

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



**Методическая
инструкция
DKD-R 6-2
Часть 2**

**Калибровка приборов
для измерения вакуума**

Неопределённости измерений

Выпуск 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU>



	<p>Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU</p>	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	2/20

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

	<p>Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU</p>	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	3/20

Рекомендация для цитирования при указании источника:

*Методическая инструкция DKD-R 6-2, Часть 2, Калибровка приборов для измерения вакуума – Неопределённости измерений, выпуск 09/2018, редакция 0, Национальный метрологический институт Германии, Брауншвейг и Берлин
DOI: 10.7795/550.20180828AKRU*

(Richtlinie DKD-R 6-2, Teil 2, Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum – Messunsicherheiten, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: 10.7795/550.20180828AK)

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* в период с 1999 г. по 2009 г.

Выпущена Национальным метрологическим институтом Германии (PTB) для Немецкой службы калибровки (DKD) и является результатом совместной работы PTB и Технического комитета DKD *Давление и вакуум*.

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	4/20

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 уже в 1999 г. Техническим комитетом *Давление и вакуум* в сотрудничестве с РТВ и аккредитованными калибровочными лабораториями.

Настоящее переработанное переиздание содержит только обновлённые выходные данные.

Настоящее переиздание идентично по содержанию методической инструкции DAkkS-DKD-R 6-2 Часть 2 (выпуск 2010 г.). Методическая инструкция DAkkS-DKD-R 6-2 Часть 2 будет изъята из обращения Немецким органом по аккредитации DAkkS не позднее 01.01.2021 года.

Выпуск: 1999 г., опубликован Немецкой службой калибровки DKD

1-е переиздание: 03/2002 г., переработано Немецкой службой калибровки DKD

2-е переиздание: 2010 г., переработано Немецким органом по аккредитации DAkkS

3-е переиздание: 2018 г., переработано Немецкой службой калибровки DKD, идентично по содержанию 2-му переизданию

Содержание

1	Область применения	5
2	Определение.....	5
3	Модель	5
3.1	Модель сумма / разность.....	5
4	Расчёт неопределённости измерений.....	6
4.1	Вклад в неопределённость u_N , вносимый эталоном	6
4.2	Вклад в неопределённость u_{KG} , вносимый объектом калибровки	7
4.3	Вклад в неопределённость, вносимый процедурой калибровки	9
5	Особенности при калибровке вакуумметров.....	10
5.1	Определение диапазона измерения у тепловых вакуумметров и выражение неопределённости измерения	10
6	Коэффициент расширения k	10
7	Представление неопределённости измерения в сертификате калибровки.....	10
8	Примеры.....	11
8.1	Мембранный вакуумметр	11
8.2	Тепловой вакуумметр	15
	Библиография.....	19

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений	Выпуск:	09/2018
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Редакция:	0
		Страница:	5/20

1 Область применения

В данной части методической инструкции рассматривается определение, количественная оценка и составление бюджета неопределённостей измерений для калибровки вакуумметров согласно данной методической инструкции.

2 Определение

Неопределённость измеренияⁱ определяется как параметр, который указывается вместе с результатом измерений, т.е. вследствие измерения он относится к результату измерений, характеризуя область значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине в процессе измерений.

3 Модель

Анализ неопределённости осуществляется главным образом согласно описанным в документе DAkkS-DKD-3 предписаниям.

Для калибровки вакуумметров подходящей зарекомендовала себя модель сумма / разность, при условии, что влияющие величины некоррелированы.

3.1 Модель сумма / разность

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

Y	полученная величина
X	входная величина/входные величины, определяющая/-ие значение
δX_i	неизвестная погрешность / неизвестные погрешности измерений

При калибровке вакуумметров, в большинстве случаев, погрешность измерения Δp является величиной, которую необходимо определить. Таким образом, из общей модели сумма/разность получают уравнение:

$$\Delta p = p_{Anzeige} - p_{Normal} + \sum_i \delta p_i$$

где	
$p_{Anzeige}$	показание вакуумметра
p_{Normal}	значение эталона
δp_i	дополнительные неизвестные погрешности измерений

В вакуумной измерительной технике для наглядности предпочтительно разделять неизвестные погрешности измерений на погрешности объекта калибровки, эталона и процедуры калибровки.

$$\Delta p = p_{KG} - p_N + \delta p_V$$

где	
p_N	действительное значение эталона (глава 4.1)
p_{KG}	(измеренное) значение объекта калибровки (4.2)
δp_V	отклонения, обусловленные процедурой калибровки (4.3)

ⁱ См. терминологию в DIN V ENV 13005

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений	Выпуск:	09/2018
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Редакция:	0
		Страница:	6/20

Действительное значение эталона обозначает, что для показанного значения внесены все известные поправки (погрешность показания согласно сертификату калибровки, смещение, температурная поправка и т. д.).

(Измеренное) значение объекта калибровки обозначает, что для показанного значения внесена поправка на смещение и, напр., на высоту.

4 Расчёт неопределённости измерений

Для расчёта расширенной неопределённости измерений U применяется формула:

$$U = k \cdot \sqrt{u_N^2 + u_{KG}^2 + u_V^2}$$

где

k коэффициент расширения

u_N вклад в неопределённость, вносимый индикацией исправленного давления эталона

u_{KG} вклад в неопределённость, вносимый индикацией исправленного давления объекта калибровки

u_V вклад в неопределённость, вносимый процедурой калибровки

Для упрощения в уравнении модели используются индексы давления (вместо u_{p_N} : u_N).

Коэффициенты чувствительности имеют значение, равное, как правило, единице, т.е. составляющие неопределённости, связанные с результатом, равны по значению стандартным неопределённостям измерений входных величин.

4.1 Вклад в неопределённость u_N , вносимый эталоном

Стандартные неопределённости измеренных значений величины эталона имеются в результате его калибровки. При применении в калибровочной лаборатории необходимо тем не менее учитывать факторы влияния, зависящие от долговременной нестабильности и соответствующих условий калибровки.

Обычно для (измеренного) значения величины эталона применяется следующая модель:

$$p_N = p_{anz,N} - p_{offs,N} + \delta p_{D,N} + \delta p_{Cal,N} + \delta p_{L,N} + \delta p_{T,N} + \delta p_{S,N}$$

где

p_N действительное значение

$p_{anz,N}$ индикация

$p_{offs,N}$ смещение (погрешность нуля) эталона. Примечание: если смещение вычитается самим прибором или проводится регулировка нуля, то $p_{offs,N} = 0$.

$\delta p_{D,N}$ погрешность смещения, вызванная дрейфом

$\delta p_{Cal,N}$ поправка согласно сертификату калибровки (погрешность измерений)

$\delta p_{L,N}$ погрешность из-за долговременной нестабильности (предположение: в большинстве случаев $\delta p_L = 0$)

$\delta p_{T,N}$ погрешность индикации из-за влияния температуры в калибровочной лаборатории

$\delta p_{S,N}$ погрешность, обусловленная другими факторами влияния (напр., наклоном прибора и т. д.)

Для стандартной неопределённости измерений, связанной со значениями эталона, применяется следующее отношение:

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	7/20

$$u_N = \sqrt{u_{Anz,N}^2 + u_{Offs,N}^2 + u_{D,N}^2 + u_{Cal,N}^2 + u_{L,N}^2 + u_{T,N}^2 + u_{S,N}^2}$$

где

$u_{anz,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная значениями эталона из-за недостаточной повторяемости на момент калибровки объекта калибровки (рассеяние измеренных значений величины вокруг среднего значения включая рассеяние из-за оцифровки, разрешающей способности и т.д.)

Примечание:

Часто имеется только одна измеряемая величина. В таком случае составляющая неопределённости оценивается из эмпирических значений (включая составляющую неопределённости, вызванную оцифровкой, колебаниями смещения и т. д.).

$u_{offs,N}$ Неопределённость значений смещения на момент измерения смещения (без сходимости измерения смещения)

Примечание: Часто случается, что неопределённость значения смещения обусловлена лишь оцифровкой или разрешающей способностью прибора. Если повторяемость смещения (колебаний смещения) не учитывается при $u_{anz,N}$ (напр., ввиду того, что берётся только одна измеряемая величина), то оно должно учитываться здесь. Даже если $p_{offs,N} = 0$ (напр., ввиду того, что смещение уже было вычтено самим измерительным прибором), $u_{offs,N} > 0$.

$u_{D,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная смещением на момент калибровки объекта калибровки вследствие дрейфа смещения или другой систематической зависимости смещения (напр. из-за зависимости от частоты вращения у вакуумметров с вращающимся ротором)

$u_{cal,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная эталоном согласно сертификату калибровки

$u_{L,N}$ Составляющая неопределённости, учитывающая долговременную нестабильность (эмпирическое значение или неопределённость типа Bⁱⁱ, частично подтверждённая статистически)

$u_{T,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная влиянием температуры в условиях калибровочной лаборатории

$u_{S,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная особыми условиями в калибровочной лаборатории (напр. другое монтажное положение встроенного оборудования и т. д.)

Стандартная неопределённость измеренных значений величины эталонов при применении в калибровочной лаборатории часто значительно отличается от стандартной неопределённости измерений, полученной на момент их калибровки, что обусловлено долговременной нестабильностью. Национальные метрологические лаборатории и калибровочные лаборатории с многолетним опытом имеют зачастую эмпирические значения, на которые они могут при необходимости ссылаться.

4.2 Вклад в неопределённость u_{KG} , вносимый объектом калибровки

Вклад в неопределённость (измеряемых) значений объекта калибровки на момент его калибровки обусловлен прежде всего разрешающей способностью (аналоговое или цифровое разрешение), зависимостью измерительных элементов (напр., датчика, усилителя) от температуры, колебаниями нулевой отметки или смещения, дрейфом смещения.

ⁱⁱ см. DAkKS-DKD-3

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений	Выпуск:	09/2018
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Редакция:	0
		Страница:	8/20

Обычно для погрешности объекта калибровки на момент калибровки применяется следующая модель:

$$P_{KG} = P_{Anz,KG} - P_{Offs,KG} + \delta P_{D,KG} + \delta p_{n,KG}$$

где

P_{KG} (измеряемое) значение объекта калибровки

$P_{anz,KG}$ индикация

$P_{offs,KG}$ смещение (погрешность нуля)

$\delta p_{D,KG}$ дрейф смещения или другие систематические погрешности

$\delta p_{n,KG}$ сумма погрешностей, которые не приводятся в отдельности (напр., поправка на высоту)

Определение стандартной неопределённости измерений объекта калибровки осуществляется согласно одному из следующих четырёх случаев:

- a) Стандартная неопределённость измерений u_{KG} объекта калибровки известна. Значение u_{KG} может быть указано производителем (или заказчиком) как совокупность составляющих неопределённостей и должно учитываться, если калибровочная лаборатория соблюдает условия применения, указанные производителем.
- b) Вышеперечисленные зависимости или значения известны.

В таком случае для расчёта стандартной неопределённости измерений применяется:

$$u_{KG} = \sqrt{u_{Anz,KG}^2 + u_{Offs,KG}^2 + u_{D,KG}^2 + \sum u_{n,j,KG}^2}$$

где

$u_{anz,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная недостаточной повторяемостью (рассеяние измеренных значений величины вокруг среднего значения включая неопределённость из-за оцифровки, разрешающей способности и т.д.)

Примечание: Часто имеется только одна измеряемая величина. В таком случае составляющая неопределённости оценивается из эмпирических значений.

$u_{offs,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная смещением на момент измерения смещения (без сходимости измерения смещения). Часто неопределённость измерения смещения вызвана лишь разрешающей способностью объекта калибровки. Даже если $p_{offs} = 0$, (напр., ввиду того, что смещение уже было вычтено самим измерительным прибором), $u_{offs,KG} > 0$.

$u_{D,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная смещением вследствие дрейфа смещения или другой систематической зависимости (напр. из-за зависимости от частоты вращения у вакуумметров с вращающимся ротором)

$u_{n,j,KG}$ Дальнейшие, здесь не указанные составляющие неопределённости, которые также могут быть связаны с объектом калибровки, напр., воздействия температуры.

- c) Вышеперечисленные зависимости или значения неизвестны, но оцениваются калибровочной лабораторией или же имеются эмпирические значения для данного типа прибора.

	Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	9/20

В данном случае процедура аналогична описанному случаю b).

d) Вышеперечисленные зависимости или значения

- неизвестны,
- не могут быть оценены калибровочной лабораторией
- соответствующая информация от производителя отсутствует.

В данном случае необходимо провести как минимум два повторных измерения в разные дни.

Вклад в неопределённость, связанный со значениями объекта калибровки, определяется следующим образом:

$$u_{KG} = u_{Rep,KG}$$

где

$u_{Rep,KG}$ Повторяемость (стандартное отклонение) измеряемых значений, определённых для одного давления

4.3 Вклад в неопределённость, вносимый процедурой калибровки

Сумма δp_v погрешностей, возникающих при калибровке, может определяться прежде всего исходя из температурных условий калибровочной лаборатории, равномерного распределения и постоянства установленного давления, а также методики измерений (напр. времени ожидания).

Обычно для вклада в неопределённость, связанного с процедурой калибровки, применяется следующая модель:

$$\delta p_v = \delta p_{T,v} + \delta p_{K,v} + \delta p_{M,v}$$

где

$\delta p_{T,v}$ отклонения давлений на соединительных фланцах вследствие разных температур

$\delta p_{K,v}$ отклонения давлений на соединительных фланцах вследствие расхода газа, утечки, условий потока, впитывающей способности (напр. у ионизационных вакуумметров с холодным катодом)

$\delta p_{M,v}$ отклонения, связанные с методикой измерений (напр. временное изменение калибровочного давления при одновременном считывании показаний эталона и объекта калибровки)

Для расчёта составляющей неопределённости u_v применяется формула:

$$u_v = \sqrt{u_{T,v}^2 + u_{K,v}^2 + u_{M,v}^2}$$

где

$u_{T,v}$ составляющая неопределённости, обусловленная отклонениями давлений на соединительных фланцах вследствие разных температур

$u_{K,v}$ составляющая неопределённости, обусловленная отклонениями давлений на соединительных фланцах вследствие расхода газа, утечки, условий потока, впитывающей способности

	<p style="text-align: center;">Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU</p>	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	10/20

u_{M,v} составляющая неопределённости, обусловленная отклонениями, связанными с методикой измерений

5 Особенности при калибровки вакуумметров

В измерительной вакуумной технологии имеются следующие особенности:

- a) долговременная нестабильность эталонов зачастую больше, чем расширенная неопределённость измерений при их калибровке
- b) Диапазон измерений калибруемых приборов охватывает несколько десятичных порядков. Как правило, при калибровке показания эталона и объекта калибровки сравнивают в однократной серии измерений при постепенно повышающихся давлениях и рассчитывают отклонение показания объекта калибровки от калибровочного давления. Каждое повторное измерение требовало бы больших неоправданных усилий и не принесло бы существенного уменьшения неопределённости измерений объекта калибровки при применении у пользователя. Эффектами гистерезиса, как правило, можно пренебречь.
- c) В отдельных случаях (напр. тепловые вакуумметры) целесообразно учесть выходной электрический сигнал или эквивалент (напр., параметры лампы у ламп ионизационных вакуумметров) как функцию калибровочного давления.

5.1 Определение диапазона измерения у тепловых вакуумметров и выражение неопределённости измерения

Зачастую у тепловых термометров выходным сигналом является напряжение. При калибровке необходимо определить это напряжение как функцию давления. Если измеренное напряжение заносится в диаграмме над давлением (в логарифмической шкале), то, как правило, получают S-образную кривую. Максимальная крутизна будет лежать в середине всего измеренного диапазона. Как в нижнем, так и в верхнем конце диапазона получают очень пологий ход. Неопределённость измерений возрастает очень сильно на концах диапазона. Допустимо установить в качестве „диапазона измерения“ диапазон, в котором угловой коэффициент составит как минимум 30 % от максимального углового коэффициента, и указать значение для неопределённости измерения для этого диапазона.

При данном типе калибровки необходимо оценить неопределённость измерения, если отсутствуют данные от производителя относительно вклада в неопределённость, связанного с объектом калибровки.

6 Коэффициент расширения k

В общем можно исходить из того, что при калибровках применим коэффициент расширения $k = 2$.

7 Представление неопределённости измерения в сертификате калибровки

Неопределённости измерения представляют в наиболее подходящей форме в виде:

- таблицы
- уравнения
- диаграммы
- сертификата соответствия

Дальнейшие подробности содержатся в методической инструкции DAkKs-DKD-5.

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений	Выпуск:	09/2018
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Редакция:	0
		Страница:	11/20

8 Примеры

8.1 Мембранный вакуумметр

Эталон: Мембранный вакуумметр с цифровой индикацией
5,5-разрядный

Диапазон измерения: 0,001 до 100 мбар

Объект калибровки (KG): Мембранный вакуумметр с цифровой индикацией
4,5- разрядный

Диапазон измерения: 0,01 до 100 мбар

Калибровочное давление (номинальное): 5 мбар

Показание эталона: 5,078 мбар

Воздействия, обусловленные процедурой калибровки:

Разность высотных отметок подключения эталона и объекта калибровки: 15 см ± 1 см

Температура комнаты и оборудования: 23,0 °C ± 1 °C

Вклад в неопределённость u_N , вносимый эталоном

$u_{Anz,N}$ В качестве опции рабочий прибор позволяет также образовать среднее значение измерений давления. Вследствие этого стабилизируется индикация давления и уменьшается рассеяние измеренных значений. Неопределённость оценивается как $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ мбар.

$$u(2a) = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мбар}$$

$u_{Offs,N}$ Неопределённость значений смещения (нулевой отметки), может быть рассчитана для нулевой отметки через температурный коэффициент.

Температурный коэффициент/
нулевая отметка

$$= 0,0004 \text{ \% от конечного значения/}^\circ\text{C}$$

$$= 0,000004 \cdot 100 \text{ мбар/}^\circ\text{C}$$

$$= 4 \cdot 10^{-4} \text{ мбар/}^\circ\text{C}$$

$$= \text{коэффициент чувствительности } c_i$$

(Колебание температуры составляет ± 1 °C)

$u_{D,N}$ Неопределённость измерения эталона вследствие дрейфа нуля с момента его установки. Данная неопределённость измерений выводится из обнаруженных нулевых флуктуаций.

$$u(2a) = 6 \cdot 10^{-4} \text{ мбар}$$

$u_{Cal,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная эталоном согласно сертификату калибровки:

$$u(2\sigma) = 0,15 \text{ \% от измеренного значения} = 0,0015 \cdot 5 \text{ мбар} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$$

$u_{L,N}$ Составляющая неопределённости, учитывающая долговременную нестабильность. Эмпирические значения РТВ: 0,1 % от измеренного значения

$$u = 0,001 \cdot 5 \text{ мбар} = 0,005 \text{ мбар}$$

$u_{T,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная влиянием температуры в условиях калибровочной лаборатории.

$$\text{Температурный коэффициент /усиление} = 0,001 \text{ \% от измеренного значения /}^\circ\text{C}$$

$$= 0,00001 \cdot 5 \text{ мбар/}^\circ\text{C}$$

$$= 0,00005 \text{ мбар/}^\circ\text{C}$$

$$= \text{коэффициент чувствительности } c_i$$

(Колебание температуры составляет ± 1 °C)

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	12/20

$u_{S,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная особыми условиями в калибровочной лаборатории. Дальнейшие факторы влияния на неопределённость измерения неизвестны, поэтому данный вклад в неопределённость = 0.

Вклад в неопределённость u_{KG} , вносимый объектом калибровки

$u_{Anz,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная недостаточной повторяемостью. Данные согласно производителю: 0,08 % от измеренного значения. $u(2\sigma) = 0,0008 \cdot 5 \text{ мбар} = 0,004 \text{ мбар}$

$u_{Offs,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная смещением на момент измерения смещения. Данная неопределённость обусловлена главным образом цифровой разрешающей способностью:
 $u(2a) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$

$u_{D,KG}$ Неопределённость смещения на момент калибровки вследствие дрейфа смещения. Неопределённость значений смещения (нулевой отметки), может быть рассчитана для нулевой отметки через температурный коэффициент.
Температурный коэффициент/
нулевая отметка

$$= 0,002 \% \text{ от конечного значения } / ^\circ\text{C}$$

$$= 0,00002 \cdot 100 \text{ мбар}/^\circ\text{C}$$

$$= 2 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}/^\circ\text{C}$$

$$= \text{коэффициент чувствительности } c_i$$

(Колебание температуры составляет $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$)

$u_{T,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная влиянием температуры. Температурный коэффициент /интервал = 0,01 % от измеренного значения/ $^\circ\text{C}$
 $= 0,0001 \cdot 5 \text{ мбар}/^\circ\text{C}$
 $= 0,0005 \text{ мбар}/^\circ\text{C}$
 $= \text{коэффициент чувствительности } c_i$

(Колебание температуры составляет $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$)

Вклад в неопределённость, вносимый процедурой калибровки

$u_{T,V}$ Составляющая неопределённости, обусловленная отклонениями давлений на соединительных фланцах вследствие разных температур. Максимальная разность температур газа на соединительных фланцах оценивается как 0,02 $^\circ\text{C}$ (обусловленная потоком воздуха). Так как объем остаётся постоянным, результирующая разность давлений может быть рассчитана с помощью закона Гей-Люссака.

$$p/p_0 = T/T_0 = 296,17 \text{ K}/296,15 \text{ K} = 1,000068,$$

т.е. 0,0068 % $p/K = 0,00034 \text{ мбар}/\text{K} = \text{коэффициент чувствительности } c_i$

(Примечание: Данная составляющая неопределённости не имеет поправочного компонента, но вносит вклад в неопределённость измерений.)

$u_{K,V}$ Составляющая неопределённости, обусловленная разностью гидростатических давлений при различной высоте соединительных фланцев:

$$\Delta p = p \cdot g \cdot h \quad \text{Единица}$$

$$= 1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot 9,81 \cdot (h / \text{м}) \quad \text{кг/м}^{-3} \text{ м с}^{-2} \text{ м}$$

$$= 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м}) \quad \text{кг м с}^{-2} \text{ м}^{-2}$$

$$= 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м}) \quad \text{Н м}^{-2}$$

	Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	13/20

$$= 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м}) \quad \text{Па} \cdot 0,01 \text{ мбар} / \text{Па}$$

$$= 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м}) \quad \text{мбар}$$

где

$$\rho = \rho_0 \cdot p/p_0 = 1,2929 \text{ кг м}^{-3} \cdot p / 1013 \text{ мбар} = 1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p / \text{мбар}) \text{ кг м}^{-3}$$

$$\text{где } \rho_0 = 1,2929 \text{ кг м}^{-3} (273,15 \text{ К} ; 1013,25 \text{ мбар})$$

(Примечание: При расчёте $\Delta\rho$ давление p должно быть задано в мбар и высота h в м. Результирующее числовое значение для $\Delta\rho$ указывается тогда в мбар.)

Отклонение при 5 мбар и разности высот 0,15 м составляет:

$$\Delta\rho = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (5 \text{ мбар} / \text{мбар}) \cdot (0,15 \text{ м} / \text{м}) = 0,00009 \text{ мбар}$$

Коэффициент чувствительности $c_i = \rho \cdot g = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{мбар}) \text{ мбар м}^{-1}$. При измеряемом давлении 5 мбар коэффициент чувствительности $c_i = 0,0006 \text{ мбар} / \text{м}$.

Неопределённость разности высот составляет $\pm 0,01 \text{ м}$.

$u_{M,V}$ Составляющая неопределённости, обусловленная отклонениями, связанными с методикой измерений. При величине утечки, равной $5 \cdot 10^{-6} \text{ мбар} \cdot \text{л} / \text{с}$ давление в котле (20 л) увеличивается за 20 с на $5 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}$. Данное изменение давления не берётся в качестве поправки, но вносит вклад в неопределённость измерений.



Бюджет неопределённости измерений для мембранного вакуумметра при калибровочном давлении 5 мбар:

Величина	Оценка	Ширина распределения	Распределение*)	Делитель	Неопределённость	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость	Индекс	
X_i	x_i	$2a$			$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$		
	мбар						мбар	%	
$p_{Anz,N}$	5,078	2,00E-04 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-05 мбар	1,0	5,77E-05	0,0	
$p_{Offs,N}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	4,0E-04 мбар/°C	2,31E-04	0,2	
$\delta p_{D,N}$	0	6,00E-04 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,73E-04 мбар	1,0	1,73E-04	0,1	
$\delta p_{Cal,N}$	-0,003	7,30E-03 мбар	Н	2	3,65E-03 мбар	1,0	3,65E-03	48,5	
$\delta p_{L,N}$	0	1,00E-02 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	2,89E-03 мбар	1,0	2,89E-03	30,3	
$\delta p_{T,N}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	5,0E-05 мбар/°C	2,89E-05	0,0	
$\delta p_{S,N}$	0	0				1,0	0	0,0	
p_N	5,075						0,0047	79,1	
$p_{Anz,KG}$	5,140	0,004 мбар	Н	2	2,00E-03 мбар	1,0	2,00E-03	14,5	
$p_{Offs,KG}$	0	2,00E-03 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-04 мбар	1,0	5,77E-04	1,2	
$\delta p_{D,KG}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	2,0E-03 мбар/°C	1,15E-03	4,8	
$\delta p_{T,KG}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	5,0E-04 мбар/°C	2,89E-04	0,3	
p_{KG}	5,140						0,0024	20,9	
$\delta_{T,V}$	0	0,02 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 °C	3,4E-04 мбар/°C	1,96E-06	0,0	
$\delta p_{K,V}$	-9,0E-05	0,02 м	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 м	6,0E-04 мбар/м	3,46E-06	0,0	
$\delta p_{M,V}$	0	5,00E-06 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,44E-06 мбар	1,0	1,44E-06	0,0	
δp_V	-9,0E-05						0,00000	0,0	
Δp	0,0649	Расширенная неопределённость измерения $U = k \cdot u$ ($k = 2$):						0,0106	100,0

* П = Прямоугольное распределение
Н = Нормальное распределение

Результат:

Погрешность измерений объекта калибровки составляет таким образом:

$$\Delta p = 0,0649 \text{ мбар} \pm 0,0106 \text{ мбар}$$

Примечание: Значения, указанные в колонке „Индекс“ выражают процентную долю частичных неопределённостей измерений в суммарной неопределённости измерений и

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений	Выпуск:	09/2018
	https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Редакция:	0
		Страница:	15/20

наглядно показывает сравнительную оценку отдельных влияющих величин. Их расчёт не является предписанием, тем не менее он показывает, каким путём целесообразно пойти для уменьшения неопределённости измерения.

8.2 Тепловой вакуумметр

Эталон: Мембранный вакуумметр с цифровой индикацией
5,5-разрядный

Диапазон измерения: 0,00001 до 1 мбар

Объект калибровки (KG): Тепловой вакуумметр с цифровой индикацией
Диапазон измерения: 0,001 до 100 мбар

Калибровочное давление: 0,2 мбар

Воздействия, обусловленные процедурой калибровки:

Разность высотных отметок подключения эталона и объекта калибровки: 0 см ± 1 см

Температура комнаты и оборудования: 23,0 °C ± 1 °C

Вклад в неопределённость u_N , вносимый эталоном

$u_{Anz,N}$ В качестве опции рабочий прибор позволяет также образовать среднее значение измерений давления. Вследствие этого стабилизируется индикация давления и уменьшается рассеяние измеренных значений. Неопределённость оценивается как $\pm 1 \cdot 10^{-5}$ мбар.

$$u(a) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ мбар}$$

$u_{Offs,N}$ Неопределённость значений смещения (нулевой отметки), может быть рассчитана для нулевой отметки через температурный коэффициент.

Температурный коэффициент/
нулевая отметка

$$= 0,0004 \% \text{ от конечного значения } / ^\circ\text{C}$$

$$= 0,000004 \cdot 1 \text{ мбар}/^\circ\text{C}$$

$$= 4 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}/^\circ\text{C}$$

$$= \text{коэффициент чувствительности } c_1$$

(Колебание температуры составляет ± 1 °C)

$u_{D,N}$ Неопределённость измерения эталона вследствие дрейфа нуля с момента его установки. Данная неопределённость измерений выводится из обнаруженных нулевых флуктуаций.

$$u(2a) = 6 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}$$

$u_{Cal,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная эталоном согласно сертификату калибровки: $u(2\sigma) = 0,3 \% \text{ от измеренного значения}$
 $= 0,003 \cdot 0,2 \text{ мбар} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ мбар}$

$u_{L,N}$ Составляющая неопределённости, учитывающая долговременную нестабильность.

Эмпирические значения РТВ: 0,35 % от измеренного значения.

$$u(2a) = 0,0035 \cdot 0,2 \text{ мбар} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ мбар}$$

	Калибровка приборов для измерения вакуума	DKD-R 6-2 Часть 2	
	Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	16/20

$u_{T,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная влиянием температуры в условиях калибровочной лаборатории
Температурный коэффициент /усиление = 0,001 % от измеренного значения /°C
= 0,00001 · 0,2 мбар/°C
= 0,000002 мбар/°C
= коэффициент чувствительности c_i

(Колебание температуры составляет ± 1 °C)

$u_{S,N}$ Составляющая неопределённости, обусловленная особыми условиями в калибровочной лаборатории. Дальнейшие факторы влияния на неопределённость измерения неизвестны, поэтому данный вклад в неопределённость = 0.

Вклад в неопределённость u_{KG} , вносимый объектом калибровки

$u_{Anz,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная недостаточной повторяемостью. Эмпирическое значение для данного вакуумметра составляет 2 % от измеренного значения.
 $u(2a) = 0,02 \cdot 0,2 \text{ мбар} = 0,004 \text{ мбар}$

$u_{Offs,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная смещением на момент измерения смещения. Данная неопределённость обусловлена главным образом цифровой разрешающей способностью: $u(2a) = 2 \cdot 10^{-3}$.

$u_{D,KG}$ Неопределённость смещения оценивается как $u(2a) = 2 \cdot 10^{-4}$ мбар.

$u_{T,KG}$ Составляющая неопределённости, обусловленная влиянием температуры.
Температурный коэффициент /интервал = 3 % от измеренного значения/°C
= 0,03 · 0,2 мбар/°C
= 0,006 мбар/°C
= коэффициент чувствительности c_i

(Колебание температуры составляет ± 1 °C)

Вклад в неопределённость, вносимый процедурой калибровки

$u_{T,V}$ Составляющая неопределённости, обусловленная отклонением давлений на соединительных фланцах вследствие разных температур. Максимальная разность температур газа на соединительных фланцах оценивается как 0,02 °C (обусловленная потоком воздуха). Так как объем остаётся постоянным, результирующая разность давлений может быть рассчитана с помощью закона Гей-Люссака.

$$p/p_0 = T/T_0 = 296,17 \text{ K}/296,15 \text{ K} = 1,000068,$$

т.е. 0,0068 % $p / K = 0,000014 \text{ мбар/K} = \text{коэффициент чувствительности } c_i$

(Примечание: Данная составляющая неопределённости не имеет поправочного компонента, но вносит вклад в неопределённость измерений.)

$u_{K,V}$ Составляющая неопределённости, обусловленная разностью гидростатических давлений при различной высоте соединительных фланцев:

Δp	=	$p \cdot g \cdot h$	Единица
	=	$1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot 9,81 \cdot (h / \text{м})$	кг м ⁻³ м с ⁻² м
	=	$1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м})$	кг м с ⁻² м ⁻²
	=	$1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м})$	Н м ⁻²
	=	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м})$	Па · 0,01 мбар / Па
	=	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{мбар}) \cdot (h / \text{м})$	мбар

	Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	17/20

где

$$p = p_0 \cdot p/p_0 = 1,2929 \text{ кг м}^{-3} \cdot p / 1013 \text{ мбар} = 1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p / \text{мбар}) \text{ кг м}^{-3}$$

где $p_0 = 1,2929 \text{ кг м}^{-3}$ (273,15 К; 1013,25 мбар)

(Примечание: При расчёте $\Delta\rho$ давление p должно быть задано в мбар и высота h в м. Результирующее числовое значение для $\Delta\rho$ указывается тогда в мбар.)

Коэффициент чувствительности $c_i = p \cdot g = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{мбар}) \text{ мбар м}^{-1}$. При измеряемом давлении в 0,2 мбар коэффициент чувствительности равен

$c_i = 0,000024 \text{ мбар/ м}$. Неопределённость разности высот составляет 0,01 м.

$u_{M,V}$ Составляющая неопределённости, обусловленная отклонениями, связанными с методикой измерений. При величине утечки, равной $5 \cdot 10^{-6} \text{ мбар} \cdot \text{л/с}$ давление в котле (20 л) увеличивается за 20 с на $5 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}$. Данное изменение давления не берётся в качестве поправки, но вносит вклад в неопределённость измерений.

Бюджет неопределённости измерений для теплового вакуумметра при калибровочном давлении в 0.2 мбар

Величина	Оценка	Ширина распределения	Распределение ^{*)}	Делитель	Неопределённость	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределённость	Индекс	
X_i	x_i	$2a$			$u(x_i)$	c_i	$u_i(y)$		
	мбар						мбар	%	
$p_{Anz,N}$	0,20077	2,00E-05 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-06 мбар	1,0	5,77E-06	0,0	
$p_{Offs,N}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	4,0E-06 мбар/°C	2,31E-06	0,0	
$\delta p_{D,N}$	0	6,00E-06 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,73E-06 мбар	1,0	1,73E-06	0,0	
$\delta p_{Cal,N}$	-0,00156	6,00E-04 мбар	Н	2	3,00E-04 мбар	1,0	3,00E-04	0,5	
$\delta p_{L,N}$	0	0,0007 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	2,02E-04 мбар	1,0	2,02E-04	0,2	
$\delta p_{T,N}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	2,0E-06 мбар/°C	1,15E-06	0,0	
$\delta p_{S,N}$	0	0					0	0,0	
p_N	0,19921						0,00036	0,8	
$p_{Anz,KG}$	0,200	0,004 мбар	Н	2	2,00E-03 мбар	1,0	2,00E-03	24,3	
$p_{Offs,KG}$	0	2,00E-03 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-04 мбар	1,0	5,77E-04	2,0	
$\delta p_{D,KG}$	0	0,0002 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-05 мбар	1,0	5,77E-05	0,0	
$\delta p_{T,KG}$	0	2 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	6,0E-03 мбар/°C	3,46E-03	72,9	
p_{KG}	0,200						0,0040	99,2	
$\delta_{T,V}$	0	0,02 °C	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 °C	1,4E-05 мбар/°C	8,083E-08	0,0	
$\delta p_{K,V}$	0	0,02 м	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 м	2,4E-05 мбар/м	1,386E-07	0,0	
$\delta p_{M,V}$	0	5,00E-06 мбар	П	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,44E-06 мбар	1,0	1,443E-06	0,0	
δp_V	0						0,00000	0,0	
Δp	0,00079	Расширен. неопределённость измерения $U = k \cdot u$ ($k = 2$):						0,0080	100,0

^{*)} П = Прямоугольное распределение
Н = Нормальное распределение

Результат:

Погрешность измерений объекта калибровки составляет таким образом:
 $\Delta p = 0,00079$ мбар \pm $0,0080$ мбар

Примечание: Значения, указанные в колонке „Индекс“ выражают процентную долю частичных неопределённостей измерений в суммарной неопределённости измерений и наглядно показывает сравнительную оценку отдельных влияющих величин. Их расчёт не является предписанием, тем не менее он показывает, каким путём целесообразно пойти для уменьшения неопределённости измерения.

	Калибровка приборов для измерения вакуума Часть 2: Неопределённости измерений https://doi.org/10.7795/550.20180828AKRU	DKD-R 6-2 Часть 2	
		Выпуск:	09/2018
		Редакция:	0
		Страница:	19/20

Библиография

Анализ неопределённости измерения основывается на следующих документах

ISO:

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
1st Edition 1993, ISO, Genève, CH, ISBN 92-67-10188-9

Руководство по выражению неопределённости измерения. 1-е издание 1993, ISO, Genève, CH, ISBN 92-67-10188-9

DIN V ENV 13005

Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen
Deutsche Fassung ENV 13005:1999

Руководство для выражения погрешности при измерении. Немецкоязычная версия ENV 13005:1999

EA-4/02:

Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration
December 1999

Выражение неопределённости измерений при калибровках. Декабрь 1999 г.

DAkkS-DKD-3:

Angabe der Messunsicherheiten bei Kalibrierungen
DAkkS, 1. Neuauflage 2010, Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*

Выражение неопределённости измерений при калибровках. DAkkS, 1-е переиздание 2010 г., немецкоязычная версия публикации EA-4/02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration* (прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

DAkkS-DKD-3-E1: Ergänzung 1

Angabe der Messunsicherheiten bei Kalibrierungen, Beispiele
DAkkS 1. Neuauflage 2010, Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S1: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Examples*

DAkkS-DKD-3-E1: дополнение 1

Выражение неопределённости измерений при калибровках, примеры. DAkkS, 1-е переиздание 2010 г., немецкоязычная версия публикации EA-4/02-S1: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Examples* (прим. переводчика: неофициальный перевод названия)

DIN 1319-3:

Grundlagen der Messtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit, 1996

Метрология. Основные понятия. Часть 3. Понятия, связанные с погрешностями и оценкой результатов измерений, 1996 г.

Дальнейшие стандарты и библиография содержатся в части 1 „Основные понятия“.



Издатель:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de