего квадрати-

ческого отклонения (СКО), а не точечная оценка СКО, т.е. неопределенность оценки включается в СКО. Иными словами, берется наихудшая оценка МХ («консервативный» подход [5]).

Госкорпорацией «Росатом» утверждена система калибровки в атомной отрасли (АСК), особенности которой изложены ниже.

Правовые особенности

В основе АСК лежит нормативный правовой акт [5]. Во многих случаях калибровка имеет ряд преимуществ перед поверкой и поэтому ее применение является очень желательным не только для обеспечения соответствия международным требованиям, но и для получения требуемой точности измерений на объектах использования атомной энергии. В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений калибровка может использоваться как дополнение к поверке для получения более достоверных результатов измерений, что особенно важно для такой сложной, высокотехнологичной и наукоемкой отрасли, как атомная. Вне сферы государственного регулирования организации атомной отрасли вправе выбирать между поверкой и калибровкой [5].

Метрологические особенности

Калиброваться могут не только СИ (измерительные приборы, измерительные преобразователи, меры, измерительные каналы), но и эталоны, некоторые виды аттестованных объектов [5], иные выполняющие измерительные функции составные части технических устройств.

АСК, опираясь на понятие калибровки по Закону [1], не противоречит и международному пониманию калибровки [2].

Калибровка может проводиться в нормальных и в рабочих условиях применения.

Возможно применение «калибровки по методикам поверки».

Может быть несколько видов калибровки. Выделим следующие: первичная, периодическая, разовая, специальная. Первичная калибровка осуществляется, как правило, в рамках разработки методики калибровки. Она должна включать следующие основные операции: выбор комплекса нормируемых МХ; разработку методики определения действительных значений выбранных МХ; про-

ведение экспериментальных исследований; оценивание действительных значений МХ и их неопределенностей; установление перечня метрологических характеристик, подлежащих периодическому контролю; установление межкалибровочного интервала.

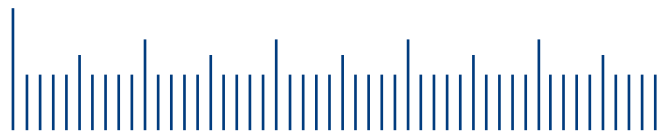
Периодическая калибровка – калибровка объектов (средств измерений), находящихся в эксплуатации, выполняемая через установленные межкалибровочные интервалы. Разовая калибровка – калибровка, проводимая с целью решения разовой измерительной задачи или по требованию заказчика. Специальная калибровка заключается в проведении двух разовых калибровок: непосредственно до и после рабочих измерений; проводится для особо ответственных измерений и (или) средств измерений, находящихся в неустойчивых условиях эксплуатации.

Калибровочная характеристика может быть индивидуальной или номинальной. Неопределенность результатов калибровки оценивается при калибровке всех объектов и всех видах калибровки. При оценивании МХ применяется «консервативный» подход.

Кроме основного документа, утвержденного приказом Госкорпорации «Росатом» положения об АСК, разработаны и два технических документа, регламентирующих требования к калибровочным лабораториям (на основе стандарта [3]) и к методикам калибровки. Последний документ соответствует требованиям стандарта [4], но, кроме того, содержит алгоритмы оценивания неопределенности при калибровке всех видов объектов и построения калибровочных характеристик (всего около 90 формул). Документ содержит также алгоритм подтверждения прослеживаемости результатов калибровки. Разработано и распространяется на предприятиях программное обеспечение для построения калибровочных характеристик, учитывающее неопределенности измерений, которые обеспечивают эталоны, и неопределенности показаний калибруемых объектов.

Организационные особенности

АСК возглавляет руководитель Госкорпорации «Росатом». Система включает базовую организацию по калибровке, выполняющую организационные и научно-



методические функции, экспертные организации, непосредственно выполняющие работы по подтверждению компетентности организаций и проведению инспекционного контроля. Подтверждение компетентности включает документарные и выездные проверки.

Очень важную роль играет центр подготовки персонала, который проводит обучение специалистов экспертных организаций и калибровочных лабораторий.

АСК – молодая система. Ей присущи многие «трудности роста». Но постепенно система развивается. Из проблем, которые авторам кажутся важнейшими, следует отметить недостаточную проработанность методологии обоснования периодичности калибровки. Хотя и здесь на предприятиях отрасли есть определенный опыт и наработки.

Литература

1. Федеральный закон от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
2. Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр./Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Белорус, гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 84 с.
3. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
4. ГОСТ Р 8.879-2014. ГСИ. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению.
5. Приказ Госкорпорации «Росатом» от 31.10.2013 г. № 1/10-НПА «Об утверждении метрологических требований к измерениям, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, их составным частям, программному обеспечению, методикам (методам) измерений, применяемым в области использования атомной энергии».
6. МИ 187–86. Методические указания. ГСИ. Средства измерений. Критерии достоверности и параметры методик поверки.
7. ГОСТ 8.461-2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки.
8. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.