Physikalisch-Technische Bundesanstalt

DKD

# Методическая инструкция DKD-R 6-1

# Калибровка приборов для измерения давления

Выпуск 08/2019

https://doi.org/10.7795/550.20180828AIRU

CC BY NC ND

**Немецкая служба калибровки – Deutscher Kalibrierdienst (DKD)**

Со дня основания в 1977 году Немецкая служба калибровки DKD объединяет калибровочные лаборатории промышленных предприятий, научно-исследовательских институтов, технических учреждений и контрольно-испытательных организаций. 3 мая 2011 года DKD была создана заново как *технический орган* PTB и аккредитованных лабораторий.

Этот орган носит название *"Немецкая служба калибровки" (Deutscher Kalibrierdienst,* DKD) и осуществляет свою деятельность под руководством PTB. Методические инструкции и рекомендации, разработанные DKD, отражают актуальный уровень технического развития в соответствующей области и предоставляются Немецкому органу по аккредитации (DAkkS – Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) для проведения аккредитации калибровочных лабораторий.

DAkkS как правопреемник DKD аккредитует и контролирует аккредитованные калибровочные лаборатории, которые осуществляют калибровку средств измерений и мер для установленных при аккредитации величин и диапазонов измерения. Выдаваемые ими сертификаты калибровки являются подтверждением прослеживаемости к национальным эталонам, которое требуется согласно стандартам серии DIN EN ISO 9000 и DIN EN ISO/IEC 17025.

**Контакт:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
DKD-Geschäftsstelle
Bundesallee 100 38116 Braunschweig

Абонентский ящик
Postfach 33 45 38023 Braunschweig
Телефон секретариата: +49 531 592-8021
Интернет: www.dkd.eu

*Рекомендация для цитирования при указании источника:*

*Методическая инструкция DKD-R 6-1 Калибровка приборов для измерения давления, выпуск 08/2019, редакция 0, Национальный метрологический институт Германии, Брауншвейг и Берлин*
*DOI: https://doi.org/10.7795/550.20180828AIRU*

*(Richtlinie DKD-R 6-1, Kalibrierung von Druckmessgeräten, Ausgabe 03/2014, Revision 2, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin)*

Документ, включая все его части, защищён авторскими правами и подлежит пользовательской лицензии Creative Commons CC by-nc-nd 3.0 (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/). В этой связи „некоммерческое использование“ (NC) обозначает, что этот документ запрещено распространять в целях извлечения прибыли, или же делать его достоянием общественности. Разрешается и рекомендуется использовать документ в целях промышленного применения в лабораториях.

Авторы:
Члены Технического комитета DKD *Давление и вакуум.*

Выпущена Немецкой службой калибровки (Deutscher Kalibrierdienst, DKD) при поддержке Национального метрологического института Германии (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) и является результатом совместной работы PTB и аккредитованных калибровочных лабораторий с Техническим комитетом *Давление и вакуум*.

**Содержание** **Страница**

Предисловие ... 6
1. Цель и область применения ... 7
2. Символы и обозначения ... 7
2.1 Переменные величины ... 7
2.2 Индексы ... 8
2.3 Обозначения в спецификации ... 8
3. Исходные и рабочие эталоны ... 9
4. Объект калибровки ... 10
5. Калибруемость ... 11
6. Условия окружающей среды ... 11
7. Процедура калибровки ... 12
8. Неопределённость измерений ... 15
8.1 Определение [VIM 2.26] ... 15
8.2 Порядок выполнения ... 15
8.2.1 Модель измерений [VIM 2.48] ... 15
8.2.2 Модель сумма / разность ... 16
8.2.3 Модель произведение / частное ... 16
8.2.4 Входные/влияющие величины ... 17
8.2.5 Возможные влияющие величины, пример ... 19
8.3 Калибровка манометров с пружиной Бурдона ... 20
8.3.1 Модель измерений ... 20
8.3.2 Бюджет неопределённости измерений ... 22
8.3.3 Бюджет неопределённости измерений, относящийся к ступени нагрузки ... 23
8.3.4 Указание одного значения ... 23
8.4 Калибровка электрических приборов для измерения давления ... 24
8.5 Калибровка датчиков давления и преобразователей давления с электрическим выходным сигналом ... 25
8.5.1 Модель измерений ... 25
8.5.2 Бюджет неопределённости измерений ... 27
8.5.3 Бюджет неопределённости измерений, относящийся к ступени нагрузки ... 28
8.5.4 Указание одного значения ... 28
8.6 Влияющие величины объекта калибровки для бюджета неопределённости ... 29
8.6.1 Разрешающая способность *r* ... 29
8.6.1.1 Аналоговые показывающие устройства ... 29
8.6.1.2 Цифровые показывающие устройства ... 29
8.6.1.3 Колебание показаний ... 29

8.6.2 Погрешность нуля $f_0$ ..... 29
8.6.3 Сходимость измерений *b'* ..... 30
8.6.4 Промежуточная прецизионность измерений *b* ..... 30
8.6.5 Вариация показаний *h* ..... 30
9. Оценка результатов измерений и данные в сертификате калибровки ..... 31
9.1 Определение других характеристических величин ..... 32
9.1.1 Средние значения $\bar{x}$ ..... 32
9.1.2 Диапазон отклонений *U'* ..... 32
9.1.3 Соответствие ..... 33
9.2 Визуализация результата калибровки ..... 33
9.2.1 Манометр с пружиной Бурдона, электрический прибор для измерения давления: ..... 33
9.2.2 Преобразователь давления с электрическим выходным сигналом ..... 35
9.3 Предельные значения для выражения неопределённости измерений ..... 36
10. Дополнительные регламенты и стандарты ..... 37
Приложение A Оценка неопределённости измерений, связанной со значениями поршневого манометра при рабочих условиях ..... 41
Приложение B Пример. Бюджет неопределённости измерений для калибровки манометра с пружиной Бурдона ..... 43
Приложение C Пример. Бюджет неопределённости измерений для калибровки цифрового электрического прибора для измерения давления ..... 45
Приложение D Пример. Бюджет неопределённости измерений для калибровки преобразователя давления с электрическим выходным сигналом ..... 47
Приложение E (справочное) Неопределённости измерений исходных и рабочих эталонов ..... 51
Приложение F Сроки последующей калибровки (рекомендация) ..... 52

## Предисловие

Методические инструкции DKD – это прикладные документы к требованиям стандарта DIN EN ISO/IEC 17025. В методических инструкциях описываются технические, технологические и организационные процессы, которые служат образцом для определения внутренних процедур и регламентов в аккредитованных калибровочных лабораториях. Методические инструкции DKD могут быть включены в руководства по менеджменту качества калибровочных лабораторий. Имплементация методических инструкций способствует унификации при обращении с калибруемыми приборами в различных калибровочных лабораториях и повышает стабильность и контролируемость работы калибровочных лабораторий.

Методические инструкции DKD не должны тормозить дальнейшее развитие методов и процессов калибровки. По согласованию с органом аккредитации допускаются отклонения от методических инструкций и внедрение новых процедур, если на это есть технически обоснованные причины.

Настоящая методическая инструкция была разработана Техническим комитетом *Давление и вакуум* в сотрудничестве с PTB и аккредитованными калибровочными лабораториями. Методическая инструкция была одобрена правлением DKD.

Вторая редакция методической инструкции содержит незначительные попраки в примерах, а также редакционные правки с целью уточнения и лучшего понимания.

# 1. Цель и область применения

Настоящая методическая инструкция устанавливает минимальные требования к процедуре калибровки и оценке неопределённости измерений при калибровке приборов для измерения давления. Настоящая методическая инструкция распространяется на манометры с пружиной Бурдона, электрические приборы для измерения давления и преобразователи давления с электрическим выходным сигналом для абсолютного давления, дифференциального давления и избыточного давления с отрицательными и положительными значениями.

# 2. Символы и обозначения

Символы приводятся в тематическом порядке, т.е., как правило, в порядке их появления в тексте.

## 2.1 Переменные величины

| | |
|---|---|
| M1 ... M6 | Ряд измерений |
| EW | Конечное значение (диапазона калибровки) |
| | |
| $Y$ | Выходная величина в модели измерений [VIM 2.51] |
| $X$ | Входная величина в модели измерений [VIM 2.50] |
| $\delta X$ | Влияющая величина [VIM 2.52] |
| $K$ | Поправочный коэффициент |
| | |
| $x$ | Наилучшая оценка входной величины |
| $y$ | Наилучшая оценка выходной величины |
| | |
| $c$ | Коэффициент чувствительности |
| $k$ | Коэффициент охвата [VIM 2.38] |
| $a$ | Полуширина распределения |
| $g_{X_i}(\xi_i)$ | Вероятность |
| $E[...]$ | Ожидаемое значение |
| $u$ | Стандартная неопределённость измерений [VIM 2.30] |
| $U$ | Расширенная неопределённость измерений [VIM 2.35] |
| $w$ | Относительная стандартная неопределённость измерений [VIM 2.32] |
| $W$ | Относительная расширенная неопределённость измерений |
| | |
| $p$ | Давление |
| $\Delta p$ | Систематическая погрешность измерения величины давления |
| $\delta p$ | Влияющая величина для единицы измерения давления |
| $S$ | Коэффициент передачи (датчика давления) |
| $\Delta S$ | Систематическое отклонение коэффициента передачи от одного указанного значения |
| $U....$ | Напряжение с различными индексами (главы 8.5.1 и 8.5.2) |
| $G$ | Коэффициент усиления |
| | |
| $r$ | Разрешающая способность |
| $f_0$ | Погрешность нуля |
| $b'$ | Сходимость измерений [VIM 2.21] |

| | |
|---|---|
| $b$ | Промежуточная прецизионность измерений [VIM 2.23] |
| $h$ | Вариация показаний |
| | |
| $U'$ | Диапазон отклонений |
| $W'$ | Относительный диапазон отклонений |
| | |
| $S'$ | Угловой коэффициент линейной функции наилучшего соответствия |
| | |
| $p_e$ | Избыточное давление |
| $m$ | Масса груза |
| $g$ | Ускорение свободного падения |
| $\rho$ | Плотность |
| $A$ | Активное сечение системы поршень-цилиндр |
| $\lambda$ | Коэффициент деформации системы поршень-цилиндр |
| $\alpha$ | Коэффициент линейного теплового расширения поршня |
| $\beta$ | Коэффициент линейного теплового расширения цилиндра |
| $t$ | Температура системы поршень-цилиндр |
| $\Delta h$ | Разность уровней опорных плоскостей |

## 2.2 Индексы

| | |
|---|---|
| Sp | Напряжение питания |
| $j$ | Номер точки измерения |
| $m$ | Номер ряда измерений |
| $n$ | Количество циклов измерений |
| | |
| a | Воздух |
| Fl | Передающая среда |
| $m$ | Груз /масса нагрузки |
| 0 | Стандартные условия $t$ = 20 °C |
| Std | Стандартные условия |
| Anw | Рабочие условия |
| korr | Поправка (измеренного значения величины) |

## 2.3 Обозначения в спецификации

*прим. переводчика: приведённые в этой главе сокращённые обозначения несущественны для русской версии документа

## 3. Исходные и рабочие эталоны

Калибровка осуществляется методом прямого сравнения измеренных значений объекта калибровки с измеренными значениями исходного или рабочего эталона, имеющего прямую или косвенную прослеживаемость к национальному эталону.

В качестве исходных эталонов используют приборы для измерения давления с долговременной стабильностью, как, напр., поршневые и жидкостные манометры или электрические приборы для измерения давления с небольшой долговременной стабильностью (см. приложение F, стр. 51). Их калибруют с определённой периодичностью и выдают сертификат калибровки, в котором указывают расширенную неопределённость измерений при стандартных условиях (в частности, нормальное или местное ускорение свободного падения, 20 °C, 1 бар). Исходный эталон подлежит наблюдению и документации со стороны органа по аккредитации. Если калибровка проводится в условиях, отклоняющихся от стандартных, то необходимо ввести поправки при расчёте давления. Неопределённости измерений, связанные с этими поправками ввиду влияющих физических величин, должны учитываться в качестве дополнительных вкладов в бюджете неопределённости измерений[1].

При расчёте неопределённости измерений используемых эталонов необходимо учитывать все значимые влияющие величины. У показывающих приборов для измерения давления, используемых в качестве эталона, разрешающая способность дожна быть учтена повторно при расчёте неопределённости измерений.

Рабочие эталоны, занесённые в руководство по менеджменту качества лаборатории DKD, калибруются в аккредитованной лаборатории с выдачей сертификата калибровки, в котором указывается расширенная неопределённость измерений на момент калибровки. Орган по аккредитации осуществляет контроль рабочего эталона. Рабочие эталоны могут сильно отличаться по типу конструкции.

Рекомендация:
Неопределённость измерений, связанная с измеренными значениями исходного или рабочего эталона, не должна превышать 1/3 от желаемой неопределённости измерений[2], предположительно приписываемой измеренным значениям объекта калибровки.

[1] Обозначение „Messunsicherheitsbilanz“ ( рус. „бюджет неопределённости измерений“) по-прежнему принимается.

[2] Желаемая неопределённость измерений – это такая неопределённость, которую можно достичь при установленных затратах на калибровку (неопределённость измеренных значений эталона, количество рядов измерений и тд.). Она может быть либо равной самой малой указываемой неопределённости измерений, либо быть больше неё.

## 4. Объект калибровки

Объектами калибровки являются приборы для измерения давления трёх типов конструкции, представленные на иллюстрации 1.

**Иллюстрация 1:** приборы для измерения давления по типу конструкции

В отличие от электрических приборов для измерения давления (2), нуждающихся только в источнике напряжения или источнике тока, при калибровке преобразователей давления с электрическим выходным сигналом (3) должны применяться вспомогательные измерительные приборы аккредитованной лаборатории. Они предназначены для преобразования электрического сигнала в считываемое показание. Неопределённость измерений, связанная с измеренными значениями вспомогательных измерительных приборов, должна учитываться в бюджете неопределённости. Для обеспечения метрологической прослеживаемости вспомогательные измерительные приборы должны быть откалиброваны, также должны иметься данные о неопределённости измерений, связанной с измеренными значениями.

При выборе вспомогательных измерительных приборов необходимо удостовериться в том, что связанные с ними составляющие неопределённости измерений не оказывают значительного влияния на желаемую неопределённость измерений объекта калибровки.

У объектов калибровки с цифровым интерфейсом (напр. RS232, RS485 IEEE488 и т.д.), этот интерфейс может быть использован вместо дисплея. Необходимо обеспечить однозначное толкование и обрабатку считываемых данных.

## 5. Калибруемость

Обработка задания на калибровку предполагает калибруемость (пригодность) объекта калибровки, т.е. текущее состояние объекта калибровки должно соответствовать общепризнанным техническим требованиям и особым требованиям согласно документации производителя. Калибруемость должна устанавливаться путём внешнего осмотра и проверки исправности.

Внешний осмотр охватывает, напр.:

- внешний осмотр на повреждения (стрелки, резьбы, уплотнительной поверхности, напорного канала)
- контаминацию и чистоту
- внешний осмотр относительно маркировки, читаемости показаний
- проверка на наличие документации, необходимой для проведения калибровки (технической характеристики, руководства по эксплуатации)

Проверка исправности охватывает, напр.:

- герметичность системы соединительных линий объекта калибровки
- электрическое функционирование
- исправность функционирования элементов управления (напр. настройка нулевой точки)
- установочные элементы в заданном положении
- безошибочное протекание процессов самоконтроля и/или самонастройки; при необходимости внутренние опорные значения величины должны считываться с помощью интерфейса данных
- зависимость от крутящего момента (нулевого сигнала) при монтаже

Примечание:
Если для обеспечения калибруемости необходимо провести ремонтные работы или юстировки, то эти действия должны быть обсуждены между заказчиком и калибровочной лабораторией. Значимые параметры прибора должны документироваться по мере возможности до и после юстировок.

## 6. Условия окружающей среды

Калибровку следует выполнять после выравнивания температуры между калибруемым объектом и окружающей средой в пределах допустимого температурного диапазона (от 18 °C до 28 °C). Необходимо учитывать время прогрева калибруемого объекта или возможный нагрев калибруемого объекта в результате напряжения источника питания. Время прогрева основывается на собственном опыте или на указаниях производителя.

Калибровку следует производить при стабильной температуре окружающей среды. Рекомендуемое максимальное температурное колебание во время калибровки составляет ±1 K. При достижении максимальных пределов допуска следует при

необходимости учитывать дополнительный вклад в неопределённость; данная температура должна лежать в диапазоне от 18 °C до 28 °C и должна документироваться.

Примечание:
При применении поршневых манометров плотность воздуха может оказывать значительное влияние на результат калибровки (подъёмная сила масса и гидростатическое давление), в связи с этим помимо температуры окружающей среды должны учитываться и документироваться атмосферное давление и относительная влажность воздуха. Эти данные должны быть указаны в сертификате калибровки (см. DAkkS-DKD 5).

## 7. Процедура калибровки

- Прибор для измерения давления следует, по возможности, калибровать как систему (измерительную цепь).
- Следует соблюдать предписанное монтажное положение.
- Калибровку следует производить по точкам измерения, равнораспределённым в диапазоне калибровки.
- В зависимости от желаемой неопределённости измерения требуется один или несколько рядов измерений (см. таблицу 1 или изображение 2).
- Если поведение объекта калибровки относительно влияния крутящего момента при монтаже недостаточно хорошо известно, то необходимо путём дополнительного крепления рассчитать промежуточную прецизионность измерений. Значение крутящего момента в данном случае должно документироваться.
- Разность высот между опорными высотами эталона и объекта калибровки необходимо свести к минимуму или рассчитать поправку.

По заявке могут быть рассчитаны дополнительные влияющие величины (напр. влияние температуры вследствие дополнительных рядов измерений при различных температурах).

Сравнение измеренного значения величины между объектом калибровки и исходным или рабочим эталоном может осуществляться двумя методами:

- Давление устанавливают по показанию объекта калибровки
- Давление устанавливают по показанию эталона

Продолжительность предварительной нагрузки в конечном значении и между двумя предварительными нагрузками должна составлять как минимум 30 секунд. После предварительной нагрузки и по достижению установившегося режима показание объекта калибровки ставится на нуль, если объект калибровки это позволяет. Непосредственно после этого осуществляется считывание нулевой отметки. При изменении ступеней давления в ряде измерений время между двумя следующими друг за другом шагами нагружения должно быть одинаковым и составлять не менее 30 секунд, а считывание должно осуществляться не ранее 30 секунд после начала изменения давления. В особенности у манометров с пружиной Бурдона возможное влияние трения на стрелочное устройство может быть сведено до минимума посредством лёгкого постукивания. Измеренное значение в конечной точке диапазона калибровки должно документироваться до и после выдержки. Считывание нулевой отметки в конце ряда измерений осуществляется не ранее 30 секунд после полной разгрузки.

На изображении 2 представлены затраты на калибровку в зависимости от желаемой неопределённости измерений (ср. примечание 2 главы 3) и отображена последовательность калибровки.

**Таблица 1:** Последовательность калибровки

| Последова-тельность | Желаемая неопределённость измерений в % в диапазоне измерений (*) | Минимальное количество точек измерения с нулевой точкой вверх/вниз | Кол-во предвари-тельных нагрузок | Изменение нагрузки + время выдержки (**) секунды | Время выдержки в конечном значении диапазона измерений (***) минуты | Кол-во рядов измерений вверх | Кол-во рядов измерений вниз |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A** | < 0,1 | 9 | 3 | > 30 | 2 | 2 | 2 |
| **B** | 0,1 ... 0,6 | 9 | 2 | > 30 | 2 | 2 | 1 |
| **C** | > 0,6 | 5 | 1 | > 30 | 2 | 1 | 1 |

(*) Ссылка на диапазон измерений приводится для того, чтобы предоставить возможность выбрать последовательность (необходимые затраты на калибровку) из таблицы, так как обычно заданные пределы точности от производителя относятся к диапазону измерений. К измерительным приборам, содержащим спецификацию для измеренного значения или комбинированные спецификации, применяется таблица 1 при использовании предела спецификации (напр. диапазона измерения).

(**) Необходимо обязательно дождаться установившегося режима (достаточно стабильного показания эталона и объекта калибровки)

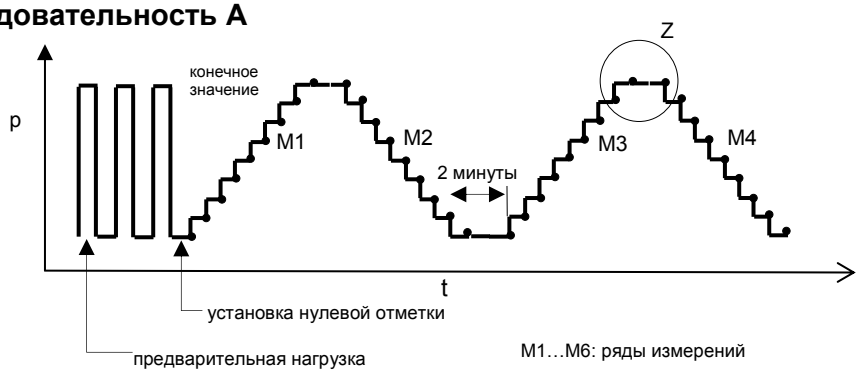
(***) Для манометров с пружиной Бурдона время выдержки составляет 5 минут. При квазистатических калибровках (принцип пьезоэлектрического датчика) время выдержки может быть сокращено.

Примечание:
Для калибровки объектов калибровки с диапазоном измерения более чем 2500 бар, как правило, применяется последовательность калибровки A. При наблюдении эффектов от закрепления следует при необходимости повторить калибровку при втором креплении. Объекты калибровки, которые калибруются в положительном и отрицательном избыточном давлении, должны калиброваться как минимум по двум точкам в отрицательной части диапазона (напр. при -1 бар и -0,5 бар) и по остальным точкам измерения в положительной части.

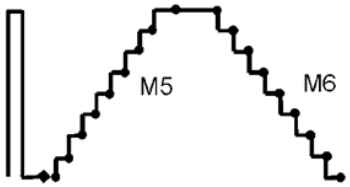
Если для проведения калибровки требуются несколько опорных значений, то при изменении опорного значения давление на объекте калибровки должно оставаться постоянным. Если это не практично (напр. смена монтажной позиции, второе крепление), то необходимо провести новую полную последовательность калибровки.

**Иллюстрация 2:** Визуализация последовательностей калибровки

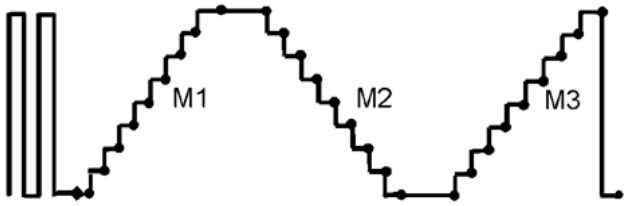
**Последовательность A**



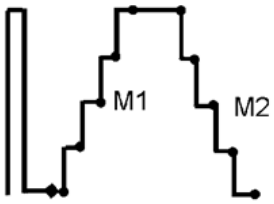

Дополнительное повторное измерение при 2-ом креплении

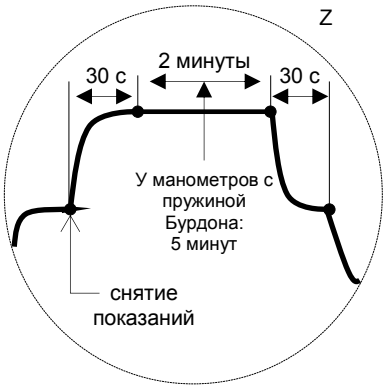



**Последовательность B**




**Последовательность C**



# 8. Неопределённость измерений

## 8.1 Определение [VIM 2.26]

Неопределённость измерений – это неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, которые приписываются измеряемой величине на основании используемой информации.

## 8.2 Порядок выполнения

### 8.2.1 Модель измерений [VIM 2.48]

Определение неопределённости измерений осуществляется в основном в соответствии с последовательностью, описанной в документе DAkkS-DKD-3 [18], где следующие понятия и инструкции о порядке составления расчёта применяются при условии, что нет необходимости в учёте корреляции между входными величинами:

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Функция модели** | | | $y = f(x_1, x_2, ..., x_N)$ |
| **Стандартная неопределённость измерений** | $u(x_i)$ | Стандартная неопределённость измерений, приписываемая входной/влияющей величине | |
| | $c_i$ | Коэффициент чувствительности | $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ |
| | $u_i(y)$ | вклад в стандартную неопределённость, связанную с выходной величиной, обусловленный стандартной неопределённостью $u(x_i)$ входной/влияющей величины $x_i$ | $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$ |
| | $u(y)$ | Стандартная неопределённость измерений, приписываемая выходной величине | $u^2(y) = \sum_{i=1}^{N} u_i^2(y)$<br>$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} u_i^2(y)}$ |
| **Расширенная неопределённость измерений** | $U(y)$ | расширенная неопределённость измерений | $U(y) = k \cdot u(y)$ |
| | $k$ | Коэффициент расширения | $k = 2$<br>*для нормально распределённой измеряемой величины и вероятности покрытия приблизительно 95%* |

Если применяются относительные неопределённости измерений, то переменные величины *u*, *U* заменяются переменными *w*, *W*.

У комплексных моделей инструкция о порядке составления расчёта быстро приводит к ненаглядному аналитическому определению коэффициентов чувствительности, поэтому используют цифровое определение коэффициентов чувствительности с программной поддержкой.

Тем не менее наряду с этой общей инструкцией о порядке составления расчёта существуют два особых случая, которые приводят к коэффициенту чувствительности $c_i = \pm 1$ и тем самым к простому квадратичному сложению неопределённостей входной/влияющей величин. Это делает возможным простое определение неопределённости измерений без программной поддержки.

Примечание:
Само собой разумеется, что также „простая“ модель должна правильно отображать физический процесс измерения / калибровки. При необходимости сложные взаимосвязи должны быть представлены посредством подходящей модели (не особый случай) в дополнительном бюджете неопределённости (см. приложение A Оценка неопределённости измерений, связанной со значениями поршневого манометра при рабочих условиях).

### 8.2.2 Модель сумма / разность

$$Y = X + \sum_{i=1}^{N} \delta X_i \qquad (1)$$

$Y$ Выходная величина
$X$ Входная величина (величины)

$\delta X_i$ Влияющая величина (величины)

$E[\delta X_i] = 0$ Ожидаемое значение, [компоненты не участвуют в расчёте выходной величины (поправки не вводятся), тем не менее они вносят вклад в неопределённость измерений]

напр. модель для определения погрешности показаний:

$$\Delta p = p_{\text{показание}} - p_{\text{эталон}} + \sum_{i=l}^{N} \delta p_i \qquad (2)$$

Эта модель особенно подходит для объектов калибровки с собственной индикацией в единицах давления (напр. для манометра с пружиной Бурдона, электрического прибора для измерения давления). При этом неопределённости измерений также указываются в единице физической величины давления (паскаль, бар и т.д.).

### 8.2.3 Модель произведение / частное

$$Y = X \cdot \prod_{i=1}^{N} K_i \qquad (3)$$

$Y$ Выходная величина
$X$ Входная величина (величины)

$K_i = \left(1 + \frac{\delta X_i}{|X_i|}\right)$ Поправочный коэффициент (коэффициенты)

$\delta X_i$ Влияющая величина (величины)

$E[\delta X_i]=0;\ \ E[K_i]=1$ Ожидаемые значения, [компоненты не участвуют в расчёте выходной величины (поправки не вводятся), тем не менее они вносят вклад в неопределённость измерений]

напр. модель для нахождения коэффициента передачи датчика давления (тензометрического датчика):

$$S=\frac{X_{\text{выкл.}}}{X_{\text{вкл.}}}=\frac{U_{\text{показание}}/\left(G\cdot U_{\text{Sp}}\right)}{p_{\text{эталон}}}\prod_{i=1}^{N}K_i \tag{4}$$

Эта модель особенно подходит для объектов калибровки без собственной индикации (напр. преобразователя давления с электрическим выходным сигналом) с применением относительных неопределённостей измерения *w*, имеющих размерность равную 1 (безразмерное число или %).

### 8.2.4 Входные/влияющие величины

Различают два типа вычисления неопределённости измерений, связанной с входными / влияющими величинами:

Тип **A**: При вычислении значения и связанной с ним стандартной неопределённости измерений применяются аналитические методы статистики для серий измерений в условиях воспроизводимости ( $n \geq 10$ ).

Тип **B**: Вычисление значения и связанной с ним стандартной неопределённости измерений основывается на других научных выводах и может быть оценено на основании следующей информации:

- данных из предшествующих измерений
- опыта и общих знаний о свойствах и поведении измерительных инструментов и материалов
- указаний производителя
- сертификата калибровки или других сертификатов
- справочных данных из руководств

Во многих случаях для значения величины могут задаваться только верхний и нижний пределы $a_+$ и $a_-$, причём все значения являются одинаково вероятными в пределах границ. Такая ситуация может быть лучше всего описана прямоугольной плотностью вероятности.

При $$a_+ - a_- = 2a \tag{5}$$

получают оценку входной / влияющей величины

$$x_i=\frac{1}{2}\cdot\left(a_+ + a_-\right) \tag{6}$$

и связанную с ней стандартную неопределённость измерений

$$u\left(x_i\right)=\frac{a}{\sqrt{3}} \tag{7}$$

Если значения лежат с большой вероятностью в центре или на краю диапазона, то разумно принять треугольное или U-образное распределение.

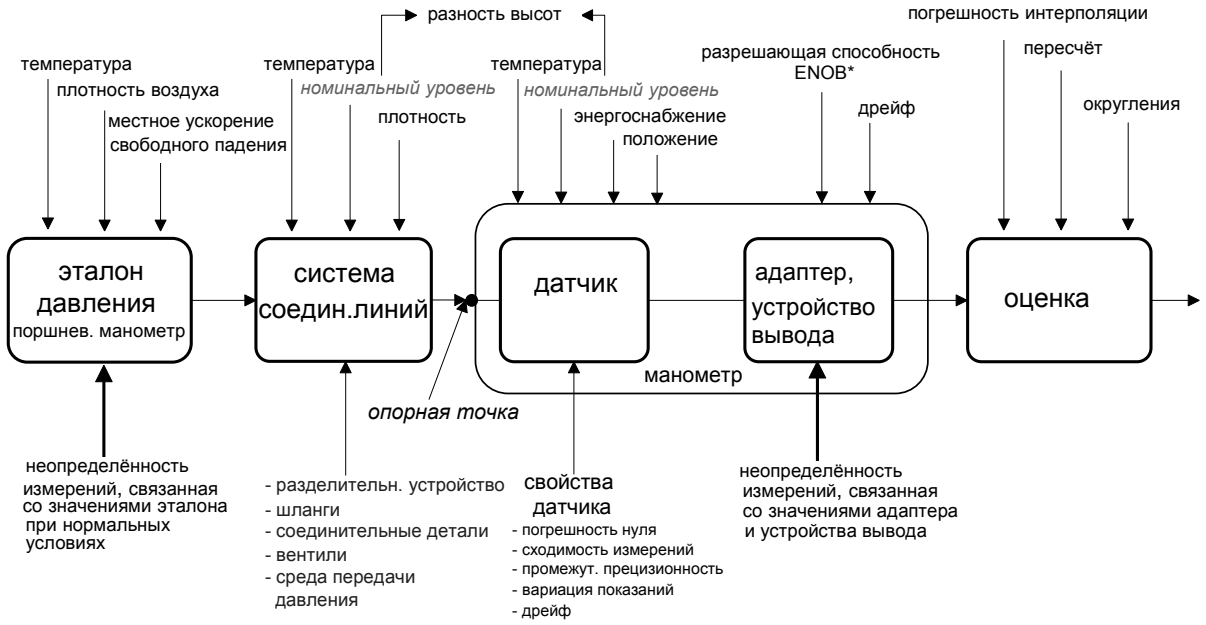
**Таблица 2:** Дальнейшие формы распределения типа B

| Форма распределения | Стандартная неопределённость измерений |
|---|---|
| нормальная | $u = \frac{U}{k}$ |
| треугольная | $u = \frac{a}{\sqrt{6}}$ |
| U-образная | $u = \frac{a}{\sqrt{2}}$ |
| и т.д. | |

### 8.2.5 Возможные влияющие величины, пример

При составлении модели неопределённости измерений рекомендуется графическое изображение влияющих величин. Следующее изображение показывает в качестве примера возможные влияющие величины при калибровке прибора для измерения давления поршневым манометром. Иллюстрация 3 показывает блок-схему прибора для измерения давления конструкции (3) из главы 4, иллюстрации 1.

**Иллюстрация 3:** влияющие величины при калибровке прибора для измерения давления




* ENOB … Эффективная разрядность (Effective Number of Bits)
*(Параметр АЦП / ЦАП, который характеризуют их действительную точность и мощность лучше, чем разрешающая способность.)*

Примечание:
При первом подходе иногда проще отнести влияющие величины следующим группам

- эталон
- метод
- объект калибровки.

Неопределённости измерений, связанные со значениями эталона, адаптера и устройства вывода берутся из сертификата калибровки (как правило, нормальное распределение, $k$ = 2). При использовании электрических приборов для измерения давления необходимо дополнительно оценить и при необходимости учесть в качестве составляющих неопределённости их долговременную стабильность, разрешающую способность и температурную зависимость.

## 8.3 Калибровка манометров с пружиной Бурдона

### 8.3.1 Модель измерений

Простая модель сумма / разница является, напр., подходящей для определения погрешности показания – отдельно для измеряемых значений в сторону нарастающего давления и для измеряемых значений в сторону падающего давления согласно методам калибровки (см. главу 7, табл. 1 или илл. 2):

$$\Delta p_{\text{вверх/вниз}} = p_{\text{показ.,вверх/вниз}} - p_{\text{эталон}} + \sum_{i=1}^{2} \delta p_i = p_{\text{показ.,вверх/вниз}} - p_{\text{эталон}} + \delta p_{\text{погрешность нуля}} + \delta p_{\text{сходимость измер.}} \quad (8)$$

| | | [3] | |
|---|---|---|---|
| $Y = \Delta p_{...}$ | Выходная величина; погрешность показания<br>Индекс ... означает вверх/вниз или среднее значение<br>(см. уравн. 8 и 9) | | |
| $X_1 = p_{\text{показ.}}$ | Показание прибора для измерения давления<br>Индекс ... означает вверх/вниз или среднее значение<br>(см. уравн. 8 и 9) | [4] | [5] |
| $X_2 = p_{\text{эталон}}$ | Значение исходного эталона[6] | | |
| $X_3 = \delta p_{\text{отклонение нуля}}$ | Влияющая величина „погрешность нуля“ | [7] | |
| $X_4 = \delta p_{\text{сходимость изм.}}$ | Влияющая величина „сходимость измерений“ | | |

и для средних значений из вверх и вниз измеренных значений:

$$\Delta p_{\text{средн}} = p_{\text{показ.,средн.}} - p_{\text{эталон}} + \sum_{i=1}^{3} \delta p_i = p_{\text{показ.,средн.}} - p_{\text{эталон}} + \delta p_{\text{погрешн.нуля}} + \delta p_{\text{сходим. изм.}} + \delta p_{\text{вариация показ.}} \quad (9)$$

$$p_{\text{показ.,средн.}} = \frac{p_{\text{показан.,вверх}} + p_{\text{показан.,вниз}}}{2} \quad (10)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $X_5 = \delta p_{\text{вариация показ.}}$ | Влияющая величина „вариация показаний“ | [7] | [5] |

[3] Выходная величина
[4] Входные величины
[5] Величины для нахождения неопределённости измерений
[6] Значение исходного эталона учитывает применение поршневого манометра при рабочих условиях (внесение поправок). Поэтому также бюджет неопределённости измерений содержит составляющие неопределённости поршневого манометра как при стандартных, так и при рабочих условиях. Вклад в бюджет неопределённости составляющих неопределённости при рабочих условиях (см. приложение A: „Оценка неопределённости измерений, связанной со значениями поршневого манометра при рабочих условиях“) определяется для влияний температуры, коэффициента линейного теплового расширения, ускорения свободного падения, плотности воздуха, коэффициента деформации (поршневого манометра) или для плотности, ускорения свободного падения, высоты (разности высот).
[7] Влияющие величины

При отдельном рассмотрении возрастающих и убывающих рядов расширенная неопределённость измерений ($k$ = 2) определяется по формуле:

$$U_{\text{вверх/вниз}} = k \cdot u_{\text{вверх/вниз}}$$

$$U_{\text{вверх/вниз}} = k \cdot \sqrt{u^2{}_{\text{эталон}} + u^2{}_{\text{разрешающ.способн.}} + u^2{}_{\text{погрешность нуля}} + u^2{}_{\text{сходимость измерен.}}} \quad (11)$$

и так называемый диапазон отклонений[8] с учётом систематической погрешности:

$$\mathrm{U'}_{\text{вверх/вниз}} = \mathrm{U}_{\text{вверх/вниз}} + \left|\Delta \mathrm{p}_{\text{вверх/вниз}}\right| \quad (12)$$

При применении средних значений из возрастающих и убывающих рядов расширенная неопределённость измерений ($k$ = 2) определяется по формуле:

$$U_{\text{средн.}} = k \cdot \sqrt{u^2{}_{\text{вверх/вниз}} + u^2{}_{\text{вариация показаний}}} \quad (13)$$

причём для расчёта неопределённости измерений $u_{\text{вверх/вниз}}$ берётся большее значение сходимости измерений.

Соответствующий диапазон отклонений определяется по формуле:

$$U'_{\text{средн.}} = U_{\text{средн.}} + \left|\Delta p_{\text{средн.}}\right| \quad (14)$$

[8] Диапазоном отклонений называют максимально ожидаемую разницу между измеренным значением и правильным значением измеряемой величины. Диапазон отклонений можно использовать для характеристики точности (англ. accuracy).

### 8.3.2 Бюджет неопределённости измерений

Информация относительно входных/влияющих величин приводится кратко и предпочтительно в таблице.

**Таблица 3:** Бюджет неопределённости для калибровки манометра с пружиной Бурдона

| № | Вели-чина | Наилуч-шая оценка | Ширина распре-деления | Распреде-ление вероятностей | Дели-тель | Стандартная неопреде-лённость измерений | Коэффи-циент чувстви-тельн. | Вклад в неопре-делённ. | Еди-ница[9] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_i$ | $x_i$ | $2a$ | $g_{X_i}(\xi_i)$ | | $u(x_i)$ | $c_i$ | $u_i(y)$ | |
| 1 | $p_{\text{показ.}}$ | $p_{i,\text{ показ.}}$ | $2r$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(r)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{2r}{2}\right)^2}$ | 1 | $u_r$ | бар |
| 2 | $p_{\text{эталон}}$ | $p_{\text{i, эталон}}$ | | нормальное | 2 | $u$ (эталон) | -1 | $u_{\text{эталон}}$ | бар |
| 3 | $\delta p_{\text{погрешн. нуля}}$ | 0 | $f_0$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(f_0)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$ | 1 | $u_{f_0}$ | бар |
| 4 | $\delta p_{\text{сходимость измерен.}}$ | 0 | $b'$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(b')=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{b'}{2}\right)^2}$ | 1 | $u_{b'}$ | бар |
| 5 | $\delta p_{\text{вариация показан.}}$ | 0 | $h$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(h)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{h}{2}\right)^2}$ | 1 | $u_h$ | бар |
| | $Y$ | $\Delta p_{...}$ | | | | | | $u(y)$ | бар |

[9] Рекомендуется указывать единицу составляющих неопределённости (единицу физической величины, единицу показания и т.д.).

### 8.3.3 Бюджет неопределённости измерений, относящийся к ступени нагрузки

Оценку неопределённости измерений необходимо выполнять для каждого калибровочного значения, т.е. для каждой ступени нагрузки. Для наглядного представления рекомендуется следующая таблица для возрастающих, убывающих и средних значений соответственно:

**Таблица 4:** Бюджет неопределённости измерений

| **Давление** | **Погрешность измерений** | **Стандартная неопределённость измерений *u*** | | | **Расширенная неопределённость измерений *U* (*k*=2)** | **Диапазон погрешности *U'*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Вклад 1 | ... | Вклад n | | |
| бар | бар | бар | | | бар | бар |
| мин. | | | | | | |
| ... | | | | | | |
| макс. | | | | | | |

### 8.3.4 Указание одного значения

Дополнительно к данным о диапазоне отклонений для каждой ступени нагрузки можно также предоставить клиенту данные о максимальном диапазоне отклонений в диапазоне калибровки (в единице давления относительно измеряемого значения или диапазона измерения). Также может быть подтверждено соответствие (см. стр. 31).

### 8.4 Калибровка электрических приборов для измерения давления

Модель измерений и бюджет неопределённости измерений для калибровки манометра с пружиной Бурдона могут быть применены и для калибровки электрического прибора для измерения давления (правильное числовое показание в единицах давления). При необходимости следует дополнительно учесть долю "промежуточной прецизионности измерений *b* при повторной установке“.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $X_6 = \delta p_{\text{промежут. прецизионность}}$ | Влияющая величина "промежуточная прецизионность измерений“ | 7 | 5 |

**Таблица 5:** Дополнительные компоненты при определении неопределённости измерений для калибровки электрического прибора для измерения давления

| № | Величина | Наилучшая оценка | Ширина распределения | Распределение вероятностей | Делитель | Стандартная неопределённость измерений | Коэффициент чувствительн. | Вклад в неопределённость | Единица |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_i$ | $x_i$ | $2a$ | $g_{X_i}(\xi_i)$ | | $u(x_i)$ | $c_i$ | $u_i(y)$ | |
| 6 | $\delta p_{\text{промежуточн. прецизионность}}$ | 0 | $b$ | прямоуг. | $\sqrt{3}$ | $u(b)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{b}{2}\right)^2}$ | 1 | $u_b$ | бар |

Расширенная неопределённость измерений ($k$ = 2) для возрастающих или убывающих рядов определяется следующим образом:

$$U_{\text{вверх/вниз}} = k \cdot u_{\text{вверх/вниз}}$$

$$U_{\text{вверх/вниз}} = k \cdot \sqrt{u^2_{\text{эталон}} + u^2_{\text{разреш.способн.}} + u^2_{\text{погрешн.нуля}} + u^2_{\text{сходимость измер.}} + u^2_{\text{промеж. прецизион.}}}$$

(15)

Соответствующий диапазон отклонений для возрастающих или убывающих рядов или расширенная неопределённость измерений и диапазон отклонений для среднего значения определяются по аналогии с процедурой нахождения, применяемой для манометра с пружиной Бурдона.

## 8.5 Калибровка датчиков давления и преобразователей давления с электрическим выходным сигналом

### 8.5.1 Модель измерений

Простая модель произведение / частное является, напр., подходящей для определения коэффициента передачи – отдельно для измеряемых значений в направлении возрастающего давления или для измеряемых значений в направлении убывающего давления:

$$S_{\text{вверх/вниз}} = \frac{X_{\text{выкл.,вверх/вниз}}}{X_{\text{вкл.}}} = \frac{U_{\text{показ.,вверх/вниз}}/(GU_{\text{Sp}})}{p_{\text{эталон}}} \prod_{i=1}^{3} K_i = \frac{U_{\text{показ.,вверх/вниз}}/(GU_{\text{Sp}})}{p_{\text{эталон}}} K_{\text{погрешн. нуля}} K_{\text{сходим. измер.}} K_{\text{промеж. прецизионность}} \quad (16)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $Y = S_{\dots}$ | Выходная величина; Коэффициент передачи<br>Индекс ... означает вверх/вниз или среднее значение<br>(см. уравн. 16 и 17) | 3 | |
| $X_1 = U_{\text{показ.,}\dots}$ | Показание устройства вывода (вольтметра)<br>Индекс ... означает вверх/вниз или среднее значение<br>(см. уравн. 16 и 17) | 4 | 5 |
| $X_2 = G$ | Коэффициент передачи адаптера (дополнительный усилитель) | | |
| $X_3 = U_{\text{Sp}}$ | Значение напряжения питания (вспомогательный прибор) | | |
| $X_4 = p_{\text{эталон}}$ | Значение исходного эталона | | |
| $X_5 = K_{\text{погрешность нуля}}$ | Поправочный коэффициент, обусловленный влияющей величиной „погрешность нуля“ | 7 | |
| $X_6 = K_{\text{сходимость измер.}}$ | Поправочный коэффициент, обусловленный влияющей величиной „сходимость измерений“ | | |
| $X_7 = K_{\text{промеж.прецизион.}}$ | При необходимости поправочный коэффициент, обусловленный влияющей величиной „промежуточная прецизионность измерений“ | | |

Для средних значений применяется:

$$S_{\text{сред.}} = \frac{X_{\text{выкл.,средн.}}}{X_{\text{вкл.}}} = \frac{U_{\text{показ.,средн.}}/(GU_{\text{Sp}})}{p_{\text{эталон}}} \prod_{i=1}^{3} K_i = \frac{U_{\text{показ.,средн.}}/(GU_{\text{Sp}})}{p_{\text{эталон}}} K_{\text{погрешн. нуля}} K_{\text{сходимость изм.}} K_{\text{промеж. прецизионность}} K_{\text{вариация показаний}} \quad (17)$$

| | | | |
|---|---|---|---|
| $X_8 = K_{\text{вариация показаний}}$ | Поправочный коэффициент, обусловленный влияющей величиной „вариация показаний“ | 7 | 5 |

При отдельном рассмотрении возрастающих и убывающих рядов относительная расширенная неопределённость измерений ($k$ = 2) определяется по формуле

$$W_{\text{вверх/вниз}} = k \cdot w_{\text{вверх/вниз}}$$

$$W_{\text{вверх/вниз}} = k \cdot \sqrt{w^2_{\text{эталон}} + w^2_{\text{устр.вывода}} + w^2_{\text{адаптер}} + w^2_{\text{вспомогат.прибор}} + w^2_{\text{погрешн.нуля}} + w^2_{\text{сходим.изм}} \left(+ w^2_{\text{промеж.прецизион.}}\right)} \quad (18)$$

а соответствующие диапазоны отклонений:

$$W'_{\text{вверх/вниз}} = W_{\text{вверх/вниз}} + \left|\frac{\Delta S_{\text{вверх/вниз}}}{S'}\right| \quad (19)$$

с систематической погрешностью

$$\Delta S_{\text{вверх/вниз}} = S_{\text{вверх/вниз}} - S' \quad (20)$$

где $S'$ представляет собой предпочтительно угловой коэффициент линейной функции наилучшего соответствия через все измеренные значения и нулевую точку выходного сигнала преобразователя давления.

При применении среднего значения из возрастающих и убывающих рядов относительная расширенная неопределённость измерений ($k$ = 2) определяется по формуле:

$$W_{\text{средн.}} = k \cdot \sqrt{w^2_{\text{вверх/вниз}} + w^2_{\text{вариация показаний}}} \quad (21)$$

где для вычисления неопределённости измерений $w_{\text{вверх/вниз}}$ берётся большее значение сходимости измерений.

Соответствующий диапазон отклонений определяется по формуле:

$$W'_{\text{средн.}} = W_{\text{средн.}} + \left|\frac{\Delta S_{\text{средн.}}}{S'}\right| \quad (22)$$

где

$$\Delta S_{\text{средн.}} = S_{\text{средн.}} - S' \quad (23)$$

(для $S'$ см. выше)

### 8.5.2 Бюджет неопределённости измерений

Информация относительно входных/влияющих величин приводится кратко и предпочтительно в таблице.

**Таблица 6:** Бюджет неопределённости измерения для калибровки преобразователя давления с электрическим выходным сигналом

| № | Величина | Лучшая оценка | Ширина распределен. | Распределение вероятност. | Делитель | Стандартная неопределённость измерений | Коэффициент чувствительн. | Вклад в неопределённость | Единица |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_i$ | $x_i$ | $2a$ | $g_{X_i}(\xi_i)$ | | $w(x_i)$ | $c_i$ | $w_i(y)$ | |
| 1 | $p_{\text{показ.}}$ | $p_{i,\text{ показ.}}$ | | нормальное | 2 | $w$ (устройство вывода) | 1 | $w_{\text{устройство вывода}}$ | # |
| 2 | $G$ | $G$ | | нормальное | 2 | $w$(адаптер) | -1 | $w_{\text{адаптер}}$ | # |
| 3 | $U_{\text{Sp}}$ | $U_{\text{Sp}}$ | | нормальное | 2 | $w$ (вспомог. прибор) | -1 | $w_{\text{вспомогат. прибор}}$ | # |
| 4 | $p_{\text{эталон}}$ | $p_{\text{i, эталон}}$ | | нормальное | 2 | $w$ (эталон) | -1 | $w_{\text{эталон}}$ | # |
| 5 | $K_{\text{погрешн. нуля}}$ | 1 | $f_0$ [10] | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $w(f_0)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$ | 1 | $w_{f_0}$ | # |
| 6 | $K_{\text{сходимость измерений}}$ | 1 | $b'$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $w(b')=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{b'}{2}\right)^2}$ | 1 | $w_{b'}$ | # |
| 7 | $K_{\text{промежуточ. прецизионн.}}$ | 1 | $b$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $w(b)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{b}{2}\right)^2}$ | 1 | $w_b$ | # |
| 8 | $K_{\text{вариация показаний}}$ | 1 | $h$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $w(h)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(\frac{h}{2}\right)^2}$ | 1 | $w_h$ | # |
| | $Y$ | $S_{...}$ | | | | | | $w(y)$ | # |

[10] Характеристические величины $f_0$, $b'$, $b$ и $h$ являются здесь относительными величинами, т.е. величинами, относящимися к измеряемому (показанному) значению, которые не определены при нулевом давлении.

### 8.5.3 Бюджет неопределённости измерений, относящийся к ступени нагрузки

Оценку неопределённости измерений необходимо выполнять для каждого калибровочного значения, т.е. для каждой ступени нагрузки. Для наглядного представления рекомендуется следующая таблица для возрастающих, убывающих и средних значений соответственно:

**Таблица 7:** Бюджет неопределённости измерений

| **Давление** | **Относ. стандартная неопределённость измерений *w*** | | | **Относ. расшир. неопределённость измерений *W*** ($k$=2) |
|---|---|---|---|---|
| | Вклад 1 | ... | Вклад *n* | |
| бар | # | | | # |
| мин. | | | | |
| ... | | | | |
| макс. | | | | |

### 8.5.4 Указание одного значения

Коэффициент передачи как угловой коэффициент линейной функции наилучшего соответствия

При применении датчика давления, как правило, работают не с разными коэффициентами передачи для отдельных ступеней нагрузки (= калибровочные давления), а с одним единственным коэффициентом передачи для всего диапазона калибровки. Предпочтительно, это угловой коэффициент линейной функции наилучшего соответствия, проведённой через все измеряемые значения и нулевую точку выходного сигнала датчика давления (выравнивание без свободного члена).

При применении этой характеристической величины датчика давления заключение о соответствии заменяет неопределённости измерений, связанные с отдельными измеренными значениями коэффициента передачи (ср. 9.1.3).

Для этого необходимо установить пределы спецификации. Это можно сделать исходя из результатов калибровки, рассчитав диапазоны отклонений согласно гл. 8.5.1 ("самоопределение соответствия"; установление на основании указаний производителя, см. ниже). При этом необходимо учитывать

- неопределённости измерений, связанные с отдельными измеряемыми значениями коэффициента передачи и
- отклонения этих значений от одного указанного значения коэффициента передачи.

Как правило, получают диапазоны отклонений, которые становятся меньше с возрастающим давлением. В качестве пределов спецификации может быть

- выбран максимально рассчитанный диапазон отклонений (в данном случае пределы спецификации представлены в диаграмме калибровки в виде прямых параллельно оси давления; ср. 9.2.2, Преобразователь давления с электрическим выходным сигналом, рисунок 5, верхние части изображения)

или

- выбрана подходящая кривая (напр. гиперболическая или полиномиальная), (ср. 9.2.2, Преобразователь давления с электрическим выходным сигналом, рисунок 5, нижние части изображения).

Примечание:
Применение пределов спецификации, зависящих от давления, не является обычной практикой. Тем не менее это позволяет указывать меньшие неопределённости измерений при измерении давления калиброванным прибором в верхней части диапазона измерений.

Для объектов калибровки с номинальной характеристической величиной (напр. 2 мВ/В), отрегулированной производителем, возможно также определить пределы спецификации из соответствующего допустимого отклонения характеристической величины. Однако в данном случае необходимо постоянно проверять, не превышают ли значения коэффициентов передачи, определённые при калибровке, включая связанные с ними неопределённости измерений и их систематические отклонения от одного указанного значения характеристической величины пределы спецификации.

## 8.6 Влияющие величины объекта калибровки для бюджета неопределённости

### 8.6.1 Разрешающая способность *r*

#### 8.6.1.1 Аналоговые показывающие устройства

Разрешающая способность аналогового показывающего устройства определяется из отношения ширины стрелки к межцентровому расстоянию между двумя соседними делениями шкалы (цена деления шкалы). Рекомендуется отношение 1/2, 1/5, 1/10. Если это отношение (т.е. оцениваемая доля цены деления шкалы) составляет 1/10, то расстояние между делениями шкалы должно составлять 2,5 мм или больше (ср. также DIN 43790).

Примечание:
Лучшая оценка аналогового показывающего устройства определяется визуальной интерполяцией. Самая маленькая оцениваемая доля цены деления шкалы – компонент интерполяции *r*, при котором измеренные значения могут быть различимы. Диапазон вариации для лучшей оценки *x* высчитывается, таким образом, по формуле $a_+ = x + r$ и $a_- = x - r$ с шириной прямоугольного распределения $2a = 2 \cdot r$.

#### 8.6.1.2 Цифровые показывающие устройства

Разрешающая способность соответствует цифровому шагу, если показание не меняется более чем на один цифровой шаг при ненагруженном приборе давления.

Примечание:
Для оценивания неопределённости измерений полуширине прямоугольного распределения присваивается половина значения разрешающей способности *a* = *r*/2.

#### 8.6.1.3 Колебание показаний

Если показание при ненагруженном приборе меняется на более чем ранее найденное значение разрешающей способности, то берётся разрешающая способность *r* с половиной диапазона колебания с дополнительно прибавленным одним цифровым шагом.

### 8.6.2 Погрешность нуля $f_0$

Нулевая точка (ненагруженный прибор для измерения давления, как правило, при атмосферном давлении) может быть установлена до каждого измерительного цикла, состоящего из возрастающих и убывающих рядов измерений. Её необходимо

регистрировать до и после каждого измерительного цикла. Считывание необходимо проводить при полной разгрузке.

У приборов для измерения избыточного давления с началом диапазона измерений, отличным от атмосферного давления (напр. от -1 бар до 9 бар) необходимо определить дрейф на нулевой точке.

У приборов для измерения абсолютного давления, у которых нулевая точка не находится в диапазоне калибровки, напр. у барометров, погрешность нуля не определяется.

Погрешность нуля вычисляется следующим образом:

$$f_0 = \max\left\{\left|x_{2,0} - x_{1,0}\right|, \left|x_{4,0} - x_{3,0}\right|, \left|x_{6,0} - x_{5,0}\right|\right\} \quad (24)$$

Индексы нумеруют измеренные значения *x*, считанные на нулевых точках рядов измерений M1-M6.

### 8.6.3 Сходимость измерений *b'*

Сходимость измерений при неизменном установочном положении рассчитывается исходя из разницы измеренных значений с отрегулированным нулевым сигналом соответствующих рядов измерений.

$$\begin{aligned} b'_{\text{вверх},j} &= \left|\left(x_{3,j} - x_{3,0}\right) - \left(x_{1,j} - x_{1,0}\right)\right| \\ b'_{\text{вниз},j} &= \left|\left(x_{4,j} - x_{3,0}\right) - \left(x_{2,j} - x_{1,0}\right)\right| \\ b'_{\text{средн.},j} &= \max\left\{b'_{\text{вверх},j},\ b'_{\text{вниз},j}\right\} \end{aligned} \quad (25)$$

Индекс *j* нуммирует номинальные значения давления (*j* = 0: нулевая точка).

### 8.6.4 Промежуточная прецизионность измерений *b*

Промежуточная прецизионность измерений при повторной установке и при неизменных условиях определяется исходя из разницы измеренных значений с отрегулированным нулевым сигналом соответствующих рядов измерений:

$$\begin{aligned} b_{\text{вверх},j} &= \left|\left(x_{5,j} - x_{5,0}\right) - \left(x_{1,j} - x_{1,0}\right)\right| \\ b_{\text{вниз},j} &= \left|\left(x_{6,j} - x_{5,0}\right) - \left(x_{2,j} - x_{1,0}\right)\right| \\ b_{\text{средн.},j} &= \max\left\{b_{\text{вверх},j}, b_{\text{desc},j}\right\} \end{aligned} \quad (26)$$

Относительно индекса *j* см. выше.

### 8.6.5 Вариация показаний *h*

При указании средних значений вариация показаний рассчитывается из разницы измеренных значений возрастающих и убывающих рядов с отрегулированным нулевым сигналом следующим образом:

$$h_{\text{средн.},\,j} = \frac{1}{n} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left| \left(x_{2,\,j} - x_{1,0}\right) - \left(x_{1,\,j} - x_{1,0}\right) \right| + \left| \left(x_{4,\,j} - x_{3,0}\right) - \left(x_{3,\,j} - x_{3,0}\right) \right| + \\ \left| \left(x_{6,\,j} - x_{5,0}\right) - \left(x_{5,\,j} - x_{5,0}\right) \right| \end{array} \right\} \qquad (27)$$

Относительно индекса *j* см. выше. Переменная *n* отображает число полных циклов измерений (один цикл состоит из одного возрастающего и одного убывающего ряда).

## 9. Оценка результатов измерений и данные в сертификате калибровки

Основные компоненты устройства для измерения давления получают по калибровочной отметке; на измерительных цепях каждый прибор получает калибровочную отметку.

Дополнительно к требованиям, изложенным в документе DAkkS-DKD-5 [12], в сертификате калибровки должны быть указаны следующие данные:

- метод калибровки (DKD-R 6-1 последовательность A, B, C или EN 837 часть 1 и 3)
- погрешность показания
- среда передачи давления
- опорная плоскость давления на объекте калибровки
- монтажное положение объекта калибровки при калибровке
- выбранные настройки на объекте калибровки

Сертификат калибровки должен содержать таблицу всех измеренных значений, напр.:

**Таблица 8:** Измеренные значения

| **Давление** на уровне опорной плоскости объекта калибровки $p$ | **Показанное значение** $p_{\text{показание}}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Последовательность калибровки A** | | | | **Измерение при 2-ом креплении** | |
| | **Последовательность калибровки B** | | | | | |
| | **Последовательность калибровки C** | | | | | |
| | M1 (вверх) | M2 (вниз) | M3 (вверх) | M4 (вниз) | M5 (вверх) | M6 (вниз) |
| бар, паскаль, ... | бар, паскаль, A, B, мВ/В, Гц, ... | | | | | |
| мин. | мин. | мин. | мин. | мин. | мин. | мин. |
| ↓ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ | ↓ | ↑ |
| макс. | макс. | макс. | макс. | макс. | макс. | макс. |

В колонке 1 приводятся измеренные значения давления эталона. В колонках 2-7 указываются соответствующие измеренные значения, показанные объектами

калибровки согласно иллюстрации 1 (манометр с пружиной Бурдона, электрический прибор для измерения давления, преобразователь давления с электрическим выходным сигналом) в единицах давления или выданные в других физических величинах (ток, напряжение, отношение напряжений, частота, …) или уже пересчитанные в величину давления.

Последующая оценка измеренных значений может охватывать следующие характеристические величины:

- средние значения
- погрешность нуля
- сходимость измерений
- при необходимости промежуточную прецизионность измерений
- вариацию показаний
- диапазон отклонений
- указание одного значения
- соответствие

## 9.1 Определение других характеристических величин

### 9.1.1 Средние значения $\bar{x}$

Средние значения $\overline{x_{i,j}}$ где *i* = вверх/вниз, среднее значение получают по формуле:

$$\overline{x_{\text{вверх,j}}} = \frac{1}{l} \cdot \sum_m \left(x_{m,j} - x_{m,0}\right) \qquad \text{для m = 1,3,5}$$

$$\overline{x_{\text{вниз,j}}} = \frac{1}{l} \cdot \sum_m \left(x_{m,j} - x_{(m-l),0}\right) \qquad \text{для m = 2,4,6}$$

$$\overline{x_{\text{средн.,j}}} = \frac{\overline{x_{\text{вверх,j}}} + \overline{x_{\text{вниз,j}}}}{2} \tag{28}$$

где переменная *l* указывает количество рядов измерений.

У приборов для измерения давления, у которых нулевая точка не включена в диапазон калибровки (напр. 800 мбар абс до 1200 мбар абс), коррекция нулевой точки при расчёте средних значений не требуется.

### 9.1.2 Диапазон отклонений *U'*

Диапазон отклонений определяется как сумма расширенной неопределённости измерений (*k* = 2) и величины систематической погрешности. Ввиду систематического компонента диапазону отклонений присваивается в качестве распределения прямоугольное распределение. Диапазон отклонений определяется в зависимости от требований для средних значений возрастающих и убывающих рядов и среднего значения:

напр.: $$U' = U + \left|\Delta p\right| \tag{29}$$

Соответственно определяется относительный диапазон отклонений *W'*.

напр.: $$W' = W + \left| \frac{\Delta S}{S'} \right| \quad (30)$$

Примечание:
см. сноску 8 на стр. 21

### 9.1.3 Соответствие

Если диапазоны отклонений или коэффициенты передачи со связанной с ними неопределённостью измерений лежат в рамках установленных пределов, то соответствие может быть подтверждено согласно DAkkS-DKD-5 [12]. При этом должен указываться их диапазон калибровки. При оценке соблюдения установленных пределов необходимо указать их источник, напр. специфические для производителя данные согласно техническому паспорту, требованиям заказчика и др.

## 9.2 Визуализация результата калибровки

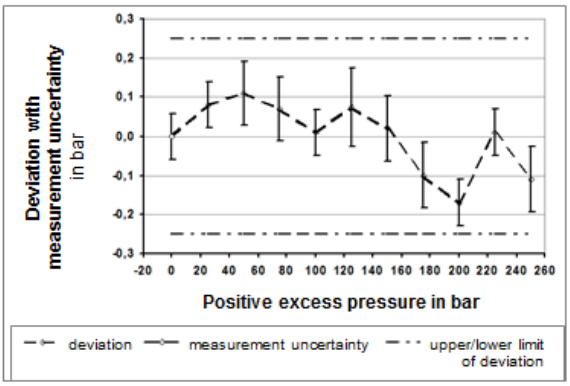
В целях лёгкого восприятия и быстрого получения общего представления результат калибровки может быть представлен графически.

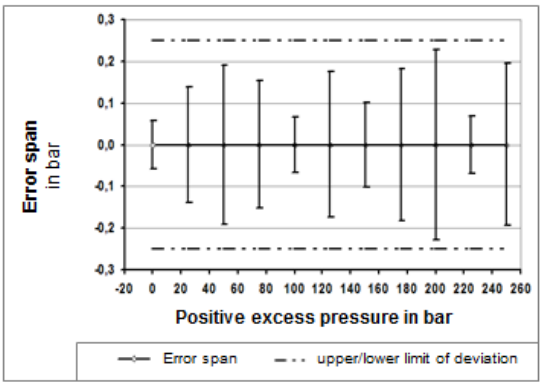
### 9.2.1 Манометр с пружиной Бурдона, электрический прибор для измерения давления:

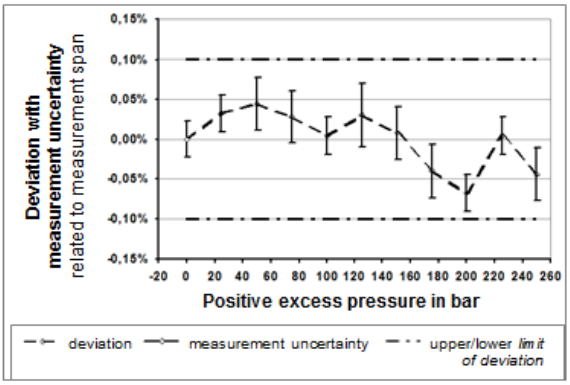
Систематическая погрешность с расширенной неопределённостью измерения или из неё результирующий диапазон отклонений должны быть представлены в сравнении с установленным пределом (= предел допускаемой погрешности) в единице физической величины и/или в качестве соотнесённой величины.

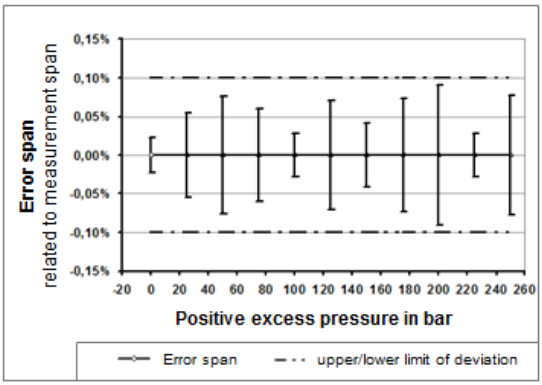
Соотнесённые характеристические величины могут быть при этом представлены в форме типичной для вида прибора (соотнесённые с диапазоном измерений, соотнесённые с измеренным значением).

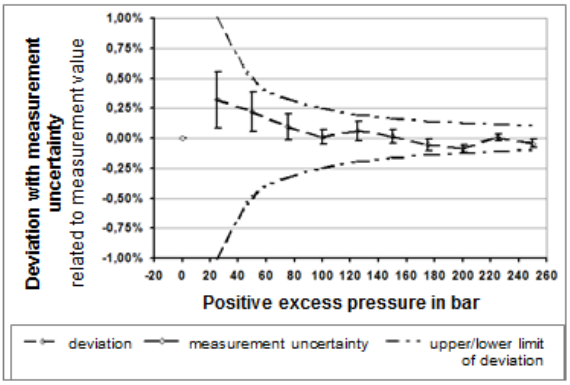
**Иллюстрация 4:** Визуализация результата калибровки для манометра с пружиной Бурдона или электрического прибора для измерения давления

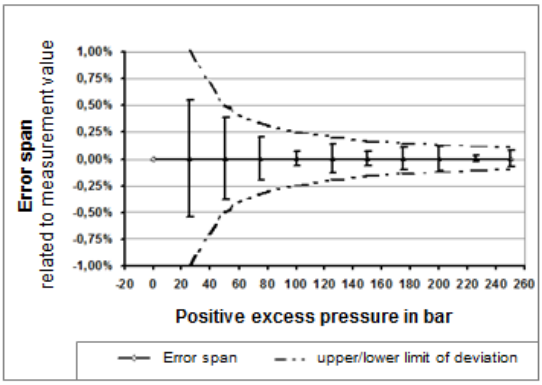


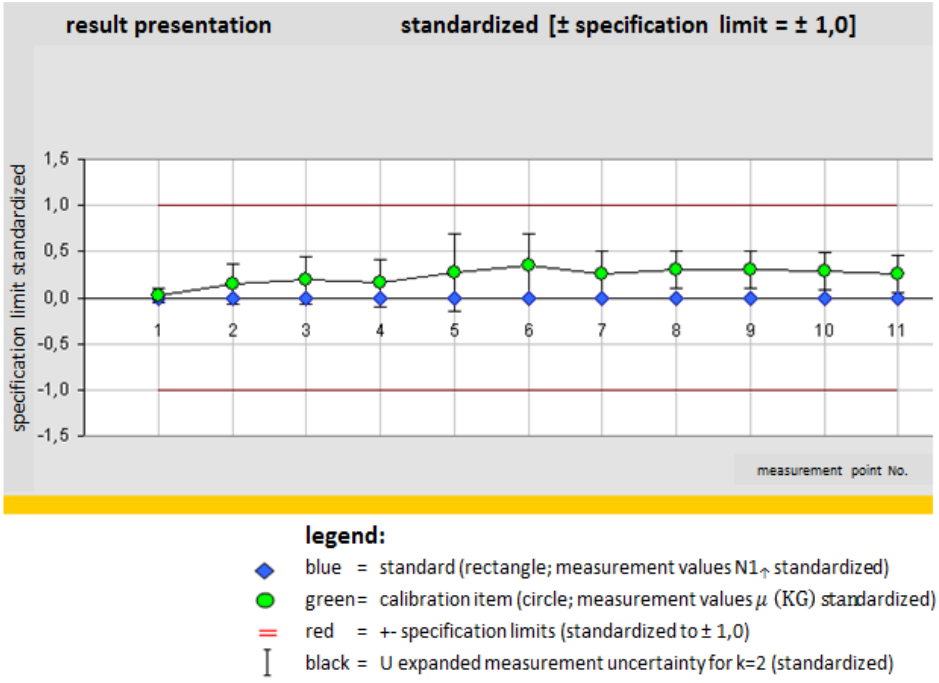




Текст диаграмм (перевод):
Deviation with measurement uncertainty in bar - погрешность с неопределённостью измерений в бар
Deviation with measurement uncertainty related to measurement span - погрешность с неопределённостью измерений относительно диапазона измерений
Deviation with measurement uncertainty related to measurement value - погрешность с неопределённостью измерений относительно измеренного значения
deviation - погрешность
measurement uncertainty - неопределённость измерений
upper/lower limit of deviation - верхний/нижний предел отклонения
Error span in bar - диапазон отклонений в бар
Error span related to measurement span - диапазон отклонений относительно диапазона измерений
Error span related to measurement value - диапазон отклонений относительно измеренного значения
Positive excess pressure in bar – положительное избыточное давление в бар

Для поддержки заключения о соответствии результаты могут быть представлены в нормированной форме (установленный предел = 100 %). Установленный предел может быть задан заказчиком или производителем.

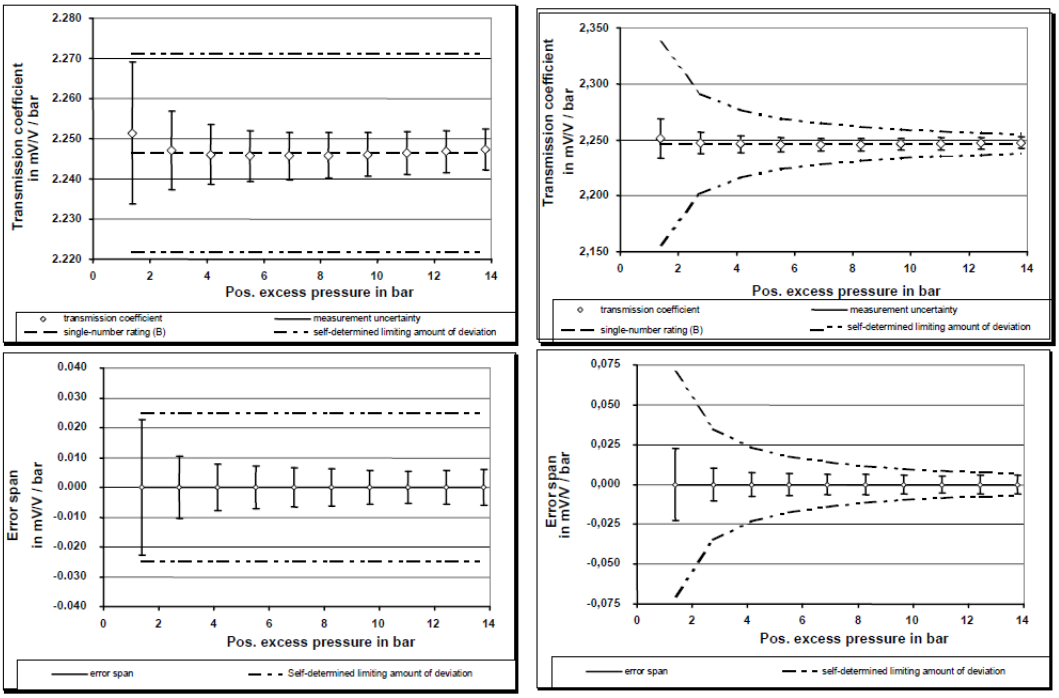



Текст диаграммы (перевод):
result presentation - изображение результата
standardized (± specification limit = ± 1,0) - нормирован (± предел спецификации = ± 1,0)
specification limit standardized - нормированный предел спецификации
measurement point No. - измерительная точка N°
legend - обозначения
blue = standard (rectangle; measurement values N1standardized) - синий = эталон (прямоугольник; измеренные значения N1 нормированы)
green = calibration item (circle; measurement values *μ* (KG) standardized) - зелёный = объект калибровки (круг; измеренные значения μ (объекта калибровки) нормированы)
red = +- specification limits (standardized to ± 1,0) - красный = +- пределы спецификации ( нормированы: ± 1,0)
black = U expanded measurement uncertainty for k=2 (standardized) - чёрный = U расширенная неопределённость измерений для k=2 (нормирована)

### 9.2.2 Преобразователь давления с электрическим выходным сигналом

Коэффициенты передачи и связанные с ними неопределённости измерений представляются в сравнении с установленными пределами (пределами допускаемой погрешности согласно данным производителя или самоопределяемыми пределами).

**Иллюстрация 5:** Визуализация результата калибровки для преобразователя давления с электрическим выходным сигналом




Текст диаграмм (перевод):
transmission coefficient in mV/V / bar – коэффициент передачи в мВ/В / бар
Pos. excess pressure in bar – положительное избыточное давление в бар
single-number rating (B) – указание одного значения
meausurement uncertainty – неопределённость измерений
self-determined limiting amount of deviation – самоопределяемый предел погрешности
Error span in mV/V / bar – диапазон отклонений в мВ/В / бар

## 9.3 Предельные значения для выражения неопределённости измерений

Для всех последовательностей калибровки (A, B, C) неопределённость измерений и диапазон отклонений рассчитываются согласно разделу 8.

Тем не менее независимо от результата калибровки неопределённость измерений указывается

| | | | |
|---|---|---|---|
| при | последовательности B | не меньше чем | 0,04 % диапазона измерений |
| и при | последовательности C | не меньше чем | 0,30 % диапазона измерений. |

При указании диапазона отклонений в заключении о соответствии согласно DAkkS-DKD-5 должно быть указано значение

| | | | |
|---|---|---|---|
| при | последовательности B | не меньше чем | 0,06 % диапазона измерений |
| и при | последовательности C | не меньше чем | 0,60 % диапазона измерений. |

При последовательности калибровки A эти предельные значения не учитываются для неопределённости измерений и диапазона отклонений. Они указываются как фактически полученные.

У измерительных приборов, для которых указаны спецификации измеренного значения или комбинированные спецификации, предельные значения должны применяться с использованием установленного предела на конечном значении диапазона измерений.

## 10. Дополнительные регламенты и стандарты

При калибровке приборов для измерения давления должны по возможности соблюдаться ниже приведённые регламенты. По договорённости калибровка может также проводиться в соответствии с отдельными разделами некоторых этих регламентов.

[1] DIN EN 837 T1
Druckmessgeräte mit Rohrfedern
Maße, Messtechnik, Anforderungen und Prüfung
Ausgabe Februar 1997
DIN EN 837 Часть 1
Манометры с трубчатой пружиной Бурдона. Размеры, метрология, требования и испытания. Издание: февраль 1997 г.

[2] DIN EN 837 T3
Druckmessgeräte mit Platten- und Kapselfedern
Maße, Messtechnik, Anforderungen und Prüfung
Ausgabe Februar 1997
DIN EN 837 Часть 3
Манометры с пластинчатой и капсульной пружиной. Размеры, метрология, требования и испытания. Издание: февраль 1997 г.

[3] DIN 16086
Elektrische Druckmessgeräte
Druckaufnehmer, Druckmessumformer, Druckmessgeräte
Begriffe und Angaben in Datenblättern
Ausgabe Januar 2006
Измерительные инструменты давления электрические. Датчики давления, манометры. Понятия, технические условия на таблицы технических данных. Издание: январь 2006 г.

[4] DIN 43790
Grundregeln für die Gestaltung von Strichskalen und Zeigern
Ausgabe Januar 1991
Шкалы со штриховыми делениями и стрелки. Основные правила конструирования. Издание: январь 1991 г.

[5] EURAMET cg-3
Calibration of Pressure Balances
Version 1.0 (03/2011)
Калибровка грузопоршневых манометров
Версия 1.0 (03/2011)
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[6] EURAMET cg-17
Guideline on the Calibration of Electromechanical Manometers
Version 2.0 (03/2011)
Руководство по калибровке электромеханических манометров
Версия 2.0 (03/2011)
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

**Общие положения**

[8] JCGM 200:2008
International vocabulary of metrology -- Basic and general concepts and associated terms (VIM) (identisch mit ISO/IEC Guide 99:2007)
JCGM 200:2008 Corrigendum (2010)
http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html
Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM) (идентичен документу ISO/IEC Guide 99:2007)
JCGM 200:2008 Поправка (2010)

[9] DIN: 2010
Internationales Wörterbuch der Metrologie -- Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) - Deutsch-Englische Fassung ISO/IEC-Leitfaden 99:2007. Auflage 2012.
Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM). Немецко-английская версия документа ISO/IEC- Guide 99:2007. Издание: 2012 г.

[10] DIN 1319-1: 1996
Grundlagen der Messtechnik Teil 1: Grundbegriffe
Метрология. Основные понятия. Часть 1. Основные термины

[11] DIN 1319-2: 1999
Grundlagen der Messtechnik Teil 2: Begriffe für die Anwendung von Messgeräten
Метрология. Основные понятия. Часть 2. Терминология, относящиеся к измерительному оборудованию

[12] DAkkS-DKD-5: 2010
Anleitung zum Erstellen eines Kalibrierscheins DAkkS, 1. Neuauflage
Инструкция по оформлению сертификата калибровки DAkkS, 1-е переиздание (прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

## Неопределённость измерений

[13] JCGM 100:2008
Evaluation of measurement data -- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) (identisch mit ISO/IEC Guide 98-3:2008)
http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html
Оценивание данных измерений. Руководство по выражению неопределённости измерения (GUM) (идентичен документу ISO/IEC Guide 98-3:2008)

[14] JCGM 101:2008
Evaluation of measurement data -- Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" -- Propagation of distributions using a Monte Carlo method (identisch mit ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008)
http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html
Оценивание данных измерений. Дополнение 1 к "Руководству по выражению неопределённости измерения". Распространение распределений с использованием метода Монте-Карло (идентичен документу ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008).

[15] JCGM 104:2009
Evaluation of measurement data -- An introduction to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" and related documents (identisch mit ISO/IEC Guide 98-1:2009)
http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html
Оценивание данных измерений. Введение к "Руководству по выражению неопределённости измерения" и сопутствующим документам. (идентичен документу ISO/IEC Guide 98-1:2009)

[16] EA-4/02:1999
Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration -- including supplement 1 and 2

European co-operation for Accreditation
http://www.european-accreditation.org/content/publications/pub.htm

Выражение неопределённости измерений при калибровках, включая дополнения 1 и 2. Европейское сообщество по аккредитации.

[17] DIN V ENV 13005:1999 — Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
Beuth Verlag Berlin

Руководство для выражения погрешности при измерении.
Изд. Beuth Verlag Berlin

[18] DAkkS-DKD-3:2010 — Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen
1. Neuauflage, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
http://www.dakks.de/doc_kalibrier

Выражение неопределённости измерений при калибровках. 1-е переиздание, Немецкий орган по аккредитации Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[19] DAkkS-DKD-3-E1:2010 — Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Ergänzung 1, Beispiele, 1. Neuauflage, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
http://www.dakks.de/doc_kalibrier

Выражение неопределённости измерений при калибровках, дополнение 1, примеры, 1-е переиздание, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[20] DAkkS-DKD-3-E2:2010 — Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen, Ergänzung 2, Beispiele, 1. Neuauflage, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
http://www.dakks.de/doc_kalibrier

Выражение неопределённости измерений при калибровках, дополнение 2, примеры, 1-е переиздание, Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[21] DIN 1319-3:1996 — Grundlagen der Messtechnik
Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit
Beuth Verlag Berlin

Метрология. Основные понятия. Часть 3. Понятия, связанные с погрешностями и оценкой результатов измерений.
Изд. Beuth Verlag Berlin

[22] DIN 1319-4:1999 — Grundlagen der Messtechnik
Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit
Beuth Verlag Berlin

Метрология. Основные понятия. Часть 4. Оценка погрешностей измерения. Изд. Beuth Verlag Berlin

## Список литературы

[23] Weise, K., Wöger, W.: Messunsicherheit und Messdatenauswertung, VCH Weinheim, 1999, ISBN 3-527-29610-7

Вайзе, К., Вёгер, В. Неопределённость измерений и оценивание данных измерений. Изд. VCH, Вайнхайм, 1999, ISBN 3-527-29610-7 (прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[24] Adunka, F.: Messunsicherheiten – Theorie und Praxis, Vulkan-Verlag Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-2205-9
Адунка, Ф. Неопределённости измерений. Теория и практика. Изд. Vulkan-Verlag Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-2205-9 (прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[25] Sonderdruck aus Heft 3 und Heft 4 der PTB-Mitteilungen 111 (2001)
Специальное издание из выпусков 3 и 4 журнала PTB-Mitteilungen 111 (2001)
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[26] VDI-Berichte 1805, 1867, 1947 u. Tagungsband 2008: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen, VDI/VDE-Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik, Tagungen:
20.-21.11.2003 und 30.11.-01.12.2004 in Oberhof/Thüringen
14.11.-15.11.2006 und 12.-13.11.2008 in Erfurt
VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2003/2004/2006 und VDI Wissensforum 2008
Доклады Союза инженеров Германии (VDI) 1805, 1867, 1947 и сборник материалов конференции 2008. Определение неопределённости измерений на практике. VDI/VDE- Общество по измерительной и автоматической аппаратуре.
Конференции:
20.-21.11.2003 и 30.11.-01.12.2004 в Оберхофе/Тюрингии
14.11.-15.11.2006 und 12.-13.11.2008 в Эрфурте
Изд. VDI Verlag GmbH, Дюссельдорф, 2003/2004/2006 и VDI Wissensforum 2008
(прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

[27] Themenhefte Messunsicherheit: tm Technisches Messen, 2/2004 und 5/2005
Тематическая серия публикаций по неопределённости измерений: tm Technisches Messen, 2/2004 и 5/2005 (прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

## Приложение A Оценка неопределённости измерений, связанной со значениями поршневого манометра при рабочих условиях[11]

Для поршневого манометра при стандартных условиях значения и связанная с ними расширенная неопределённость измерений $U_{\text{эталон,Std}}$ берутся из сертификата калибровки (напр. выданным ПТБ). Применяя прибор при рабочих условиях необходимо внести поправки к значениям, относящимся к соответствующим влияющим величинам; к этим поправкам, в свою очередь, необходимо приписать неопределённость измерений.

**Модель измерений[12]:**

$$p_e = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \cdot g \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{m,i}}\right)}{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p) \cdot \left[1 + (\alpha + \beta) \cdot (t - 20°\text{C})\right]} + \Delta\rho \cdot g \cdot h \tag{31}$$

$$\Delta\rho = \rho_{Fl} - \rho_a \tag{32}$$

**Бюджет неопределённости измерений**

со значимыми для значения давления эталона влияющими величинами: температурой, коэффициентом линейного теплового расширения для поршня и цилиндра, ускорением свободного падения и коэффициентом деформации. Коэффициенты чувствительности рассчитывались с характерными для практического применения приближениями и для наиболее распространённого случая $\alpha = \beta$.

**Таблица A1:** Частичный бюджет неопределённости измерений для поправки значений давления поршневого манометра

| Величина $X_i$ | Наилуч. оценка $x_i$ | Полуширина $a$ | Распределение вероятност. $g_{X_i}(\xi_i)$ | Делитель | Стандартная неопределённость измерений $u(x_i)$ | Коэффициент чувствительности $c_i$ | Вклад в неопределённость измерений $u_i(y)$ | Единица |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| температура | $t_K$ | $a_t$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(t) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_t^2}$ | $c_t = -2 \cdot \alpha \cdot p$ | $u_t = c_t \cdot u(t)$ | бар |
| коэффиц. линейного теплового расширен. | $\alpha + \beta$ | $a_\alpha$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_\alpha^2}$ | $c_\alpha = -2 \cdot (t - 20°\text{C}) \cdot p$ | $u_\alpha = c_\alpha \cdot u(\alpha)$ | бар |
| ускорение свободного падения | $g$ | $a_g$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(g) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_g^2}$ | $c_g = \frac{p}{g}$ | $u_g = c_g \cdot u(g)$ | бар |
| коэффиц. деформац. | $\lambda$ | $a_\lambda$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot a_\lambda^2}$ | $c_\lambda = -p^2$ | $u_\lambda = c_\lambda \cdot u(\lambda)$ | бар |
| $Y$ | $y$ | | | | | $u_{\text{korr1}} = \sqrt{u_t^2 + u_\alpha^2 + u_g^2 + u_\lambda^2}$ | | бар |

[11] см. [7] на стр. 19

[12] смотри также EURAMET cg-3; приложение C

Примечание:
1. В сертификате калибровки, выданным ПТБ для поршневых манометров, вклад неопределённости числового значения коэффициента деформации, как правило, уже учитывается в неопределённости измерения давления при рекомендуемой температуре.
2. С портативными измерительными приборами возможно измерение местного ускорения свободного падения в определённом месте с относительной неопределённостью в несколько ppm. При наличии такого точного значения, а также ввиду в большинстве случаев наибольшей относительной неопределённости значения площади поперечного сечения, допустимо пренебречь вкладом в неопределённость от ускорения свободного падения.
3. По отношению к действующей в вакууме силе инерции $g \cdot m$ поправка на плавучесть составляет порядка $1{,}5 \cdot 10^{-4}$. Изменения плотности воздуха, обусловленные погодой, в определённом месте, не превышают, как правило, 2 %, что соответствует относительному вкладу в неопределённость измерений в 3 ppm. В сравнении с неопределённостью площади поперечного сечения в 50 ppm, указанной, как правило, в сертификате калибровки, данной составляющей можно пренебречь, так как обычно метрологические затраты для её определения не оправдываются (ср. главу 6 „Условия окружающей среды“, примечание).

## Бюджет неопределённости

со значимыми влияющими величинами при определении гидростатического давления из-за разницы высот

**Таблица A2:** Частичный бюджет неопределённости измерений со значимыми влияющими величинами при определении гидростатического давления из-за разницы высот

| Величина $X_i$ | Наилучшая оценка $x_i$ | Полуширина $a$ | Распределение вероятност. $g_{X_i}(\xi_i)$ | Делитель | Стандартная неопределённость измерений $u(x_i)$ | Коэффициент чувствительности $c_i$ | Вклад в неопределённость измерений $u_i(y)$ | Единица |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Определение разницы плотностей | $\Delta\rho$ | $a_{\rho_{Fl}}$<br>$a_{\rho_a}$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(\Delta\rho)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot\left(a_{\rho_{Fl}}^2+a_{\rho_a}^2\right)}$ | $c_{\Delta\rho}=g\cdot h$ | $u_{\Delta\rho}=c_{\Delta\rho}\cdot u(\Delta\rho)$ | бар |
| Определение ускорения свободного падения | $g$ | $a_g$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(g)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot a_g^2}$ | $c_g=\Delta\rho\cdot h$ | $u_g=c_g\cdot u(g)$ | бар |
| Определение разницы высот | $h$ | $a_h$ | прямоугол. | $\sqrt{3}$ | $u(h)=\sqrt{\frac{1}{3}\cdot a_h^2}$ | $c_h=\Delta\rho\cdot g$ | $u_h=c_h\cdot u(h)$ | бар |
| $Y$ | $y$ | | | | | $u_{korr2}=\sqrt{u_{\Delta\rho}^2+u_g^2+u_h^2}$ | | бар |

Расширенная неопределённость измерений ($k$ = 2) для значений, показанных поршневым манометром при рабочих условиях:

$$U_{\text{эталон,Anw}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{эталонl,Std}}^2 + u_{\text{попр1}}^2 + u_{\text{попр2}}^2} \qquad (33)$$

Примечание:
Наряду с поправками, введёнными здесь в качестве примера, следует при необходимости учитывать дополнительные поправки, а также связанные с ними вклады в неопределённость измерений, напр. неопределённость измерения давления остаточного газа для поршневых манометров абсолютного давления или зависимость плотности передающей среды от давления при измерении гидравлического давления.

## Приложение B Пример. Бюджет неопределённости измерений для калибровки манометра с пружиной Бурдона

Затраты на калибровку согласно последовательности калибровки C
Показание среднего значения ( $\bar{p}$ ) с погрешностью измерений ( $\Delta p$ ) и вариацией показаний ($h$)

Объект калибровки

Прибор для измерения избыточного давления с упругим чувствительным элементом (манометр с пружиной Бурдона)
Заданный предел точности производителя: DIN Kl. 1,0
Цена деления шкалы : 0,5 бар (с возможностью оценки пятой части)

Образцовый прибор

Название : xxx
Расш. неопределённость измерений : $1 \cdot 10^{-4} \cdot p$; но не меньше чем 0,4 мбар

Условия калибровки

Передающая среда : очищенный азот
$\rho_{Fl(20°C,1бар)}$ : 1,15 кг/м³
$\Delta h$ : (0 ± 0,005) м
$t_{amb}$ : (21,6 ± 1,0) °C
$p_{amb}$ : (990 ± 1) мбар

**Таблица B1:** Результат

| **Давление** на уровне опорной плоскости объекта калибровки | **Считывание на объекте калибровки** | | **Среднее значение** | **Погреш-ность измерений** | **Вариация показаний** | **Расшир. неопред. измерений** ($k$ = 2) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $P_{эталон}$ | $P_{показание}$ | | $\bar{p}$ | $\Delta p$ | $h$ | $U$ |
| | M1 (вверх) | M2 (вниз) | (M1+M2)/2 | $\bar{p} - p_{эталон}$ | \|M2-M1\| | |
| бар | бар | бар | бар | бар | бар | бар |
| 0,00 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,12 |
| 12,02 | 12,1 | 12,2 | 12,2 | 0,1 | 0,1 | 0,13 |
| 24,03 | 24,2 | 24,2 | 24,2 | 0,2 | 0,0 | 0,12 |
| 36,04 | 36,1 | 36,2 | 36,2 | 0,1 | 0,1 | 0,13 |
| 48,04 | 48,1 | 48,1 | 48,1 | 0,1 | 0,0 | 0,12 |
| 60,05 | 60,0 | 60,1 | 60,1 | 0,0 | 0,1 | 0,13 |

**Таблица B2:** Бюджет неопределённости для ступени нагрузки $p$ = 60,05 бар

| Величина | Наилучшая оценка | Ширина расрпределения | Делитель | Стандартная неопределённость измер. | Коэффициент чувствительности | Составляющая неопределён. | Дисперсия |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_i$ | $x_i$ | $2a$ | | $u(x_i)$ | $c_i$ | $u_i(y)$ | $u^2$ |
| | | | | | | бар | бар² |
| $p_{эталон}$ | 60,05 бар | | 2 | 3,00·10⁻³ бар | -1 | 3,00·10⁻³ | 9,02·10⁻⁶ |
| $p_{эталон,\,t}$ * | 0,999997 | 2 K | $\sqrt{3}$ | 5,77·10⁻¹ K | -1,32·10⁻³ бар/K | 7,63·10⁻⁴ | 5,82·10⁻⁷ |
| $p_{эталон,\,h}$ ** | 0 | 1,0·10⁻² м | $\sqrt{3}$ | 2,89·10⁻³ м | -6,89·10⁻³ бар/м | 1,99·10⁻⁵ | 3,95·10⁻¹⁰ |
| $p_{показание}$ | 60,05 бар | 0,1 бар | $\sqrt{3}$ | 5,77·10⁻² бар | 1 | 5,77·10⁻² | 3,33·10⁻³ |
| $\delta p_{погрешность\ нуля}$ | 0 | 0,0 бар | $\sqrt{3}$ | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $\delta p_{сходимость\ измерений}$ | 0 | 0,0 бар | $\sqrt{3}$ | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $\delta p_{вариация\ показаний}$ | 0 | 0,1 бар | $\sqrt{3}$ | 2,89·10⁻² бар | 1 | 2,89·10⁻² | 8,33·10⁻⁴ |
| $\Delta p$ | 0,00 бар | Станд. неопределённость измер. $u$ или дисперсия $u^2$ | | | | 6,46·10⁻² | $\sum u_i^2 = 4{,}17 \cdot 10^{-3}$ |
| $\Delta p$ | 0,00 бар | Расшир. неопределённость измер. $U = k \cdot u$ ($k$ = 2) | | | | **0,13 бар** | |

* С учётом зависящего от температуры коэффициента линейного расширения площади системы поршень-цилиндр ($\alpha$+$\beta$)

** С учётом зависящей от давления плотности газа (приближение)

$$\rho_{p,t} = \rho_{20°C,1bar} \cdot \left[ \frac{p_{abs} \cdot (T + 20\,K)}{1\,bar \cdot (T + t)} \right]$$

где $T$ = 273,15 K

Для поправки давлений, показанных образцовым прибором, использовались следующие данные (расчёт согласно приложению A):

| | |
|---|---|
| $t_K$ | : (21,6 ± 1,0) °C |
| $g$ | : (9,812533 ± 0,000020) m·s⁻² |
| $\alpha$+$\beta$ | : (22,0 ± 1,1)·10⁻⁶ K⁻¹ |

Примечание:
Расчётная расширенная неопределённость измерений $U$ = 0,13 бар для ступени нагрузки $p$ = 60,05 бар соответствует относительной расширенной неопределённости в $W$ = 0,22 %. В соответствии с главой 9.3 „Предельные значения для указанных неопределённостей измерений“ значение, указанное в сертификате калибровки для калибровки с последовательностью C (сходимость измерений и промежуточная прецизионность измерений не могут быть определены), не должно быть меньше, чем значение в $W$ = 0,30 %, что соответствует расширенной неопределённости измерений в ***U* = 0,18 бар.**

## Приложение C Пример.
## Бюджет неопределённости измерений для калибровки цифрового электрического прибора для измерения давления

Затраты на калибровку согласно последовательности калибровки B
Показание среднего значения ( $\bar{p}$ ) с погрешностью измерений ( $\Delta p$ ), сходимостью измерения ($b'$) и вариацией показаний ($h$)
Электрический прибор для измерения давления с подавленным нулём

Объект калибровки

Электрический прибор для измерения давления с подавленным нулём
Заданный предел точности производителя : 0,03 % от измеренного значения
Разрешающая способность : 0,001 мбар

Образцовый прибор

Название : xxx
Расш. неопределённость измер.(эталон) : $1 \cdot 10^{-4} \cdot p$ но не меньше, чем 0,005 мбар

Условия калибровки

Передающая среда : воздух
$\rho_{Fl(20°C,1bar)}$ : 1,19 кг/м³
$\Delta h$ : (0 ± 0,005) м
$t_{amb}$ : (21,6 ± 1,0) °C
$p_{amb}$ : (990 ± 1) мбар

**Таблица C1**: Результат

| **Давление** на уровне опорной плоскости объекта калибровки $P_{эталон}$ | **Считывание на объекте калибровки** $P_{показание}$ | | | **Среднее значение** $\bar{p}$ | **Погрешность измерений** $\Delta p$ | **Сходимость измерений** $b'$ | **Вариация показаний** $h$ | **Расшир. неопред. измерений** ($k$ = 2) $U$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | M1 (вверх) | M2 (вниз) | M3 (вверх) | ((M1+M3)/2+M2)/2 | $\bar{p} - p_{эталон}$ | (M3-M1) | (M2-M1) | |
| мбар | мбар | мбар | мбар | мбар | мбар | мбар | мбар | мбар |
| 50,085 | 49,850 | 49,861 | 49,834 | 49,852 | -0,233 | 0,016 | 0,011 | 0,024 |
| 130,191 | 129,984 | 130,007 | 129,967 | 129,991 | -0,200 | 0,017 | 0,023 | 0,029 |
| 330,460 | 330,301 | 330,335 | 330,284 | 330,314 | -0,146 | 0,017 | 0,034 | 0,045 |
| 530,731 | 530,616 | 530,654 | 530,600 | 530,631 | -0,100 | 0,016 | 0,038 | 0,063 |
| 730,990 | 730,892 | 730,933 | 730,879 | 730,909 | -0,081 | 0,013 | 0,041 | 0,082 |
| 931,272 | 931,184 | 931,226 | 931,172 | 931,202 | -0,070 | 0,012 | 0,042 | 0,10 |
| 1131,138 | 1131,050 | 1131,094 | 1131,046 | 1131,071 | -0,067 | 0,004 | 0,044 | 0,12 |
| 1331,413 | 1331,330 | 1331,359 | 1331,337 | 1331,346 | -0,067 | 0,007 | 0,029 | 0,14 |
| 1531,673 | 1531,630 | 1531,656 | 1531,629 | 1531,643 | -0,030 | 0,001 | 0,026 | 0,16 |

**Таблица C2:** Бюджет неопределённости для ступени нагрузки $p$ = 1531,673 мбар

| Величина | Наилучшая оценка | Ширина распределения | Делитель | Стандартная неопределённость измер. | Коэффициент чувствительности | Вклад в неопределённость измерен. | Дисперсия |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $X_i$ | $x_i$ | $2a$ | | $u(x_i)$ | $c_i$ | $u_i(y)$ | $u^2$ |
| | | | | | | мбар | мбар² |
| $p_{\text{эталон}}$ | 1531,673 мбар | | 2 | 7,66·10⁻² мбар | -1 | 7,66·10⁻² | 5,87·10⁻³ |
| $p_{\text{эталон, t}}$ * | 0,999997 | 2 K | $\sqrt{3}$ | 5,77·10⁻¹ K | -3,37·10⁻² мбар /K | 1,95·10⁻² | 3,78·10⁻⁴ |
| $p_{\text{эталон, остаточный газ}}$ | 0 | | 2 | 1,00·10⁻² мбар | 1 | 1,00·10⁻² | 1,00·10⁻⁴ |
| $p_{\text{эталон, }h}$ ** | 0 | 1,0·10⁻² м | $\sqrt{3}$ | 2,89·10⁻³ м | -1,79·10⁻¹ мбар/м | 5,17·10⁻⁴ | 2,66·10⁻⁷ |
| $p_{\text{показание}}$ | 1531,643 мбар | 0,001 мбар | $\sqrt{3}$ | 2,89·10⁻⁴ мбар | 1 | 2,89·10⁻⁴ | 8,33·10⁻⁸ |
| $\delta p_{\text{сходимость измерений}}$ | 0 | 0,001 мбар | $\sqrt{3}$ | 2,89·10⁻⁴ мбар | 1 | 2,89·10⁻⁴ | 8,33·10⁻⁸ |
| $\delta p_{\text{вариация показаний}}$ | 0 | 0,026 мбар | $\sqrt{3}$ | 7,51·10⁻³ мбар | 1 | 7,51·10⁻³ | 5,63·10⁻⁵ |
| $\Delta p$ | -0,030 мбар | Станд. неопределённость измер. $u$ или дисперсия $u^2$ | | | | 8,00·10⁻² | $\sum u_i^2 = 6{,}40 \cdot 10^{-3}$ |
| $\Delta p$ | -0,030 мбар | Расшир. неопределённость измер. $U = k \cdot u$ ($k$ = 2) | | | | **0,16 мбар** | |

* С учётом зависящего от температуры коэффициента линейного расширения площади системы поршень-цилиндр ($\alpha$+$\beta$)

** С учётом зависящей от давления плотности газа (приближение)

$$\rho_{p,t} = \rho_{20°C,1\text{bar}} \cdot \left[ \frac{p_{\text{abs}} \cdot (T + 20\,\text{K})}{1\,\text{bar} \cdot (T + t)} \right]$$

где $T$ = 273,15 K

Для поправки давлений, показанных образцовым прибором, использовались следующие данные (расчёт согласно приложению A):

| | |
|---|---|
| $t_K$ | : (21,6 ± 1,0) °C |
| $g$ | : (9,812533 ± 0,000020) m·s⁻² |
| $\alpha$+$\beta$ | : (22,0 ± 1,1)·10⁻⁶ K⁻¹ |

Примечание:

Расчётная расширенная неопределённость измерений $U$ = **0,16** мбар для ступени нагрузки $p$ = 1531,673 мбар соответствует относительной расширенной неопределённости в $W$ = 0,01 %. В соответствии с главой 9.3 „Предельные значения для указанных неопределённостей измерений“ значение, указанное в сертификате калибровки для калибровки с последовательностью B, не должно быть меньше, чем значение в $W$ = 0,04 %, что соответствует расширенной неопределённости измерений в ***U* = 0,62 мбар.**

## Приложение D Пример.
## Бюджет неопределённости измерений для калибровки преобразователя давления с электрическим выходным сигналом[13]

Затраты на калибровку согласно последовательности калибровки A при втором креплении
Показание среднего значения ( $\overline{p}$ ) из вверх и вниз измеренных значений, сходимости измерения ($b'$), промежуточной прецизионности измерений ($b$), вариации показаний ($h$), коэффициента передачи $S$ и погрешности ($\Delta S$).

Объект калибровки

Преобразователь давления с электрическим выходным сигналом
Заданный предел точности производителя : 0,01 % от конечного значения диапазона измерений

Образцовый прибор

Название : xxx
Расш. неопределённость измер. : $1 \cdot 10^{-4} \cdot p$ но не меньше, чем 1 мбар
в диапазоне измерения температуры
в опорной плоскости давления на объекте калибровки на месте установки ($g = g_{loc}$)

Вспомогательный измерительный прибор

Цифровой компенсатор : xxx
Расш. неопределённость измер. $U(A)$ : 0,00005 мВ/В
[$A$: Показание в мВ/В $\equiv U_{показание}/G \cdot U_{Sp}$ где $G = 1$ и $U(G) = 0$]

Условия калибровки

Передающая среда : Белое масло
$\rho_{Fl(20°C)}$ : (855 ± 40) кг/м³ в диапазоне измерения до 200 бар
$\Delta h$ : (0 ± 0,005) м
$t_{amb}$ : (20 ± 1) °C
$p_{amb}$ : (990 ± 1) мбар

[13] В следующем примере неопределённость измерений оценивается со связанными значениями по модели произведение/частное (уравн. 16). В качестве альтернативы может быть выбрана модель сумма/разность (уравн.8), когда рассматриваются отклонения измеренного выходного сигнала датчика давления от значений, рассчитанных по номинальной характеристической кривой. При этом результаты оценок неопределённости измерений показывают количественное соответствие.

**Таблица D1:** Данные измерений

| **Давление** на уровне опорной плоскости объекта калибровки $p_{эталон}$ | **Показание** $A_{цифровой\ компенсатор}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | M1 (вверх) | M2 (вниз) | M3 (вверх) | M4 (вниз) | M5 (вверх) | M6 (вниз) |
| бар | мВ/В | мВ/В | мВ/В | мВ/В | мВ/В | мВ/В |
| 0,000 | 0,00000 | -0,00003 | 0,00000 | 0,00002 | 0,00000 | -0,00002 |
| 20,010 | 0,20009 | 0,20026 | 0,20019 | 0,20033 | 0,20021 | 0,20032 |
| 40,022 | 0,40026 | 0,40063 | 0,40032 | 0,40067 | 0,40033 | 0,40064 |
| 60,033 | 0,60041 | 0,60094 | 0,60049 | 0,60097 | 0,60049 | 0,60092 |
| 80,045 | 0,80053 | 0,80118 | 0,80062 | 0,80120 | 0,80062 | 0,80110 |
| 100,056 | 1,00063 | 1,00139 | 1,00072 | 1,00135 | 1,00075 | 1,00125 |
| 120,068 | 1,20074 | 1,20149 | 1,20080 | 1,20141 | 1,20082 | 1,20132 |
| 140,079 | 1,40080 | 1,40158 | 1,40089 | 1,40150 | 1,40090 | 1,40133 |
| 160,091 | 1,60082 | 1,60157 | 1,60091 | 1,60148 | 1,60091 | 1,60126 |
| 180,102 | 1,80084 | 1,80148 | 1,80097 | 1,80135 | 1,80091 | 1,80111 |
| 200,113 | 2,00079 | 2,00100 | 2,00088 | 2,00114 | 2,00086 | 2,00087 |

**Таблица D2:** Оценка

| **Давление** на уровне опорной плоскости объекта калибровки $p_{эталон}$ | **Выходной сигнал $A$: среднее значение** $\overline{p}$ $\Sigma M_i/6$ | **Погрешность нуля** $f_{0,rel}$ $\lvert макс \rvert / \overline{p}$ | **Сходимость измерений** $b'_{rel}$ $\lvert макс \rvert / \overline{p}$ | **Промежуточная прецизионность измерений** $b_{rel}$ $\lvert макс \rvert / \overline{p}$ | **Вариация показаний** $h_{rel}$ $(1/3\ \overline{p}) \cdot \Sigma \lvert h_i \rvert$ | **Относительн. расширенная неопределён-ность измер.** $W(p_{эталон})$ *) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| бар | мВ/В | # | # | # | # | # |
| 0,000 | -0,00001 | # | # | # | # | # |
| 20,010 | 0,20023 | 1,5E-04 | 5,0E-04 | 6,0E-04 | 7,0E-04 | 1,0E-04 |
| 40,022 | 0,40048 | 7,5E-05 | 1,5E-04 | 1,7E-04 | 8,6E-04 | 1,0E-04 |
| 60,033 | 0,60070 | 5,0E-05 | 1,3E-04 | 1,3E-04 | 8,0E-04 | 1,0E-04 |
| 80,045 | 0,80088 | 3,7E-05 | 1,1E-04 | 1,1E-04 | 7,1E-04 | 1,0E-04 |
| 100,056 | 1,00102 | 3,0E-05 | 9,0E-05 | 1,5E-04 | 6,3E-04 | 1,0E-04 |
| 120,068 | 1,20110 | 2,5E-05 | 1,1E-04 | 1,5E-04 | 5,2E-04 | 1,0E-04 |
| 140,079 | 1,40117 | 2,1E-05 | 9,3E-05 | 1,9E-04 | 4,3E-04 | 1,0E-04 |
| 160,091 | 1,60116 | 1,9E-05 | 8,7E-05 | 2,0E-04 | 3,5E-04 | 1,0E-04 |
| 180,102 | 1,80111 | 1,7E-05 | 1,0E-04 | 2,1E-04 | 2,3E-04 | 1,0E-04 |
| 200,113 | 2,00092 | 1,5E-05 | 4,5E-05 | 7,0E-05 | 8,0E-05 | 1,0E-04 |

*) в опорной плоскости давления объекта калибровки

**Таблица D3:** Результат

| **Давление** на уровне опорной плоскости объекта калибровки $P_{эталон}$ | **Коэффициент передачи** $S = V/p$ | **Отклонение** $\Delta S = S\text{-}S'$ | **Относительн. расширенная неопределён-ность измер.** $W(S) = 2[\Sigma w_i^2(S)]^{0,5}$ | **Расширенная неопределён-ность измер.** $U(S) = W(S) \cdot S$ | **Диапазон отклонений** $U'(S) = U+\Delta S$ |
|---|---|---|---|---|---|
| бар | (мВ/В)/ бар | (мВ/В)/bar | # | (мВ/В)/ бар | (мВ/В)/ бар |
| 0,000 | # | # | # | # | # |
| 20,010 | 0,0100067 | 5,2E-06 | 6,2E-04 | 6,2E-06 | 1,1E-05 |
| 40,022 | 0,0100064 | 4,9E-06 | 5,3E-04 | 5,3E-06 | 1,0E-05 |
| 60,033 | 0,0100062 | 4,7E-06 | 4,9E-04 | 4,9E-06 | 9,6E-06 |
| 80,045 | 0,0100053 | 3,8E-06 | 4,4E-04 | 4,4E-06 | 8,2E-06 |
| 100,056 | 0,0100045 | 3,0E-06 | 3,9E-04 | 3,9E-06 | 7,0E-06 |
| 120,068 | 0,0100035 | 2,0E-06 | 3,4E-04 | 3,4E-06 | 5,3E-06 |
| 140,079 | 0,0100027 | 1,2E-06 | 3,0E-04 | 3,0E-06 | 4,2E-06 |
| 160,091 | 0,0100016 | 4,5E-08 | 2,6E-04 | 2,6E-06 | 2,7E-06 |
| 180,102 | 0,0100005 | -1,0E-06 | 2,2E-04 | 2,2E-06 | 3,2E-06 |
| 200,113 | 0,0099990 | -2,5E-06 | 1,3E-04 | 1,3E-06 | 3,8E-06 |

| **Указание одного значения:** | $S'$ = 0,0100015 (мВ/В) / бар |
|---|---|

**Таблица D4:** Бюджет неопределённости для ступени нагрузки $p$ = 100,056 бар

| **Величина** $X_i$ | **Наилучшая оценка** $x_i$ | **Ширина распределения** $2a$ | **Дели-тель** | **Стандарт. неопред. измере-ний** $w(x_i)$ | **Коэффиц. чувствитель-ности** $c_i$ * | **Вклад в неопреде-лённость измерений** $w_i(y)$ | **Дисперсия** $w_i^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $p_{эталон}$ | 100,056 бар | 20 мбар | 2 | $5{,}00 \cdot 10^{-5}$ | -1 | $5{,}00 \cdot 10^{-5}$ | $2{,}50 \cdot 10^{-9}$ |
| $U_{показание}$ | 1,00102 мВ/В | 0,00010 мВ/В | 2 | $2{,}50 \cdot 10^{-5}$ | 1 | $2{,}50 \cdot 10^{-5}$ | $6{,}25 \cdot 10^{-10}$ |
| $K_{погрешность\ нуля}$ | 1 | $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ | $\sqrt{3}$ | $8{,}66 \cdot 10^{-6}$ | 1 | $8{,}66 \cdot 10^{-6}$ | $7{,}50 \cdot 10^{-11}$ |
| $K_{сходимость\ измерений}$ | 1 | $9{,}0 \cdot 10^{-5}$ | $\sqrt{3}$ | $2{,}60 \cdot 10^{-5}$ | 1 | $2{,}60 \cdot 10^{-5}$ | $6{,}76 \cdot 10^{-10}$ |
| $K_{промежуточная\ прецизионность}$ | 1 | $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ | $\sqrt{3}$ | $4{,}33 \cdot 10^{-5}$ | 1 | $4{,}33 \cdot 10^{-5}$ | $1{,}87 \cdot 10^{-9}$ |
| $K_{вариация\ показаний}$ | 1 | $6{,}3 \cdot 10^{-4}$ | $\sqrt{3}$ | $1{,}82 \cdot 10^{-4}$ | 1 | $1{,}82 \cdot 10^{-4}$ | $3{,}31 \cdot 10^{-8}$ |
| $S$ | 0,0100046 | Относ. стандартн. неопредел. измерений $w$ или дисперсия $w^2$ | | | | $1{,}97 \cdot 10^{-4}$ | $3{,}88 \cdot 10^{-8}$ |
| $S$ | 0,0100046 | Относ. расширен. неопредел. измерений $W = k \cdot w$ ($k$ = 2) | | | | **$3{,}9 \cdot 10^{-4}$** | |

Зависимость плотности масла от давления не учитывалась.

Для ступени нагрузки p = 100,056 бар расширенная неопределённость измерений для определения коэффициента передачи рассчитывается следующим образом:

$U(S)|_{100\ бар} = W \cdot S = 3{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}01000455$ (мВ/В)/ бар **= 3,9·10$^{-6}$ (мВ/В)/ бар**

Установленный предел составляет, напр. **± 0,13 %** от коэффициента передачи.

**Иллюстрация D1:** Визуализация коэффициента передачи

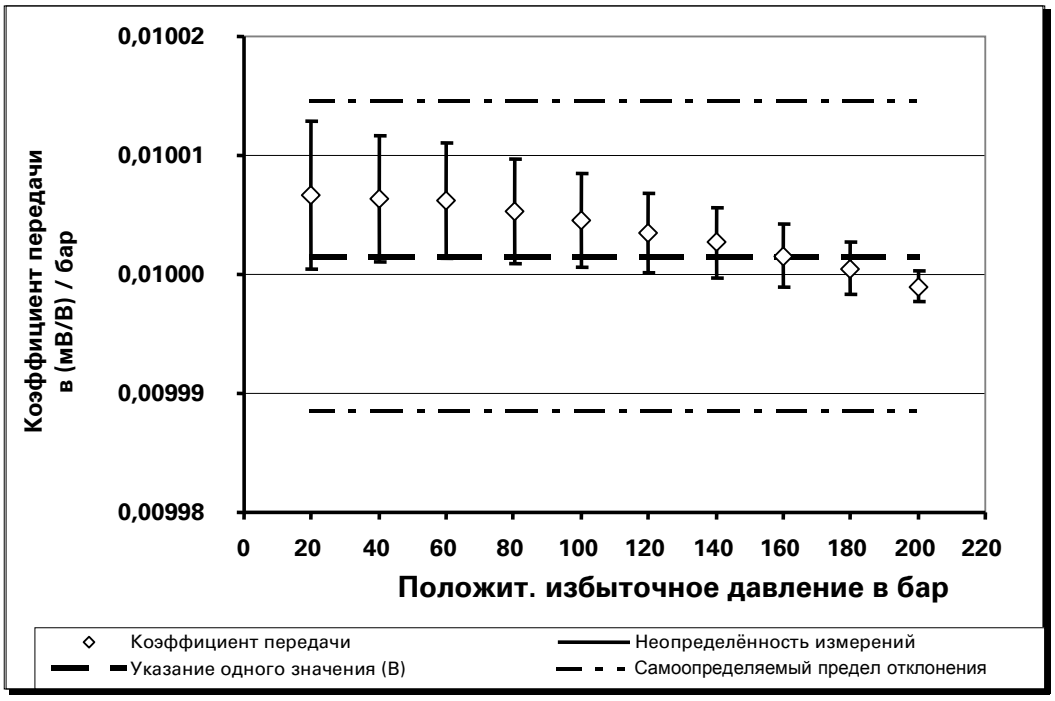
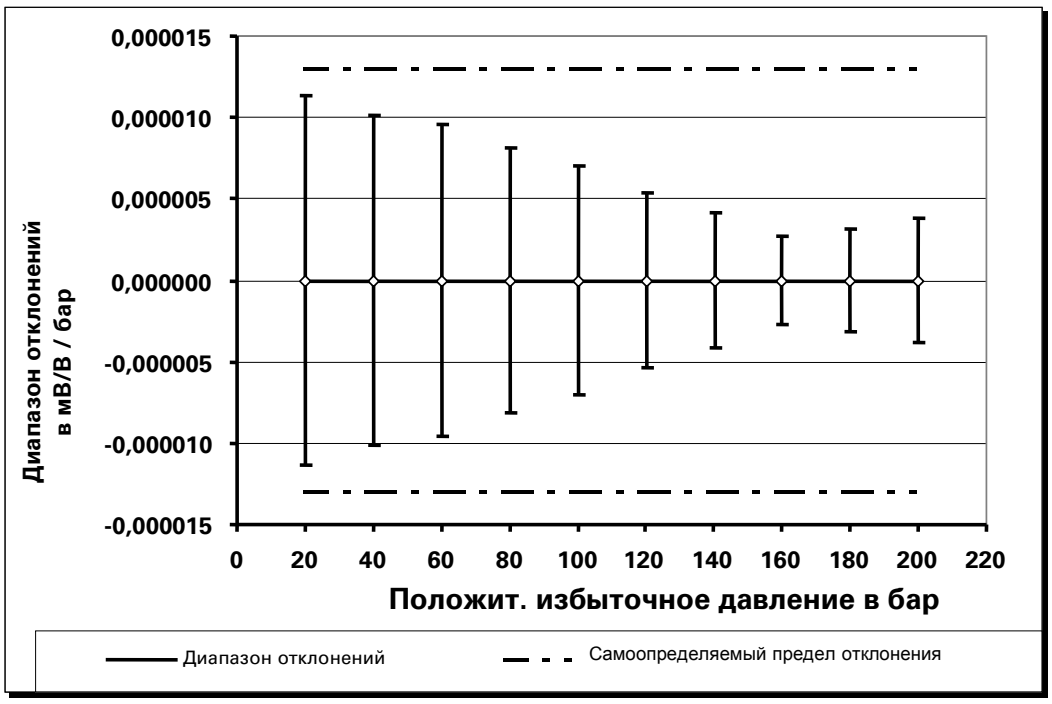



**Иллюстрация D2:** Визуализация диапазанов отклонений



## Приложение E (справочное) Неопределённости измерений исходных и рабочих эталонов

**Таблица E1:** Типичные неопределённости измерений, которые могут быть связаны со значениями исходных эталонов.

| **Шкала давления** | **Типичное значение расширенной неопределённости измерений** $U\ (k = 2)$, связанное с измеренным значением |
|---|---|
| $10^{-9}$ мбар ... $10^{-6}$ мбар | 10 % ... 6 % |
| $10^{-6}$ мбар ... $10^{-2}$ мбар | 4 % ... 1 % |
| $10^{-2}$ мбар ... 10 мбар | 0,5 % ... 0,3 % |
| 10 мбар ... 50 мбар | 0,03 % |
| 50 мбар ... 1 бар | 0,01 % |
| 1 бар ... 700 бар | 0,008 % |
| 700 бар ... 2000 бар | 0,012 % |
| 2000 бар ... 10000 бар | 0,07 % |

**Таблица E2:** Типичные неопределённости измерений, которые могут быть связаны со значениями рабочих эталонов.

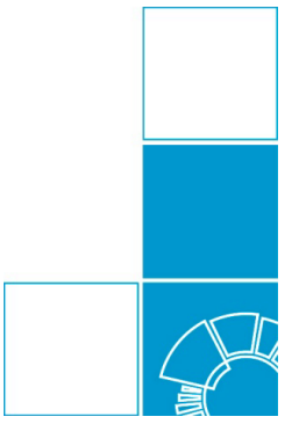
| **Рабочий эталон** | **Типичное значение расшир. неопред. измерен.** $U\ (k = 2)$, связанное с диапазоном измерений |
|---|---|
| кварцевые датчики, кварцевые спиральные манометры | 0,01 % |
| пьезорезистивные датчики давления | 0,03 % |
| тонкоплёночные датчики давл., тензометрические датчики | 0,05 % |
| ёмкостные датчики давл., манометр с пружиной Бурдона, кл. 0,1 | 0,10 % |

## Приложение F Сроки последующей калибровки (рекомендация)

За определением и соблюдением разумного срока последующей калибровки отвечает пользователь. При обычных условиях применения рекомендуются следующие сроки последующей калибровки:

| | |
|---|---|
| **поршневый манометр** | **5 лет** |
| **манометр с пружиной Бурдона, класс > 0,6** | **2 года** |
| **электрические приборы для измерения давления > 0,5 % от диапазона измерений** | **2 года** |
| **преобразователи давл. с электрич. выходным сигналом > 0,5 % от диапазона измерений** | **2 года** |
| **манометр с пружиной Бурдона, класс ≤ 0,6** | **1 год** |
| **электрические приборы для измерения давления ≤ 0,5 % от диапазона измерений** | **1 год** |
| **преобразователи давл. с электрич. выходным сигналом ≤ 0,5 % от диапазона измерений** | **1 год** |

Независимо от указанных сроков, объект калибровки должен пройти повторную калибровку также в тех случаях, когда он подвергался чрезмерной нагрузке, лежащей вне допустимой границы перегрузки; после проведения ремонта прибора; после неправильного обращения с прибором, которое могло оказать влияние на неопределённость измерений, а также при ниличии других причин.



Издатель:

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de