
ЕВРАЗИЙСКИЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И
СЕРТИФИКАЦИИ (EASC)
EURO-ASIAN COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND
CERTIFICATION (EASC)



Межгосударственная система
стандартизации (МГС)

Проект
(1-я редакция)
РМГ _____ 20__

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ

**ВЕСЫ НЕАВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.
РУКОВОДСТВО ПО КАЛИБРОВКЕ
(IDT)**

**Guidelines on the Calibration of
Non-Automatic Weighing Instruments**

Дата введения _____

2019 г

Предисловие

Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации (ЕАСС) представляет собой региональное объединение национальных органов по стандартизации государств, входящих в Содружество Независимых Государств. В дальнейшем возможно вступление в ЕАСС национальных органов по стандартизации других государств.

Цели, основные принципы и основной порядок проведения работ по межгосударственной стандартизации установлены ГОСТ 1.0-92 “Межгосударственная система стандартизации. Основные положения” и ГОСТ 1.2-2015 “Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Порядок разработки, принятия, применения, обновления и отмены”

Сведения о стандарте

1 ПОДГОТОВЛЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 310 «Приборы весоизмерительные», Обществом с ограниченной ответственностью «ОКБ Веста», Обществом с ограниченной ответственностью «Промышленные измерения и автоматизация» и Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева федерального агентства по техническому регулированию и метрологии на основе собственного модифицированного перевода стандарта, указанного в пункте 4.

2 ВНЕСЕН Управлением метрологии федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

3 ПРИНЯТ Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № _____ от _____)

За принятие проголосовали:

Краткое наименование страны По МК (ИСО 3166) 004-97	Код страны по МК (ИСО 3166) 004-97	Сокращенное наименование национального органа по стандартизации

4 Настоящая рекомендация является модифицированной по отношению к европейскому руководству EURAMETCalibrationGuideNo. 18. Version 4.0 (11/2015). При этом раздел 3 «Терминология и обозначения» дополнен ссылками на РМГ 29-2013, ГОСТ OIMLR76-1-2011 и ГОСТ OIMLR111-1-2009. Дополнительные слова, включенные в текст

документа, выделены разряженными шрифтом.

5 Постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации и метрологии от _____ .20 ____ г. № _____ -ст межгосударственная рекомендация введена в действие непосредственно в качестве рекомендации Российской Федерации с датой введения в действие с 1 _____ 20 ____ г.

6 ВВЕДЕНА впервые

Информация о введении в действие (прекращении действия) настоящей рекомендации и изменений к ней на территории указанных выше государств публикуется в указателях национальных (государственных) стандартов, издаваемых в этих государствах.

Информация об изменениях к настоящей рекомендации публикуется в указателе (каталоге) «Межгосударственные стандарты», а текст изменений – в информационных указателях «Межгосударственные стандарты». В случае пересмотра или отмены настоящей рекомендации соответствующая информация будет опубликована в информационном указателе «Межгосударственные стандарты».

© Стандартиформ 2019

Исключительное право официального опубликования настоящей рекомендации на территории указанных выше государств, принадлежит национальным (государственным) органам по стандартизации этих государств.

Настоящая рекомендация не может быть полностью или частично воспроизведена, тиражирована и распространена в качестве официального издания на территории Российской Федерации без разрешения Федеральной службы по техническому регулированию и метрологии.

Содержание

1	ВВЕДЕНИЕ	6
2	НАЗНАЧЕНИЕ	6
3	ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ	7
4	ОБЩИЕ АСПЕКТЫ КАЛИБРОВКИ.....	7
4.1	Элементы калибровки.....	7
4.1.1	Диапазон калибровки.....	7
4.1.2	Место калибровки	8
4.1.3	Предварительные условия, подготовительные операции	8
4.2	Испытательная нагрузка и показание	9
4.2.1	Основное соотношение между нагрузкой и показанием	9
4.2.2	Действие выталкивающей силы воздуха	9
4.2.3	Влияния конвекции	11
4.2.4	Поправка на выталкивающую силу для опорного значения массы	12
4.3	Испытательные нагрузки	12
4.3.1	Гири	13
4.3.2	Испытательные грузы	13
4.3.3	Использование замещающих грузов	13
4.4	Показания	14
4.4.1	Общие сведения	14
4.4.2	Разрешение.....	15
5	МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ.....	15
5.1	Испытание на повторяемость	16
5.2	Испытание на погрешность показания.....	16
5.3	Испытание на нецентрального нагружение	18
5.4	Вспомогательные измерения	19
6	РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ	20
6.1	Повторяемость	20
6.2	Погрешности показаний	20
6.2.1	Дискретные значения	20
6.2.2	Характеристики диапазона взвешивания	21
6.3	Влияние нецентрального нагружения	21
7	НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ	22
7.1	Стандартная неопределенность для дискретных значений	22
7.1.1	Стандартная неопределенность показания	22
7.1.2	Стандартная неопределенность опорного значения массы	25
7.1.3	Стандартная неопределенность погрешности	28
7.2	Стандартная неопределенность для характеристики	29
7.3	Расширенная неопределенность при калибровке	29
7.4	Стандартная неопределенность результата взвешивания	29
7.4.1	Стандартная неопределенность показания в эксплуатации	31
7.4.2	Неопределенность погрешности показания	31
7.4.3	Неопределенность, обусловленная влиянием окружающей среды	32
7.4.4	Неопределенность, обусловленная эксплуатацией весов	33
7.4.5	Стандартная неопределенность результата взвешивания	36
7.5	Расширенная неопределенность результата взвешивания	36

7.5.1	Погрешности, учитываемые поправками	36
7.5.2	Погрешности, включаемые в неопределенность	37
7.5.3	Другие способы квалификации весов	38
8	СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ	38
8.1	Общие сведения	38
8.2	Сведения о процедуре калибровки	39
8.3	Результаты измерений	39
8.4	Дополнительные сведения	39
9	ЗНАЧЕНИЕ МАССЫ ИЛИ УСЛОВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ МАССЫ	40
9.1	Значение массы	40
9.2	Условное значение массы	41
10	ССЫЛОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ	41
	ПРИЛОЖЕНИЕ А: РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА	43
A1	Формула для плотности воздуха	43
A1.1	Упрощенная версия формулы CIPM, экспоненциальная версия	43
A1.2	Среднестатистическая плотность воздуха	43
A2	Вариации параметров, определяющих плотность воздуха	44
A2.1	Атмосферное давление.....	44
A2.2	Температура	44
A2.3	Относительная влажность	45
A3	Неопределенность плотности воздуха	45
	ПРИЛОЖЕНИЕ В: КОЭФФИЦИЕНТ ОХВАТА k ДЛЯ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ	46
B1	Цель	46
B2	Нормальное распределение и достаточная достоверность	46
B3	Нормальное распределение, достаточная достоверность отсутствует	47
B4	Определение k для распределений, не являющихся нормальными	47
	ПРИЛОЖЕНИЕ С: ФОРМУЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПОКАЗАНИЙ	48
C1	Цель	48
C2	Функциональные зависимости	48
C3	Члены, не зависящие от показаний	54
	ПРИЛОЖЕНИЕ D: ОБОЗНАЧЕНИЯ	55
	ПРИЛОЖЕНИЕ E: СВЕДЕНИЯ О ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЕ ВОЗДУХА	57
E1	Плотность гирь	57
E2	Выталкивающая сила воздуха для гирь, соответствующих ГОСТ OIML R1 1 1	57
	ПРИЛОЖЕНИЕ F: ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИИ	59
F1	Соотношение между температурой и временем	59
F2	Изменение наблюдаемой массы	61
	ПРИЛОЖЕНИЕ G: МИНИМАЛЬНАЯ МАССА.....	63
	ПРИЛОЖЕНИЕ H: ПРИМЕРЫ	65
H1	Весы на нагрузку 220 г и ценой деления шкалы 0,1 мг	65
H2	Весы на нагрузку 60 кг, многоинтервальные	82
H3	Весы на нагрузку 30 000 кг и ценой деления шкалы 10 кг	100
H4	Определение функции аппроксимации погрешности	121

1 ВВЕДЕНИЕ

Весы неавтоматического действия (далее - весы) широко используются для измерений массы. Для некоторых определенных в национальном законодательстве применений весы подлежат законодательному метрологическому контролю – т.е. утверждению типа, поверке и т.д. – но существует растущая потребность в подтверждении их метрологических характеристик посредством калибровки, например, когда это требуется стандартами ИСО 9001 или ИСО/МЭК 17025. Калибровка в лаборатории, аккредитованной в национальной системе аккредитации.

Настоящий документ может применяться при разработке методик калибровки конкретных весов.

2 НАЗНАЧЕНИЕ

Настоящий документ содержит руководство по статической калибровке весов с автоматическим установлением показаний, в частности для:

1. выполнения требуемых измерений,
2. вычисления результатов измерений,
3. определения неопределенности измерений,
4. заполнения сертификатов калибровки.

Объектом калибровки является показание весов в ответ на приложенную нагрузку. Результаты измерений выражаются в единицах массы. На показание весов влияет местное значение ускорения свободного падения, температура и плотность материала приложенной нагрузки, а также температура и плотность окружающего воздуха.

Неопределенность измерений, в значительной мере, зависит от свойств самих калибруемых весов, а не только от оборудования калибровочной лаборатории; неопределенность можно, в некоторой степени, снизить за счет увеличения числа измерений, выполненных в рамках процедуры калибровки. Данный документ не устанавливает нижние или верхние границы для неопределенности измерений.

Для калибровочной лаборатории и заказчика достаточно прийти к соглашению относительно ожидаемого значения неопределенности измерений, которое является приемлемым с точки зрения использования весов, и стоимости калибровки.

Настоящий документ не предназначен для представления одной или нескольких унифицированных методик, использование которых было бы обязательным, он дает общее руководство по созданию методик калибровки, результаты которых могут рассматриваться как эквивалентные в организациях-государств-членов СНГ и организациях-членах EURAMET.

Любая методика калибровки должна включать в себя, для ограниченного количества испытательных нагрузок, определение погрешности показаний и неопределенности измерений этих погрешностей. Процедура испытаний должна быть похожей, насколько возможно, на процедуру взвешивания, обычно выполняемую пользователем, – например, взвешивание отдельных нагрузок, непрерывное

взвешивание с возрастающим или убывающим значением массы, использование устройства тарирования.

Методика калибровки дополнительно может включать в себя рекомендации для пользователя весов в отношении погрешностей измерений и их неопределенностей, показаний при обычных условиях эксплуатации весов, и / или правил преобразования показания, полученного для взвешиваемого объекта, в значение массы или условное значение массы этого объекта.

Представленная в данном руководстве информация предназначена и должна использоваться:

1. органами аккредитации лабораторий для калибровки весов,
2. лабораториями, аккредитованными для калибровки весов,
3. испытательными центрами, лабораториями или изготовителями, использующими весы для измерений, связанных с качеством продукции, на которое распространяются требования СМК (например, серии ИСО 9000, ИСО 10012, ИСО/МЭК 17025).

3 ТЕРМИНОЛОГИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Используемая в данном документе терминология, главным образом, основана на существующих документах:

- РМГ 29-2013 «Метрология. Основные термины и определения»;
- ГОСТ OIML R76-1-2011 [2] (или EN 45501 [3]) для терминов, относящихся к функционированию, конструкции и метрологическим характеристикам весов;
- ГОСТ OIML R111-1-2009 [4] для терминов, относящихся к гирям;
- JCGM 200 [5] для терминов, относящихся к калибровке.

Для таких терминов в настоящем документе объяснения не приводятся, но при первом появлении в тексте даются ссылки.

Обозначения, смысл которых не самоочевиден, поясняются при их первом использовании в тексте. Те обозначения, которые используются более чем в одном разделе основного документа, приведены в Приложении D.

4 ОБЩИЕ АСПЕКТЫ КАЛИБРОВКИ

4.1 Элементы калибровки

Калибровка заключается в

1. приложении испытательных нагрузок к весам в заданных условиях,
2. определении погрешности или изменения показания, и
3. оценке неопределенности измерений, которая присуща данным результатам измерений.

4.1.1 Диапазон калибровки

Если заказчиком не требуется иное, калибровка распространяется на весь диапазон взвешивания [2] (или [3]) от нуля до максимальной нагрузки *Max*. Заказчик может задать часть диапазона взвешивания, ограниченную минимальной нагрузкой *Min* и

наибольшей нагрузкой при взвешивании Max' , или отдельные номинальные нагрузки, для которых ему требуется калибровка.

Для весов с несколькими диапазонами взвешивания [2] (или [3]), заказчик должен определить диапазон(ы), которые требуется калибровать. Всё написанное выше в данном пункте можно применять к каждому диапазону в отдельности.

4.1.2 Место калибровки

Обычно калибровку выполняют на месте эксплуатации весов.

Если после калибровки весы перемещают в другое место, то возможные влияния, обусловленные:

1. разницей в значениях ускорения свободного падения;
2. изменением условий окружающей среды;
3. механическими и температурными условиями транспортирования,

могут изменить метрологические характеристики весов и сделать калибровку недействительной. Если для отдельных весов или типа весов невосприимчивость к таким влияниям не была чётко продемонстрирована, то перемещений весов после калибровки следует избегать. Если такая невосприимчивость не может быть доказана, сертификат о калибровке не должен приниматься в качестве доказательства прослеживаемости измерений.

4.1.3 Предварительные условия, подготовительные операции

Калибровку следует выполнять при соблюдении следующих условий:

1. Весы можно легко идентифицировать;
2. Все функции весов свободны от влияния загрязнений или повреждений, и функции, необходимые для калибровки, выполняются в соответствии с назначением;
3. Представления значений массы однозначны и показания легко считываются;
4. Обычные условия эксплуатации (воздушные потоки, вибрации, прочность площадки, на которой установлены весы и т.п.) приемлемы для калибруемых весов;
5. Перед калибровкой весы включены в течение необходимого для прогрева времени, например в течение времени, указанного в документации изготовителя, или установленного пользователем;
6. Весы выставлены по уровню, если требуется;
7. Весы предварительно нагружались до приблизительно наибольшей испытательной нагрузки, по крайней мере, один раз; рекомендуется повторное нагружение.

Весы, рассчитанные на регулярную юстировку перед использованием, следует юстировать перед калибровкой, если с заказчиком не согласовано иное. Юстировку следует выполнять средствами, обычно используемыми заказчиком, и в соответствии с инструкциями изготовителя, если применимо. Юстировку следует осуществлять посредством внешних или встроенных испытательных нагрузок.

Наиболее приемлемой рабочей процедурой для весов с высоким разрешением (с относительным разрешением лучшим, чем 1×10^{-5} от полной шкалы) является выполнение юстировки весов непосредственно перед калибровкой, а также непосредственно перед использованием.

Весы, оснащенные устройством автоматической установки нуля или устройством слежения за нулем [2] (или [3]), калибруются работающими или отключенными устройствами, как это будет определено пользователем (заказчиком).

Для калибровки на месте следует попросить пользователя обеспечить во время калибровки преобладание обычных условий эксплуатации. Таким образом, влияние, таких факторов как: воздушные потоки, вибрации, наклон площадки, на которой выставлены весы, отразится на измеряемых величинах и будет присутствовать в оцениваемой неопределенности измерений.

4.2 Испытательная нагрузка и показание

4.2.1 Основное соотношение между нагрузкой и показанием

В общем виде показание весов пропорционально силе, с которой воздействует взвешиваемый объект массой m на грузоприемное устройство

$$I = k_s m g (1 - \rho / \rho_a) \quad (4.2.1-1)$$

где g местное ускорение свободного падения;
 ρ_a плотность окружающего воздуха;
 ρ плотность взвешиваемого объекта;
 k_s юстировочный коэффициент.

Заключенные в скобки члены учитывают уменьшение этой силы вследствие воздействия на взвешиваемый объект выталкивающей силы воздуха.

4.2.2 Действие выталкивающей силы воздуха

В настоящее время для юстировки и/или калибровки весов принято использовать гири, откалиброванные по условному значению массы m_c^1 . В принципе, при стандартной плотности воздуха $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ весы должны показывать условную массу m_c взвешиваемого объекта.

Юстировку выполняют при плотности воздуха ρ_{as} , а влияния g и действующей выталкивающей силы на юстировочную гирю с условной массой m_c включаются в юстировочный коэффициент k_s . Следовательно, во время юстировки показание I_s равно

$$I_s = m_{cs} \quad (4.2.2-1)$$

4.2.2-1 Конкретную юстировку выполняют в условиях, характеризуемых конкретными значениями g_s , $\rho_s \neq \rho_c$, и $\rho_{as} \neq \rho_0$, в обозначении индекс «s», и уравнение 4.2.2-1 действительно только при этих условиях. Для другого тела с условной массой m_c с $\rho \neq \rho_s$, взвешенного на тех же весах, но при других условиях: $g \neq g_s$ и $\rho_a \neq \rho_{as}$, показание в общем виде (пренебрегая членами 2-го и большего порядка) равно [6]

$$I = m_c (g/g_s) \{1 - (\rho - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_s) - (\rho - \rho_{as})/\rho_s\} \quad (4.2.2-3)$$

¹ Условное значение массы m_c некоторого тела определено в [4] как численное значение массы m гири со стандартной плотностью $\rho_c = 8000 \text{ кг/м}^3$, которая уравновешивает это тело при 20°C в воздухе с плотностью ρ_0 :

$$m_c = m \{ (1 - \rho/\rho_0) / (1 - \rho/\rho_c) \} \quad (4.2.2-2)$$

где $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$ = стандартное значение плотности воздуха

Если весы не перемещали, то значение g не изменилось, поэтому $g/g_s = 1$. Именно этот случай рассматривается далее.

Показание весов будет совпадать с условной массой взвешиваемого тела только в некоторых частных случаях, самыми очевидными являются:

- $\rho_a = \rho_{as} = \rho_0$;
- взвешивание выполняется при $\rho_a = \rho_{as}$ и плотность взвешиваемого тела $\rho = \rho_s$.

Формула еще более упрощается в случае, когда некоторые значения плотностей равны:

- а) взвешивание некоторого тела в воздухе со стандартной плотностью: $\rho_a = \rho_0$, тогда

$$I = m_c [1 - (\rho - \rho_{as}) / \rho_s] \quad (4.2.2-4)$$

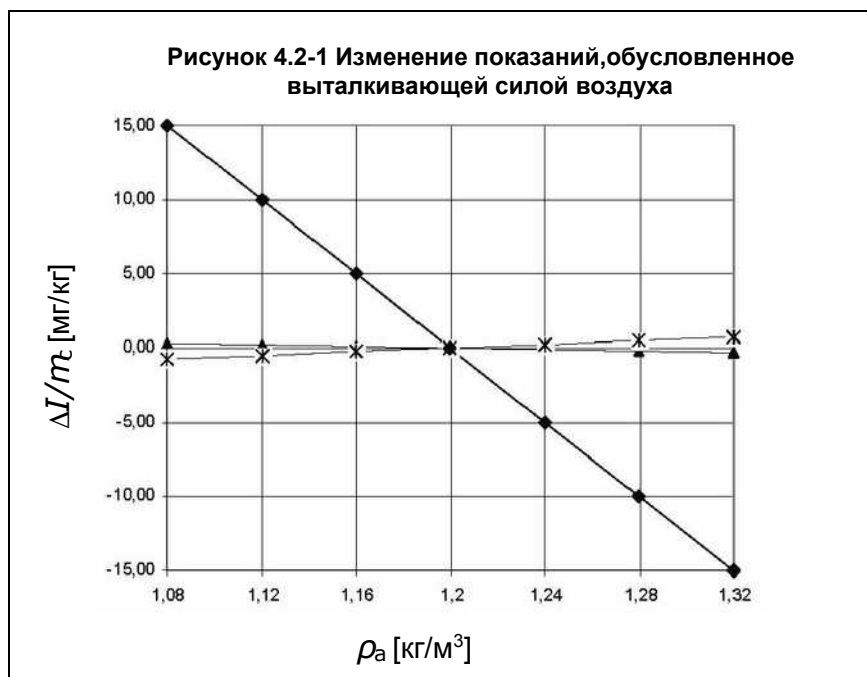
- б) взвешивание некоторого тела с плотностью равной плотности юстировочной гири $\rho = \rho_s$, тогда снова (как в случае а))

$$I = m_c [1 - (\rho - \rho_{as}) / \rho_s] \quad (4.2.2-5)$$

- с) взвешивание при такой же плотности воздуха, как во время юстировки: $\rho_a = \rho_{as}$ тогда

$$I = m_c [1 - (\rho - \rho_0)(1/\rho - 1/\rho_s)] \quad (4.2.2-6)$$

На рисунке 4.2-1 показаны примеры величин относительных изменений $\Delta I / m_c = (I - m_c) / m_c$ для весов, отъюстированных гирями с $\rho_s = \rho_0$ при разных типовых значениях плотности гири, используемых при калибровке.



Линия  относится к телу с $\rho = 7810 \text{ кг/м}^3$, взвешиваемому при $\rho_a = \rho_{as}$ (как в перечислении с))

Линия  относится к телу с $\rho = 8400 \text{ кг/м}^3$, взвешиваемому при $\rho_a = \rho_{as}$ (как в перечислении с))

Линия  относится к телу с $\rho = \rho_s = \rho_c$ после юстировки при $\rho_{as} = \rho_0$ (как в перечислении b))

Очевидно, что при этих условиях изменение плотности воздуха имеет намного большее влияние, чем изменение плотности тела.

Дополнительные сведения о плотности воздуха даны в приложении А, и о выталкивающей силе воздуха для гирь - в приложении Е.

4.2.3 Влияния конвекции

Если гири были транспортированы к месту калибровки, их температура может отличаться от температуры весов и окружающей среды. Разность температур ΔT определяется как разность температур гири и окружающего воздуха. В этом случае следует отметить два явления:

- Начальная разность температур ΔT_0 может быть снижена до меньшего значения ΔT за счет акклиматизации за время Δt ; акклиматизация происходит быстрее для гирь меньшего размера, нежели большого.
- Когда гирю помещают на грузоприемное устройство, существующая разность температур ΔT создает вокруг гири поток воздуха, приводящий к возникновению паразитных сил, которые вызывают наблюдаемое изменение массы гири Δm_{conv} . Знак Δm_{conv} обычно противоположен знаку ΔT и значение больше для гирь большего размера.

Соотношение между указанными величинами: ΔT_0 , Δt , ΔT , m и Δm_{conv} нелинейны и зависят от условий теплообмена между гирями и окружающей их средой – см. [7].

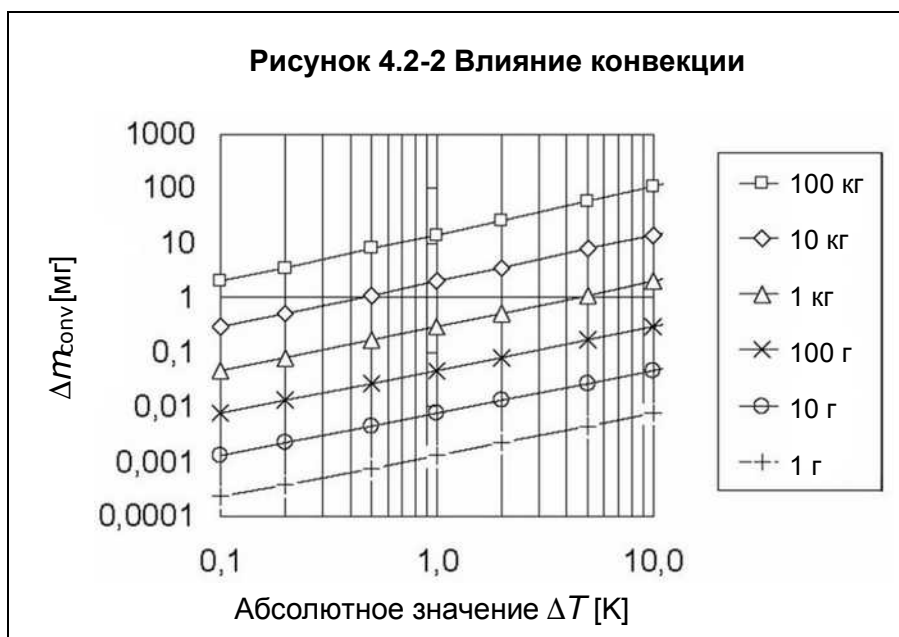


Рисунок 4.2-2 дает представление о величине наблюдаемого изменения массы в зависимости от разности температур для некоторых отдельных номинальных значений массы гирь.

Этот эффект следует учитывать либо, давая гилям акклиматизироваться до такой степени, чтобы оставшееся изменение массы $\Delta m_{\text{кон}}$ было пренебрежимо мало, принимая во внимание требуемую заказчиком неопределенность калибровки, либо принимая во внимание возможное изменение показания в бюджете неопределенности калибровки. Эффект может быть значительным для гирь высокой точности, например для гирь класса точности E_2 или F_1 по ГОСТ OIML R1 1 1 -2 0 0 9 [4].

Более подробные сведения приведены в приложении F.

4.2.4 Поправка на выталкивающую силу для опорного значения массы

Для определения погрешности показания весов используют гири с известным условным значением массы m_{Cal} . Их плотность ρ_{Cal} обычно отличается от стандартного значения ρ , а плотность воздуха ρ_{aCal} во время калибровки обычно отличается от ρ_0 .

Погрешность показания $E_{\text{равна}}$

$$E = I - m_{\text{ref}} \quad (4.2.4-1)$$

где m_{ref} – опорное значение массы, m_{ref} . В результате влияний выталкивающей силы воздуха, конвекции, дрейфа и других факторов, которые могут привести к небольшим поправочным членам δm , опорное значение m_{ref} не будет точно равноусловному значению массы m_{Cal}

$$m_{\text{ref}} = m_{\text{Cal}} + \delta m_{\text{B}} + \delta m_{\text{..}} \quad (4.2.4-2)$$

Поправка на выталкивающую силу воздуха δm_{B} зависит от величин ρ_{s} и ρ_{as} , которые были во время юстировки, но они обычно неизвестны. Предполагается, что используются гири стандартной плотности $\rho_{\text{s}} = \rho_{\text{c}}$. Общим выражением для поправки из (4.2.2-3) будет

$$\delta m_{\text{B}} = -m_{\text{Cal}}[(\rho_{\text{aCal}} - \rho)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_{\text{c}}) + (\rho_{\text{aCal}} - \rho_{\text{as}})/\rho_{\text{c}}] \quad (4.2.4-3)$$

Для плотности воздуха ρ_{a} рассмотрены две ситуации. Если юстировка весов выполняется непосредственно перед калибровкой, то $\rho_{\text{as}} = \rho_{\text{aCal}}$. Тогда уравнение (4.2.4-3) принимает простой вид

$$\delta m_{\text{B}} = -m_{\text{Cal}}[(\rho_{\text{aCal}} - \rho)(1/\rho_{\text{Cal}} - 1/\rho_{\text{c}})] \quad (4.2.4-4)$$

Если юстировка весов выполняется независимо от калибровки, при неизвестной плотности воздуха ρ_{as} , то невозможно вычислить последний член уравнения (4.2.4-3), который, по существу, составляет часть погрешности показания. Вносимая поправка должна быть (4.2.4-4) [10].

Далее индекс «Cal» будет опускаться, за исключением случаев, где он необходим во избежание неясности.

4.3 Испытательные нагрузки

Испытательными нагрузками предпочтительно должны быть гири, прослеживаемые до первичного эталона единицы массы СИ. Однако можно использовать другие испытательные нагрузки (далее – грузы) для испытаний сравнительного характера, например, при испытании нецентрального нагружения, испытании на повторяемость; или для простого нагружения весов, например, предварительное нагружение, тарная нагрузка при работе устройства тарирования, замещающие грузы.

4.3.1 Гири

Прослеживаемость гирь, используемых при испытаниях, должна быть продемонстрирована посредством калибровки/поверки [8], заключающейся в

1. определении условного значения массы m_c и/или поправки к номинальному значению m_N : $\delta m_c = m_c - m_N$, вместе с расширенной неопределенностью калибровки U_{95} , или
2. подтверждении того, что m_c находится в пределах максимально допускаемых погрешностей m_{pe}
 $m_N - (m_{pe} - \Delta) \leq m \leq m_N + (m_{pe} - \Delta)$.

Гири должны также отвечать следующим требованиям в той степени, которая применима к их точности:

3. плотность ρ_s достаточно близка к стандартной $\rho_c = 8\,000\text{ кг/м}^3$,
4. чистота поверхности гири (шероховатость), достаточная для предотвращения изменений массы вследствие загрязнения или образования адгезионной плёнки,
5. магнитные свойства таковы, что взаимодействие с калибруемыми весами минимально.

Гири должны соответствовать ГОСТ OIMLR1 11 -1 -2 0 0 9 [4].

Максимально допускаемые погрешности или неопределенности калибровки гирь должны быть согласованы с ценой деления шкалы d [2] (или [3]) весов и/или требованием заказчика к неопределенности калибровки весов.

4.3.2 Испытательные грузы

Для некоторых применений, упомянутых в 4.3, 2-е предложение, нет необходимости в том, чтобы условное значение массы испытательной нагрузки было известно. В таких случаях можно использовать не гири, а любые грузы, уделяя должное внимание следующему:

1. Форма, материал, состав должны обеспечивать удобное обращение;
2. Форма, материал, состав должны позволять легко определять положение центра тяжести;
3. Их масса должна оставаться постоянной на протяжении всего периода использования для калибровки;
4. Их плотность должна быть легко оцениваемой;
5. Для грузов малой плотности (например, наполненные песком или гравием контейнеры) может потребоваться особое внимание в отношении выталкивающей силы воздуха. Требуется контроль за температурой и атмосферным давлением на протяжении всего периода использования этих грузов для калибровки.

4.3.3 Использование замещающих грузов

Испытательная нагрузка, условное значение массы которой должно быть известным, должна полностью состоять из гирь. Но когда это невозможно, или же гири недостаточно для калибровки нормированного диапазона весов или диапазона, согласованного с заказчиком, для замещения можно использовать любой другой груз, удовлетворяющий 4.3.2. Калибруемые весы используются в качестве компаратора для

подбора замещающего груза L_{sub} таким образом, чтобы он давал приблизительно такое же показание I , как соответствующая нагрузка L_{st} составленная из гирь.

Первая испытательная нагрузка L_{T1} , составленная из гирь m_{ref} , дает показание

$$I(L_{\text{st}}) = I(m_{\text{ref}}) \quad (4.3.3-1)$$

После удаления L_{st} помещают замещающие грузы L_{sub1} и подбирают их массу так, чтобы получить приблизительно такое же показание весов

$$I(L_{\text{sub1}}) \approx I(m_{\text{ref}}) \quad (4.3.3-2)$$

поэтому

$$L_{\text{sub1}} = m_{\text{ref}} + I(L_{\text{sub1}}) - I(m_{\text{ref}}) = m_{\text{ref}} + \Delta I \quad (4.3.3-3)$$

Следующую испытательную нагрузку L_{T2} составляют добавлением m_{ref}

$$L_{T2} = L_{\text{sub1}} + m_{\text{ref}} = 2m_{\text{ref}} + \Delta I \quad (4.3.3-4)$$

m_{ref} снова заменяют замещающим грузом L_{sub1} , подбирая до $I(L_{T2})$.

Эту процедуру можно повторять для получения испытательных нагрузок $L_{T3}, \dots, L_{Tn}$

$$L_{Tn} = nm_{\text{ref}} + \Delta I + \Delta I + \dots + \Delta I_1 \quad (4.3.3-5a)$$

Однако с каждым этапом замещения неопределенность общей испытательной нагрузки возрастает значительно больше, чем при составлении ее только из гирь, вследствие влияний повторяемости и разрешения весов. – ср. также 7.1.2.6².

Если испытательная нагрузка L_{T1} составлена более чем из одной гири, можно сначала использовать гири для создания N отдельных испытательных нагрузок $m_{\text{ref},k}$ ($k = 1, \dots, N$) с условием

$$m_{\text{ref},1} < m_{\text{ref},2} < \dots < m_{\text{ref},N} = m_{\text{ref}} = L_{T1}. \quad (4.3.3-6)$$

Далее L_{T1} заменяют замещающим грузом L_{sub1} , и затем испытательные нагрузки (гири) m_{ref} можно снова последовательно добавлять. Отдельные испытательные нагрузки будут обозначаться $L_{Tn,k}$, где

$$L_{Tn,k} = (n - 1)m_{\text{ref}} + m_{\text{ref},k} + \Delta I + \Delta I + \dots + \Delta I_1 \quad (4.3.3-5b)$$

4.4 Показания

4.4.1 Общие сведения

Любое показание I , относящееся к испытательной нагрузке, представляет собой разность показаний весов с нагрузкой I_L и без нагрузки I_0 , (перед нагружением)

² Пример: для весов с $\text{Max} = 5000$ кг и $d = 1$ кг стандартная неопределенность для 5 т гирь класса точности М₁ – исходя из их номинального значения и используя (7.1.2-3) – равна приблизительно 150 г, тогда как стандартная неопределенность испытательной нагрузки составленной из 1 т гирь и 4 т замещающих грузов, используя (7.1.2-16a), будет приблизительно 1,2 кг. В данном примере не учитывается вклад неопределенностей, обусловленных выталкивающей силой воздуха и дрейфом. Также принято, что в неопределенность показания входит только погрешность округления без нагрузки и с нагрузкой.

$$I = \bar{I} - I_0 \quad (4.4.1-1a)$$

Предпочтительно для любого испытания записывать показания без нагрузки вместе с показаниями при нагрузке. В случае если пользователь весов для каждого нагружения учитывает невозврат показания к нулю при обычном использовании весов, например, в случае значительного дрейфа, в показание можно вносить поправку согласно уравнению (4.4.1-1b)³. Однако запись показаний без нагрузки может быть излишней, если методика испытаний требует установки нулевого показания весов перед нагружением.

Для любой испытательной нагрузки, в том числе и нулевой (без нагрузки), показание /весов считывают и записывают только, если его можно считать стабильным. Если высокое разрешение весов или условия окружающей среды на месте калибровки не позволяют получить стабильное показание, то следует оценивать и записывать среднее значение вместе с информацией о наблюдаемых изменениях (например, разброс значений, дрейф в обоих направлениях).

Во время калибровочных испытаний следует записывать исходные показания, а не погрешности или изменения показаний.

4.4.2 Разрешение

Показания обычно получают в виде целых чисел, кратных действительной цене деления шкалы d .

По усмотрению калибровочной лаборатории и с разрешения заказчика можно применять средства для получения показаний с разрешением более высоким, чем d , например, когда проверяется соответствие техническим требованиям и требуется меньшая неопределенность. Такими средствами могут быть

1. Переключение показывающего устройства на меньшую цену деления шкалы $d_T < d$ («сервисный режим»). В таком случае показания получают в виде целого числа, кратного d_T .
2. Приложение небольших дополнительных гирь с шагами $d_T = d/5$ или $d/10$ для более точного определения нагрузки, при которой показание однозначно изменяется с I на $I + d$ (метод точки перехода). В этом случае показание I записывают вместе с суммой ΔL для n дополнительных гирь, необходимых для увеличения I на одно d .

Показание I_L равно

$$I_L = I + d/2 - \Delta L \approx d/2 - n d \quad (4.4.2-1)$$

Если применяется «метод точки перехода», то рекомендуется применять его для показаний ненагруженных весов и для показаний с нагрузкой.

5 МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Испытания обычно выполняют для определения

³ В случае линейного дрейфа показание с поправкой получают согласно

$$I = \bar{I} - (I_0 + I_n)/2 \quad (4.4.1-1b)$$

где I_0 и I_n - показания без нагрузки до и после приложения нагрузки.

- повторяемости показаний,
- погрешности показаний,
- влияния на показание нецентрального положения нагрузки.

Калибровочной лаборатории, принимающей решение о количестве измерений для обычной процедуры калибровки, следует учитывать, что большее количество измерений ведет к уменьшению неопределенности результата измерения, но увеличивает затраты.

Принимая во внимание обычное использование весов, детали испытания, выполняемого для отдельной калибровки, можно закрепить в соглашении между заказчиком и калибровочной лабораторией. Возможно соглашение сторон о дополнительных испытаниях и проверках, которые могут способствовать оценке метрологических характеристик весов при особых условиях эксплуатации. Любое такое соглашение должно базироваться на минимальном количестве испытаний, описанных в последующих разделах.

5.1 Испытание на повторяемость

Данное испытание заключается в повторном помещении одной и той же испытательной нагрузки на грузоприемное устройство, при одинаковых манипуляциях с нагрузкой и весами, и при постоянных условиях испытания.

Испытательную нагрузку не требуется калибровать или поверять, за исключением случая, когда результаты служат для определения погрешности показания согласно 5.2.

Испытание выполняют, по меньшей мере, с одной испытательной нагрузкой L_T , которую следует выбрать из разумного соотношения максимальной нагрузки весов Max разрешения весов (цены деления шкалы), чтобы можно было оценить метрологические характеристики весов. Для весов с постоянной ценой деления шкалы d нагрузка, лежащая в интервале (приблизительно) $0,5Max \leq L_T \leq Max$ достаточно обычна; её частую уменьшают для весов, у которых L_T может составлять несколько 1000 кг. Для многоинтервальных весов [2] (или [3]) может быть предпочтительной нагрузка чуть меньше Max . Для многодиапазонных весов может быть достаточной нагрузка чуть меньше максимальной нагрузки диапазона с наименьшей ценой деления шкалы. Особое значение L_T может быть принято сторонами, когда это оправдано с точки зрения определенного применения весов.

Данное испытание может быть выполнено более чем в одной точке, с испытательными нагрузками L_{Tj} , $1 \leq j \leq k_L$, где k_L = число испытательных точек.

Перед выполнением испытания показание следует установить на нуль. Нагрузку следует прикладывать не меньше 5 раз, или не меньше 3 раз, если $L_T \geq 100$ кг.

Показания I_{Li} записывают при каждом нагружении. После каждого разгружения при необходимости показание следует установить на нуль; запись показания без нагрузки I_{0i} может быть целесообразна согласно 4.4.1. Дополнительно следует зафиксировать состояние (включено/отключено) устройства установки нуля и устройства слежения за нулем, если таковые имеются.

5.2 Испытание на погрешность показаний

Данное испытание выполняют с $k_L \geq 5$ различными испытательными нагрузками L_{Tj} , $1 \leq j \leq k_L$, достаточно равномерно распределенными по обычному диапазону

взвешивания или в отдельных испытательных точках, принятых согласно 4.1.1. Примеры задаваемых значений:

- $k_L = 5$: нуль или Min ; 0,25 Max ; 0,5 Max ; 0,75 Max ; Max . Возможно отклонение массы фактических испытательных нагрузок от задаваемых значений не более чем на 0,1 Max при условии, что разность между последовательными испытательными нагрузками не меньше 0,2 Max ,
- $k_L = 11$: нуль или Min , 10 приращений по 0,1 Max до Max . Возможно отклонение массы фактических испытательных нагрузок от задаваемых значений не более чем на 0,05 Max при условии, что разность между последовательными испытательными нагрузками не меньше 0,08 Max ,

Целью данного испытания является определение погрешности весов во всем диапазоне взвешивания.

Если согласован значительно меньший диапазон калибровки, число испытательных нагрузок можно соответственно сократить, при условии сохранения не менее 3 испытательных точек, включая Min' и Max' , и разности между двумя последовательными испытательными нагрузками не больше 0,15 Max .

Необходимо, чтобы испытательные нагрузки состояли из соответствующих гирь или замещающих грузов согласно 4.3.3.

Перед выполнением испытания показание следует установить на нуль. Испытательные нагрузки L_T обычно прикладывают однократно одним из следующих способов:

1. увеличивая массу пошагово с разгрузкой между отдельными шагами – в соответствии с большинством использований весов для обычных взвешиваний отдельных грузов;
2. непрерывно пошагово увеличивая массу без разгрузки между отдельными шагами; возможно проявление эффекта «ползучести», но при этом требуется меньше манипуляций с нагрузкой (наложения нагрузки на грузоприёмное устройство и снятия нагрузки) по сравнению с перечислением 1;
3. непрерывно пошагово увеличивая массу, а затем пошагово уменьшая массу – процедура, принятая для испытаний, выполняемых в ходе поверки в [2] (или [3]), комментарии такие же, как для перечисления 2;
4. непрерывно пошагово уменьшая массу, начиная с Max – имитация использования весов в качестве бункерного дозатора для вычитающего (субтрактивного) взвешивания, комментарии такие же, как для перечисления 2.

Для многоинтервальных весов – см. [2] (или [3]), указанные выше способы можно модифицировать под меньшую массу пошаговой нагрузки чем указано для Max , применяя увеличение и/или уменьшение тарных нагрузок, тарируя весы, и используя испытательную нагрузку близкую, но не превышающую Max_1 для получения показаний с d_1 .

Для весов с несколькими диапазонами [2] (или [3]) заказчик должен определить диапазон(ы), которые требуется калибровать (см. 4.1.1, 2-й абзац).

Дополнительные испытания могут потребоваться для оценки метрологических характеристик весов в специальных условиях применения, например, показаний после

операции тарирования (при работе с устройством тарирования), изменений показания при постоянной нагрузке в течение определенного времени и т.д.

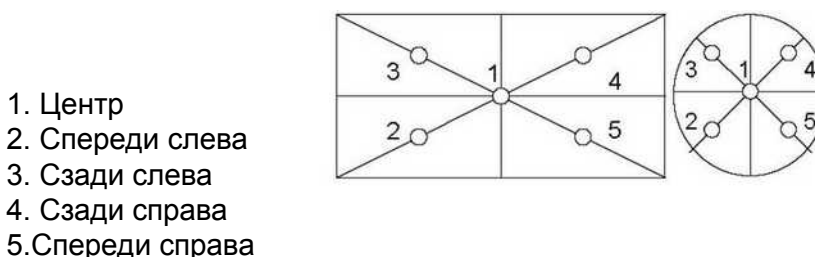
Испытание или отдельные нагружения можно повторять для совмещения с испытанием на повторяемость согласно 5.1.

Показания I_{Lj} регистрируют для каждой нагрузки. Если нагрузку снимают, то показание ненагруженных весов следует контролировать и при необходимости устанавливать на нуль; регистрация показаний без нагрузки I_{0j} может быть целесообразна согласно 4.4.1.

5.3 Испытание на нецентральное нагружение

Данное испытание заключается в помещении испытательной нагрузки L_{ecc} в различные точки грузоприемного устройства так, чтобы центр тяжести прикладываемой нагрузки находился в положениях, показанных на рисунке 5.3-1 или насколько возможно равноценных.

Рис. 5.3-1 Положения нагрузки на грузоприёмном устройстве при испытании на нецентральное нагружение



Возможны применения, при которых испытательную нагрузку невозможно поместить в центр грузоприемного устройства или вблизи него. В таком случае достаточно помещать испытательную нагрузку в остальные положения, как показано на рисунке 5.3-1. В зависимости от формы грузоприёмного устройства число положений вне центра может отличаться от показанного на рисунке 5.3-1.

Для сокращенного диапазона взвешивания испытательная нагрузка L_{ecc} должна быть приблизительно $Max/3$ или больше, либо $Min' + (Max' - Min')/3$ или больше.

Для специальных грузоприемных устройств следует учитывать рекомендации изготовителя, если таковые имеются, и, обусловленные конструкцией весов, очевидные ограничения – например, см. ГОСТ OIML R7 6 -1 -2 0 1 1 [2] (или EN 45501 [3]).

Для многодиапазонных весов [2] (или [3]) испытание следует выполнять только в диапазоне с наибольшей максимальной нагрузкой, указанной заказчиком (см. 4.1.1, 2-й абзац).

Испытательную нагрузку не требуется калибровать или поверять, за исключением случая, когда результаты служат для определения погрешностей показания согласно 5.2.

Испытание можно выполнять различными способами:

1. Перед выполнением испытания показание устанавливают на нуль. Испытательную нагрузку сначала помещают в положение 1, затем - в остальные 4 положения в произвольном порядке. Показания I_{Li} регистрируют для каждого положения нагрузки.

2. Испытательную нагрузку сначала помещают в положение 1, весы тарируют. Затем испытательную нагрузку помещают в остальные 4 положения в произвольном порядке. Показания I_{Li} регистрируют для каждого положения нагрузки.
3. Перед выполнением испытания показание устанавливают на нуль. Испытательную нагрузку сначала помещают в положение 1, убирают, и затем помещают в следующее положение и т.д., до снятия из последнего положения. Показания I_{Li} регистрируют для каждого положения нагрузки. После каждого снятия нагрузки показание следует проверить и установить на нуль, если оно отличается от нуля; регистрация показаний без нагрузки I_{0i} может быть целесообразна согласно 4.4.1.
4. Испытательную нагрузку сначала помещают в положение 1, весы тарируют. Затем испытательную нагрузку помещают в следующее положение и потом обратно в положение 1 и т.д., до снятия из последнего положения. Показание в центре I_{L1} записывают индивидуально для каждого показания вне центра I_{Li} .

Способы 3 и 4 рекомендуются для весов, которые во время испытания на нецентральное нагружение показывают значительный дрейф.

Для способов 2 и 4 устройство установки на нуль или устройство слежения за нулем должно быть отключено во время всего испытания на нецентральное нагружение.

5.4 Вспомогательные измерения

Рекомендуются следующие вспомогательные измерения или записи, в особенности, если калибровку требуется выполнить с наименьшей возможной неопределенностью.

С учетом влияний выталкивающей силы воздуха – ср. 4.2.2:

Температуру воздуха в разумной близости от весов во время калибровки следует измерять, по меньшей мере, однократно. Если весы используются в регулируемых условиях окружающей среды, диапазон изменения температуры следует записать, например, по термографу, настройкам регулирующего устройства и т.д.

Атмосферное давление или, по умолчанию, высота места над уровнем моря также может быть полезна.

С учетом влияний конвекции – ср. 4.2.3:

Для предотвращения чрезмерных влияний конвекции следует проявлять особую осторожность с соблюдением предельного значения для разности температур гирь и весов, и/или фиксации (записи) времени, в течение которого проходила акклиматизация. Для контроля за разностью температур может быть полезен термометр, помещенный в футляр для гирь.

С учетом влияний магнитного взаимодействия:

Для весов с высоким разрешением рекомендуется проверка отсутствия заметного влияния магнитного взаимодействия. Гирю взвешивают вместе с подставкой из немагнитного материала (например, дерево, пластмасса), помещаемой сверху на гирю и снизу под гирю для получения двух различных показаний.

Если разность между этими двумя показаниями значительно отличается от нуля, то данный факт следует отразить в качестве предостережения в сертификате калибровки.

6 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Приведенные в главах 6 и 7 процедуры и формулы служат основой для оценки результатов калибровочных испытаний и поэтому не требуется дополнительное описание в протоколе испытаний. Если используемые процедуры и формулы отличаются от приведенных в данном руководстве, то в протоколе испытаний могут потребоваться дополнительные сведения.

Это не означает, что все формулы, обозначения и/или индексы должны быть использованы для представления результатов в сертификате калибровки.

В данном разделе используется определение показания I_j , приведенное в 4.4.

6.1 Повторяемость

По n показаниям I_{ji} для заданной испытательной нагрузки L_{Tj} вычисляют среднее квадратическое отклонение S_j .

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2} \quad (6.1-1)$$

где

$$\bar{I}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{ji} \quad (6.1-2)$$

Если испытание на повторяемость проведено только с одной испытательной нагрузкой, то индекс j можно опустить.

6.2 Погрешность показаний

6.2.1 Дискретные значения

Для каждой испытательной нагрузки L_{Tj} погрешность показания вычисляют согласно формуле:

$$E_j = I_j - m_{\text{ref}j} \quad (6.2-1)$$

Если показание I_j среднее из нескольких показаний I_{ji} , то его следует понимать как среднее значение согласно (6.1-2).

Опорное значение массы m_{ref} можно применить к его номинальному значению m_{Nj} :

$$m_{\text{ref}j} = m_{Nj} \quad (6.2-2)$$

или, точнее, к его действительному условному значению массы m_c :

$$m_{\text{ref}j} = m_{cj} = (m_{Nj} + \delta m_{ej}) \quad (6.2-3)$$

Если испытательная нагрузка составлена из нескольких гирь, то в приведенных выше формулах m_{Nj} заменяется на $(\sum m_N)_j$ и δm_{ej} заменяется на $(\sum \delta m_e)_j$.

Возможно появление дополнительных поправок согласно (7.1.2-1).

6.2.2 Характеристики диапазона взвешивания

Дополнительно или в качестве альтернативы дискретным значениям I_j , E_j , для диапазона взвешивания можно определить характеристическую, или калибровочную кривую, позволяющую оценивать погрешность показаний для любого показания I в пределах диапазона.

Функцию

$$E = f(I) \quad (6.2-4)$$

можно получить путем соответствующей аппроксимации, которая, в общем, должна быть основана на методе «наименьших квадратов»

$$\sum v_j^2 = \sum (f(I_j) - E_j)^2 = \text{minimum} \quad (6.2-5)$$

где

v_j – остаточные погрешности;

f – функция аппроксимации.

Аппроксимация должна также

- учитывать неопределенности $u(E_j)$ погрешностей;
- использовать моделирующую функцию, отражающую физические свойства весов, например, вид зависимости между нагрузкой и показанием $I = g(L)$;
- включать проверку математического соответствия найденных для моделирующей функции параметров с действительными данными.

Принимается, что для любой m_{Nj} погрешность E_j остается той же, если действительное показание I_j заменить его номинальным значением I_{Nj} . Поэтому для оценки (6.2-5) расчеты можно выполнять с наборами данных m_{Nj} , E_j , или I_{Nj} , E_j .

В приложении С даны рекомендации по выбору приемлемой формулы аппроксимации и по необходимым расчетам.

6.3 Влияние нецентрального нагружения

По показаниям I_i , полученным для различных положений нагрузки согласно 5.3, вычисляют разности ΔI_{cci}

Для методов 1 и 2 согласно 5.3

$$\Delta I_{cci} = I_{Li} - I_{L1} \quad (6.3-1)$$

Для метода 3 согласно 5.3

$$\Delta I_{cci} = (I_{Li} - I_{bi}) - I_{L1} \quad (6.3-2)$$

Для метода 4 согласно 5.3

$$\Delta I_{cci} = I_{Li} - I_{L1i} \quad (6.3-3)$$

где при расчёте разности ΔI_{ecc} для каждого показания при нецентральной позиции нагрузки I_L используется соответствующее показание при положении нагрузки в центре I_{L1i} .

7 НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

В этом и следующих разделах содержатся составляющие неопределенности, применимые к небольшим поправкам, которые пропорциональны некоторому определенному значению массы или некоторому определенному показанию. Для характеристики, представляющей отношение этой неопределенности к соответствующему значению массы или показанию, будет использоваться обозначение U_{rel} .

Пример: пусть

$$u(\delta m_{\text{corr}}) = m \cdot u(\text{corr}) \quad (7-1)$$

с безразмерным членом $u(\text{corr})$, то

$$u_{\text{rel}}(\delta m_{\text{corr}}) = u(\text{corr}) \quad (7-2)$$

Соответственно, относительная дисперсия будет обозначаться $u_{\text{rel}}^2(\delta m_{\text{corr}})$ и относительная расширенная неопределенность $U_{\text{rel}}(\delta m_{\text{corr}})$.

Для определения неопределенности члены второго порядка принимаются пренебрежимо малыми, но если вклады членов первого порядка исключаются, вклады членов второго порядка следует учитывать (см. JCGM 101 [9], 9.3.2.6).

7.1 Стандартная неопределенность для дискретных значений

Основная формула калибровки имеет следующий вид

$$E = I - m_{\text{ref}} \quad (7.1-1)$$

с дисперсией

$$u^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{\text{ref}}) \quad (7.1-2)$$

Когда используются замещающие грузы, см. 4.3.3, m_{ref} заменяют на $L_{\text{Tл}}$ или $L_{\text{Tл,кв}}$ в обоих выражениях.

Далее будут приведены пояснения для составляющих.

7.1.1 Стандартная неопределенность показания

Для учёта факторов, влияющих на показание весов, формулу (4.4.1-1) дополняют поправочными членами δI_{xx} , как показано ниже

$$I = I + \delta I_{\text{dig}L} + \delta I_{\text{тер}} + \delta I_{\text{ecc}} - I_0 - \delta I_{\text{dig}0} + \dots \quad (7.1.1-1)$$

Могут добавляться дополнительные поправочные члены из-за особых условий (влияния температуры, дрейф, гистерезис,...), которые далее не рассматриваются.

Математическое ожидание всех этих поправок равно нулю. Их стандартными неопределенностями являются нижеследующие.

7.1.1.1 δI_{dig0} *учитывает погрешность округления показания ненагруженных весов. Предельные значения для данной поправки равны $\pm d_0/2$ или $\pm d_T/2$ в зависимости от того, с какой ценой деления снимаются показания; принято прямоугольное распределение, отсюда

$$u(\delta I_{\text{dig0}}) = d_0 / (2\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2a)$$

или

$$u(\delta I_{\text{dig0}}) = d_T / (2\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2b)$$

соответственно.

* [В оригинале ошибочно указано δR_{dig0} – прим. перев.]

Примечание 1. ср. 4.4.2 о значении d_T .

Примечание 2. в весах утвержденного типа по ГОСТ OIML R 76-2011 [2] (или EN 45501 [3]) погрешность округления нулевого показания, установленного с помощью устройства установки нуля или устройства тарирования ограничена до $\pm d_0/4$, поэтому

$$u(\delta I_{\text{dig0}}) = d_0 / (4\sqrt{3}) \quad (7.1.1-2c)$$

7.1.1.2 δI_{digL} учитывает погрешность округления показания при нагрузке. Предельные значения для данной поправки равны: $\pm d_L/2$ или $\pm d_T/2$ в зависимости от того, с какой ценой деления снимаются показания; принимается прямоугольное распределение, отсюда

$$u(\delta I_{\text{digL}}) = d_L / 2\sqrt{3} \quad (7.1.1-3a)$$

или

$$u(\delta I_{\text{digL}}) = d_T / 2\sqrt{3} \quad (7.1.1-3b)$$

Примечание: в многоинтервальных весах d_L изменяется вместе с показанием I .

7.1.1.3 δI_{rep} учитывает повторяемость показаний весов; принимается нормальное распределение, оцениваемое как

$$u(\delta I_{\text{rep}}) = s(I) \quad (7.1.1-5)$$

где $s(I_j)$ определено в 6.1.

Если показание I является единственным отсчетом и выполнено только одно испытание на повторяемость, то эту неопределенность повторяемости можно рассматривать в качестве репрезентативной для всего диапазона весов.

Если показание I_j – среднее из N показаний, полученных с одной и той же испытательной нагрузкой при испытании на погрешность показания, то соответствующая стандартная неопределенность равна

$$u(\delta I_{\text{rep}}) = s(I) / \sqrt{N} \quad (7.1.1-6)$$

Если несколько значений S_j ($S_j = S(I_j)$ в сокращенной записи) определены с различными испытательными нагрузками, то следует использовать большее значение S_j для двух испытательных точек, содержащих показание, погрешность которого была определена.

Для многоинтервальных и многодиапазонных весов, когда испытание на повторяемость выполняют более чем в одном интервале/диапазоне, среднее квадратическое отклонение в каждом интервале/диапазоне можно рассматривать в качестве репрезентативного для всех показаний весов в соответствующем интервале/диапазоне.

Примечание: Для приводимого в сертификате калибровки среднего квадратического отклонения следует пояснять, относится оно к единичному показанию или среднему из N показаний.

7.1.1.4 δI_{ecc} учитывает погрешность вследствие смещения центра тяжести испытательной нагрузки относительно центра грузоприёмного устройства весов. Эта погрешность может возникать, когда испытательная нагрузка состоит из нескольких частей (нескольких гирь и/или грузов). Когда поправкой пренебречь нельзя, оценку её величины можно получить на основании следующих допущений:

- определяемые (6.3-1) разности ΔI_{ecc} пропорциональны расстоянию нагрузки от центра грузоприёмного устройства;
- определяемые (6.3-1) разности ΔI_{ecc} пропорциональны значению нагрузки;
- действительный центр тяжести испытательных нагрузок расположен относительно центра грузоприёмного устройства дальше, чем на половине расстояния между центром грузоприёмного устройства и положениями смещённых нагрузок, согласно рисунку 5.3-1.

Исходя из определенной согласно 6.3 наибольшей разности, δI_{ecc} оценивается как

$$\delta I_{ecc} \leq \{|\Delta I_{ecc}|_{\max} / (2 I_{ecc})\} I \quad (7.1.1-9)$$

Принимается прямоугольное распределение, поэтому стандартная неопределенность равна

$$u(\delta I_{ecc}) = I |\Delta I_{ecc}|_{\max} / (2 I_{ecc} \sqrt{3}) \quad (7.1.1-10)$$

или, в относительном виде

$$u_{rel}(\delta I_{ecc}) = |\Delta I_{ecc}|_{\max} / (2 I_{ecc} \sqrt{3}) \quad (7.1.1-11)$$

7.1.1.5 Стандартную неопределенность показания обычно получают из выражения

$$u^2(I) = d_0^2/12 + d_I^2/12 + u^2(\delta I_{ep}) + u_{rel}^2(\delta I_{ecc}) I^2 \quad (7.1.1-12)$$

Примечание 1: неопределенность $u(I)$ является постоянной только тогда, когда S постоянна, а вызываемая нецентральной нагрузкой погрешность не учитывается.

Примечание 2: первые два члена в правой части можно изменять в специальных случаях, как сказано в 7.1.1.1 и 7.1.1.2.

7.1.2 Стандартная неопределенность опорного значения массы

Из 4.2.4 и 4.3.1 опорное значение массы равно

$$m_{\text{ref}} = m_N + \delta m_e + \delta m_B + \delta m_D + \delta m_{\text{conv}} + \delta m \dots \quad (7.1.2-1)$$

Крайний справа член обозначает добавочные поправки, которые могут иметь место в особых условиях. Далее они не рассматриваются.

Поправки и их стандартные неопределенности следующие:

7.1.2.1 δm_e - поправка к номинальному значению массы m_N для получения условного значения массы m_e ; приводится в сертификате калибровки гирь вместе с расширенной неопределенностью калибровки U и коэффициентом охвата k . Стандартная неопределенность равна

$$u(\delta m_e) = U/k \quad (7.1.2-2)$$

Если гиря откалибрована с определенными допусками Tol , например, до mpe из ГОСТ OIML R1 1 1 -1 -2 0 0 9 [4], и если используется ее номинальное значение m_N , то $\delta m_e = 0$, и принимается прямоугольное распределение, тогда

$$u(\delta m_e) = Tol/\sqrt{3} \quad (7.1.2-3)$$

Когда испытательная нагрузка состоит из нескольких гирь, для учета предполагаемой корреляции стандартные неопределенности суммируются арифметически, а не через сумму квадратов. Для испытательных нагрузок, частично состоящих из замещающих грузов, см. 7.1.2.6.

7.1.2.2 δm_B - поправка на выталкивающую силу воздуха, как изложено в 4.2.4. Значение зависит от плотности ρ юстировочной гири и принятого диапазона значений плотности воздуха ρ_a в лаборатории.

$$\delta m_B = -m_N(\rho_a - \rho)(1/\rho - 1/\rho) \quad (7.1.2-4)$$

С относительной стандартной неопределенностью

$$u_{\text{rel}}^2(\delta m_B) = u^2(\rho_a)(1/\rho - 1/\rho)^2 + (\rho_a - \rho)^2 u^2(\rho)/\rho^4 \quad (7.1.2-5a)^4$$

Если значения ρ , $u(\rho)$, ρ_a и $u(\rho_a)$ известны, то их следует использовать для определения $u_{\text{rel}}(\delta m_B)$.

Если отсутствует информация о плотности ρ и её стандартной неопределенности, то проводят оценку этих величин в соответствии с общеизвестными данными или на основании информации, предоставленной изготовителем. В приложении Е1 даны международно принятые значения плотностей материалов, обычно используемых для изготовления гирь.

⁴ Более точной формулой для (7.1.2-5a) будет [10]

$$u_{\text{rel}}^2(\delta m_B) = u^2(\rho_a)(1/\rho - 1/\rho)^2 + (\rho_a - \rho)[(\rho_a - \rho) - 2(\rho_1 - \rho)]u^2(\rho)/\rho^4 \quad (7.1.2-5b)$$

где ρ_a - плотность воздуха во время калибровки гирь. Данная формула целесообразна, когда весы располагаются высоко над уровнем моря, в противном случае, возможна завышенная оценка неопределенности.

Плотность воздуха ρ_a и ее стандартную неопределенность можно рассчитать по температуре и атмосферному давлению при наличии данных (относительная влажность имеет меньшее влияние), или оценить ее исходя из высоты над уровнем моря.

Если установлено соответствие гирь ГОСТ OIML R1 11 -1 -2 0 0 9 [4], а информация о ρ и ρ_a отсутствует, можно обратиться к разделу 10 в ГОСТ OIMLR1 11 -1 -2 0 0 9. Поправки не вносятся, а относительные неопределенности равны:

если весы юстируют непосредственно перед калибровкой

$$u_{\text{rel}}(\delta m_B) \approx m p \phi(4 m_N \sqrt{3}), \quad (7.1.2-5c)$$

если весы не юстируют перед калибровкой

$$u_{\text{rel}}(\delta m_B) \approx (0,1 \rho / \rho_c + m p \phi(4 m_N)) / \sqrt{3} \quad (7.1.2-5d)$$

Если имеется информация о имеющих место изменениях температуры в месте расположения весов, то уравнение (7.1.2-5d) можно заменить следующим:

$$u_{\text{rel}}(\delta m_B) \approx \sqrt{1,07 \times 10^4 + 1,33 \times 10^6 K^{-2} \Delta T^2} \cdot \rho / \rho_c + m p \phi(4 m_N \sqrt{3}) \quad (7.1.2-5e)$$

где ΔT – наибольшее изменение температуры окружающей среды, которую можно принять для места расположения (подробности см. в приложениях A2.2 и A3).

[K⁻² – единица измерения температуры по шкале Кельвина. В таком виде формула приведена в английском оригинале документа – прим. перев.]

Из требования в сноске 5 можно получить предельные значения ρ : например, для класса E₂: $|\rho - \rho_c| \leq 200 \text{ кг/м}^3$, и для класса F₁: $|\rho - \rho_c| \leq 600 \text{ кг/м}^3$.

Примечание: Вследствие того, что плотность материалов, используемых для изготовления гирь, обычно ближе к ρ_c , чем позволяют пределы ГОСТ OIML R1 11 -1 -2 0 0 9, последние 3 формулы можно рассматривать в качестве верхних пределов для $u_{\text{rel}}(\delta m_B)$. Если простое сравнение этих значений с разрешением весов (d / Max) показывает их достаточную незначительность, то более тщательный расчет данной составляющей неопределенности исходя из действительных значений может быть излишним.

7.1.2.3 δm_D – поправка из-за возможного изменения (дрейфа) условного значения массы m_c с момента последней калибровки. Предельное значение D лучше принимать исходя из разности m_c , вычисленной по данным из сертификатов о калибровках гирь.

D можно оценить, учитывая качество гирь, а также интенсивность и аккуратность их использования, и, величина D , по меньшей мере, в несколько раз больше расширенной неопределенности $U(\delta m_c)$

$$D = k_D U(\delta m_c) \quad (7.1.2-10)$$

где k_D – выбираемое значение между 1 и 3.

В отсутствии информации о дрейфе значение D выбирают равным $m p$ согласно ГОСТ OIMLR1 11 -1 -2 0 0 9 [4].

⁵ Плотность используемого для гирь материала должна быть такой, чтобы отклонение в 10 % от стандартной плотности воздуха (1,2 кг/м³) не вызывало погрешность больше одной четверти от наибольшей допускаемой погрешности.

Не рекомендуется вносить поправки, но допустимо принять равномерное распределение в пределах $\pm D$ (прямоугольное распределение). Стандартная неопределенность тогда

$$u(\delta m_D) = D/\sqrt{3} \quad (7.1.2-11)$$

Если набор гирь откалиброван с нормированной расширенной относительной неопределенностью $U_{\text{rel}}(\delta m_e)$, то может быть приемлемым ввести относительное предельное значение для дрейфа $D_{\text{rel}} = D/m$ и относительную неопределенность для дрейфа

$$u_{\text{rel}}(\delta m_D) = D_{\text{rel}}/\sqrt{3} \quad (7.1.2-12)$$

7.1.2.4 δm_{conv} -поправка, обусловленная конвекцией согласно 4.2.3. Предельные значения Δm_{conv} в зависимости от известной разности температур ΔT и массы гири приведены в приложении F.

Это значение не рекомендуется использовать в качестве поправки, но допустимо принять равномерное распределение в пределах $\pm \Delta m_{\text{conv}}$. Стандартная неопределенность тогда:

$$u(\delta m_{\text{conv}}) = \Delta m_{\text{conv}}/\sqrt{3} \quad (7.1.2-13)$$

Можно полагать, что данное влияние существенно только для гирь классов точности F₁ или выше.

7.1.2.5 Стандартную неопределенность опорного значения массы получают из – ср. 7.1.2

$$u^2(m_{\text{ref}}) = u^2(\delta m_e) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{\text{conv}}) \quad (7.1.2-14)$$

составляющими с 7.1.2.1 по 7.1.2.4.

7.1.2.6 Если испытательная нагрузка частично состоит из замещающих грузов согласно 4.3.3, и испытательные нагрузки определяются согласно (4.3.3-5a), то стандартная неопределенность для суммы

$$L_{Tn} = nm_{\text{ref}} + \Delta I + \Delta J + \dots + \Delta_n I_1$$

описывается следующим выражением

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{\text{ref}}) + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots + u^2(I_{n-1})] \quad (7.1.2-15a)$$

где $u(m_{\text{ref}})$ из 7.1.2.5, и $u(I_j)$ из 7.1.1.5 для $I = (L_{Tj})$

Если испытательная нагрузка частично состоит из замещающих грузов согласно 4.3.3, и испытательные нагрузки определяются согласно (4.3.3-5b), то стандартная неопределенность для суммы

$$L_{Tn,k} = (n - 1)m_{\text{ref}} + m_{\text{ref},k} + \Delta I + \Delta J + \dots + \Delta_n I_1$$

описывается следующим выражением

$$u^2(L_{Tn,k}) = [(n - 1)u(m_{\text{ref}}) + u(m_{\text{ref},k})]^2 + 2[u^2(I_1) + u^2(I_2) + \dots + u^2(I_{n-1})] \quad (7.1.2-15b)$$

где $u(m_{\text{ref}})$ из 7.1.2.5, и $u(I_j)$ из 7.1.1.5 для $I = (I_{Tj})$

Примечание: Неопределенности $u(I_j)$ также следует учитывать для показаний, когда массу замещающих грузов подбирают так, чтобы I стало нулевым.

В зависимости от типа замещающих грузов, может оказаться необходимым добавить дополнительные составляющие:

- из-за нецентрального нагружения согласно 7.1.1.4 для некоторых или всех фактических показаний $I(L_{Tj})$
- из-за воздействия выталкивающей силы воздуха на замещающие грузы, когда они выполнены из материалов с низкой плотностью (например, песок, гравий) и плотность воздуха значительно изменяется во время использования замещающих грузов.

Если $u(I_j) = \text{const}$, то выражение (7.1.2-15a) упрощается до

$$u^2(L_{Tn}) = n^2 u^2(m_{\text{ref}}) + 2[(n - 1)u^2(I)] \quad (7.1.2-16a)$$

и выражение (7.1.2-15b) упрощается до

$$u^2(L_{Tn,k}) = [(n - 1)u(m_{\text{ref}}) + u(m_{\text{ref},k})]^2 + 2[(n - 1)u^2(I)] \quad (7.1.2-16b)$$

7.1.3 Стандартная неопределенность погрешности

Стандартную неопределенность погрешности, с учетом 7.1.1 и 7.1.2, соответственно, вычисляют по формуле

$$u^2(E) = u^2(\delta I_{\text{ig}0}) + u^2(\delta I_{\text{ig}l}) + u^2(\delta I_{\text{ep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) + u^2(\delta m_e) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{\text{env}}) \quad (7.1.3-1a)$$

или, если применяются относительные неопределенности, то по следующей формуле

$$u^2(E) = u^2(\delta I_{\text{ig}0}) + u^2(\delta I_{\text{ig}l}) + u^2(\delta I_{\text{ep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) + \{u^2(\delta m_e) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D)\} m_{\text{ref}}^2 + u^2(\delta m_{\text{env}}) \quad (7.1.3-1b)$$

В случае использования замещающих грузов

$$u^2(E_{n,k}) = u^2(\delta I_{\text{ig}0}) + u^2(\delta I_{\text{ig}l}) + u^2(\delta I_{\text{ep}}) + u^2(\delta I_{\text{ecc}}) + u^2(L_{Tn,k}) \quad (7.1.3-1c)$$

где n относится к числу шагов замещения и k - число гирь.

Все входные величины считаются некоррелированными, поэтому ковариации не рассматриваются. Индекс “ j ” опущен.

Ввиду того, что погрешности обычно мало сопоставимы с показанием, или даже могут быть нулевыми, в (7.1.3-1b) значения m_{ref} и I можно заменить на I_N .

Члены в (7.1.3-1b) можно затем объединить в простую формулу, отображающую абсолютный характер у одних членов и пропорциональность показанию у других

$$u^2(E) = \alpha^2 + \beta^2 I^2 \quad (7.1.3-2)$$

7.2 Стандартная неопределенность для характеристики

Когда аппроксимацию выполняют для получения формулы $E = f(I)$ для всего диапазона взвешивания согласно 6.2.2, стандартную неопределенность погрешности согласно 7.1.3 следует изменить таким образом, чтобы она была согласована с методом аппроксимации. В зависимости от моделирующей функции это может быть

- простая дисперсия, которую добавляют в (7.1.3-1), или
- набор дисперсий и ковариаций, включающий дисперсии в (7.1.3-1).

Расчеты должны также включать проверку математической согласованности моделирующей функции с наборами данных E_j , I_j , $u(E_j)$.

Для аппроксимаций предлагается подход с использованием минимального χ^2 , подобный подходу "метода наименьших квадратов". Более детальное изложение приведено в приложении С.

7.3 Расширенная неопределенность при калибровке

Расширенная неопределенность погрешности равна

$$U(E) = k u(E) \quad (7.3-1)$$

Коэффициент охвата k следует выбирать таким, чтобы расширенная неопределенность соответствовала вероятности охвата 95,45 %.

Дополнительные сведения об определении коэффициента охвата даны в приложении В.

7.4 Стандартная неопределенность результата взвешивания

В главах 7.4 и 7.5 приведены рекомендации по оценке неопределенности измерений при обычном использовании весов с учетом неопределенности измерений, полученной при калибровке. Если калибровочная лаборатория предлагает своим заказчикам такие оценки на основании информации, которая не была получена этой лабораторией путем измерений, то такие оценки не следует представлять в виде части калибровочного сертификата. Однако допустимо предоставлять такие оценки при условии их четкого отделения от результатов калибровки.

Пользователь весов должен быть осведомлен о различии ситуаций, имеющих место при обычном использовании и при калибровке, из-за некоторых, если не всех, из следующих особенностей:

1. получаемые для взвешиваемых тел показания не являются такими же, как при калибровке;
2. процесс взвешивания может отличаться от процедуры при калибровке;
 - a. обычно для каждой нагрузки берётся одно показание, а не несколько показаний, как для получения среднего значения;
 - b. показание берётся с ценой деления шкалы весов d , а не с наибольшим разрешением;
 - c. массы нагрузок растут и убывают, а не только растут – или наоборот;
 - d. нагрузка может находиться на грузоприемном устройстве длительное время без разгрузки после каждого нагружения – или наоборот;
 - e. нецентральное наложение нагрузки;
 - f. использование устройства тарирования и т.д.;

3. окружающие условия (температура, атмосферное давление и т.д.) могут быть различными;
4. для весов, не юстируемых регулярно, например, с использованием встроенного устройства, юстировка может изменяться вследствие дрейфа или изнашивания. В отличие от перечислений с 1 по 3, такое влияние следует рассматривать в отношении определенного интервала времени, например, в течение одного года или обычного интервала между калибровками;
5. повторяемость юстировки.

В целях чёткого разграничения полученных при калибровке показаний I_c результатами взвешивания нагрузки L на откалиброванных весах, вводятся следующие термины и обозначения:

- R_L – показание при взвешивании нагрузки L на откалиброванных весах, полученное после калибровки.
- R_0 – показание без нагрузки на откалиброванных весах, полученное после калибровки.

Показания берутся как одиночные отсчёты с нормальным разрешением (кратно d), с вносимыми при необходимости поправками.

Для показания, снятого при таких же условиях, как те, что преобладали при калибровке, результат можно назвать результатом взвешивания в условиях калибровки W^*

$$W^* = R_L + \delta R_{\text{dig}L} + \delta R_{\text{rep}} + \delta R_{\text{ecc}} - (R_0 + \delta R_{\text{dig}0}) - E \quad (7.4-1a)$$

с соответствующей неопределённостью

$$u(W^*) = \sqrt{\{u^2(E) + u^2(\delta R_{\text{dig}0}) + u^2(\delta R_{\text{dig}L}) + u^2(\delta R_{\text{rep}}) + u^2(\delta R_{\text{ecc}})\}} \quad (7.4-2a)$$

Чтобы учесть остальные возможные влияющие на результат взвешивания факторы, в показание формально добавлены дополнительные поправки общего характера, дающие общий результат взвешивания

$$W = W^* + \delta R_{\text{instr}} + \delta R_{\text{proc}} \quad (7.4-1b)$$

где δR_{instr} представляет поправочный член, учитывающий влияния окружающей среды, и δR_{proc} представляет поправочный член, учитывающий эксплуатацию весов.

Соответствующая неопределённость равна

$$u(W) = \sqrt{u^2(W^*) + u^2(\delta R_{\text{instr}}) + u^2(\delta R_{\text{proc}})} \quad (7.4-2b)$$

Добавленные члены и соответствующие стандартные неопределённости рассмотрены в 7.4.3 и 7.4.4. Стандартные неопределённости $u(W^*)$ и $u(W)$ в окончательном виде представлены в 7.4.5.

Пункты 7.4.3 и 7.4.4, 7.4.5 и 7.5 содержат рекомендации пользователю весов по оценке неопределённости результатов взвешивания, получаемых в обычных условиях применения. Они не являются исчерпывающими или обязательными.

7.4.1 Стандартная неопределенность показания при эксплуатации

Для учета факторов, влияющих на показание весов, применима формула (7.1.1-1) с заменой I на R

$$R = \underline{R} + \delta R_{\text{dig}L} + \delta R_{\text{rep}} + \delta R_{\text{ecc}} - (R_0 + \delta R_{\text{dig}0}) \dots \quad (7.4.1-1)$$

Поправки и их стандартные неопределенности следующие

7.4.1.1 $\delta R_{\text{dig}0}$ учитывает погрешность округления при нулевом показании. Пункт 7.1.1.1 применим при условии, что вариант $d_T < d$ исключен, поэтому

$$u(\delta R_{\text{dig}0}) = d_0 / \sqrt{12} \quad (7.4.1-2)$$

7.4.1.2 $\delta R_{\text{dig}L}$ учитывает погрешность округления при отсчете показаний нагруженных весов. Пункт 7.1.1.2 применим при условии, что случай $d_T < d_L$ исключен, поэтому

$$u(\delta R_{\text{dig}L}) = d_L / \sqrt{12} \quad (7.4.1-3)$$

7.4.1.3 δR_{rep} учитывает повторяемость весов. Пункт 7.1.1.3 применим, соответствующее среднее квадратическое отклонение s для одного показания следует брать из калибровочного сертификата, так

$$u(\delta R_{\text{rep}}) = s \text{ или } u(\delta R_{\text{rep}}) = s(R) \quad (7.4.1-4)$$

Примечание: Для расчета неопределенности следует использовать среднее квадратическое отклонение для одиночного показания, а не среднее квадратическое отклонение для среднего значения.

7.4.1.4 δR_{ecc} учитывает погрешность вследствие смещения центра тяжести испытательной нагрузки относительно центрального положения на грузоприёмном устройстве.

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2 I_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \quad (7.4.1-5)$$

7.4.1.5 Стандартную неопределенность показания получают с помощью формулы

$$u^2(R) = d_0^2 / 12 + d_L^2 / 12 + s^2(R) + (|\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (2 I_{\text{ecc}} \sqrt{3}))^2 R^2 \dots \quad (7.4.1-6)$$

7.4.2 Неопределенность погрешности показания

Если показание R соответствует показанию $I_{\text{cal}j}$, приведенному в калибровочном сертификате, то из сертификата о калибровке можно взять значение $u(E_{\text{cal}j})$. В остальных случаях $u(E)$ может быть вычислена по (7.1.3-2), если известны α и β , или быть результатом интерполяции, или вычислена согласно 7.2 по формуле аппроксимации.

Неопределенность $u(E)$ обычно не меньше $u(E_{\text{cal}j})$ для показания I_j , которое близко к фактическому показанию R , за исключением значений, определяемых с помощью аппроксимации.

Примечание: В калибровочном сертификате обычно представлена расширенная неопределённость $U_{95}(E_{\text{cal}})$, из которой вычисляют $u(E_{\text{cal}})$ делением $U_{95}(E_{\text{cal}})$ на коэффициент охвата k , указанный в сертификате.

7.4.3 Неопределенность, обусловленная влиянием окружающей среды

δR_{inst} учитывает три фактора влияния: δR_{temp} , δR_{buoy} и δR_{adj} , рассматриваемые далее. За исключением составляющей, обусловленной δR_{buoy} , другие два фактора неприменимы к весам, юстировку которых выполняют непосредственно перед их фактическим использованием. Для остальных весов имеют значение все три фактора. Поправки фактически не применяются, соответствующие неопределенности оценивают исходя из известных пользователю свойств весов.

7.4.3.1 δR_{temp} учитывает изменение характеристик весов вследствие изменения температуры окружающей среды. Предельное значение можно оценить как $\delta R_{\text{temp}} = K_T \Delta T$, где ΔT – максимальное изменение температуры в месте расположения весов, K_T – температурный коэффициент, характеризует чувствительность весов к изменению температуры. Если механизм юстировки встроенной гирей запускается при изменении температуры, то ΔT может быть уменьшена до порога срабатывания устройства юстировки.

Такая характеристика, как температурный коэффициент, обычно указывается изготовителем: $K_T = [\partial I(\text{Max}) / \partial T] / M$. Во многих случаях измеряется в $10^{-6}/\text{K}$. По умолчанию, для весов утвержденного типа по ГОСТ OIML R76-1-2011 [2] (или EN 45501 [3]), можно принять $|K_T| \leq \text{mp}(\text{Max}) / (\text{Max} \Delta T_{\text{approval}})$ где $\Delta T_{\text{approval}}$ – температурный диапазон, указанный на весах (на маркировочной табличке); для остальных весов следует принимать или значение с запасом, приводящее к многократному увеличению температурного коэффициента (от 3 до 10 раз) по сравнению со значением для весов утвержденного типа, или же не приводить никакой информации об использовании весов при значениях температуры, отличных от тех, при которых выполнена калибровка.

Диапазон изменения температуры ΔT (полный размах) следует оценивать с учетом места эксплуатации весов, как сказано в приложении A2.2.

Принимается прямоугольное распределение, поэтому относительная неопределенность равна

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = K_T \Delta T / \sqrt{12} \quad (7.4.3-1)$$

7.4.3.2 δR_{buoy} учитывает изменение юстировки весов вследствие изменения плотности воздуха; без внесения поправки.

Если весы юстируют непосредственно перед использованием и возможно некоторое предположение об изменении плотности воздуха относительно значения плотности воздуха во время калибровки ρ_a , то вклад в неопределенность может быть [10]

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = \frac{\Delta \rho_a}{\rho_c^2} u(\rho_s) \quad (7.4.3-2)$$

где $u(\rho_s)$ – неопределенность плотности гири, используемой для юстировки (встроенной или внешней).

Если весы не юстируют перед использованием и возможно некоторое предположение относительно изменения плотности воздуха $\Delta \rho_a$, то вклад в неопределенность может быть

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = \frac{\Delta \rho_a}{\rho_c \sqrt{3}} \quad (7.4.3-3)$$

Если возможны некоторые допущения для изменения температуры в месте расположения весов, то уравнение (7.4.3-3) можно аппроксимировать следующим:

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = \frac{\sqrt{1,07 \times 10^{-4} + 1,33 \times 10^{-6} K^{-2} \Delta T^2} \cdot \rho_0}{\rho_c} \quad (7.4.3-4)$$

где ΔT – наибольшее изменение температуры в месте расположения весов (более подробно см. в приложениях A2.2 и A3);

[K^{-2} – единица измерения температуры по шкале Кельвина. В таком виде формула приведена в английском оригинале документа – прим. перев.]

Если допущение об изменении плотности невозможно, наиболее консервативным подходом будет

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = \frac{0,1 \rho_0}{\rho_c \sqrt{3}} \quad (7.4.3-5)$$

7.4.3.3 δR_{adj} учитывает изменение характеристик весов с момента калибровки, вызванное дрейфом или износом.

Предельное значение может быть взято из результатов предыдущих калибровок, если они имеются, в виде наибольшей разности $|\Delta E(Ma)|$ между погрешностями при Ma или вблизи него для двух любых последовательных калибровок. По умолчанию, $\Delta E(Ma)$ следует взять из технических характеристик, указанных изготовителем весов, или можно оценить как $\Delta E(Ma) = mpe(Ma)$ для весов утвержденного типа по ГОСТ OIML R7 6 -1 -2 0 1 1 [2] (или EN 45501 [3]). Любое такое значение можно рассматривать с учетом ожидаемых межкалибровочных интервалов и принимая во внимание достаточно линейный характер изменения во времени.

Принимается прямоугольное распределение, поэтому относительная неопределенность равна

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{adj}}) = |\Delta E(Ma)| / (Ma \sqrt{3}) \quad (7.4.3-6)$$

7.4.3.4 Относительную стандартную неопределенность, связанную с погрешностями, обусловленными влияниями окружающей среды, вычисляют из выражения

$$u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{instr}}) = u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{temp}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{buoy}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{adj}}) \quad (7.4.3-7)$$

7.4.4 Неопределенность, обусловленная эксплуатацией весов

δR_{proc} учитывает добавочные погрешности (δR_{Tare} , δR_{time} и δR_{ecc}), которые могут возникать, когда процедура(ы) взвешивания отличны от таковых при калибровке. Поправки фактически не применяются, соответствующие неопределенности оценивают исходя из известных пользователю свойств весов.

7.4.4.1 δR_{Tare} учитывает результат взвешивания нагрузки нетто при работе устройства тарирования [2] (или [3]). Возможную погрешность и приписываемую ей неопределенность следует оценивать, учитывая основное соотношение между соответствующими показаниями

$$R_{\text{Net}} = R_{\text{Gross}} - R_{\text{Tare}} \quad (7.4.4-1)$$

где R' – недействительные показания; это разрешение, с которым выполняются процессы внутри весов, тогда как отображаемое на показывающем устройстве показание R_{Net} получают непосредственно после установки показания весов на нуль вместе с тарной нагрузкой на грузоприемном устройстве. Результат взвешивания в таком случае теоретически равен

$$W_{\text{Net}} = R_{\text{Net}} - [E(\text{Gross}) - E(\text{Tare})] + \delta R_{\text{instr}} + \delta R_{\text{proc}} \quad (7.4.4-2)$$

согласно (7.4-1).

Погрешности в членах «брутто» (gross) и «тара» (tare) следует брать как погрешности для эквивалентных значений R , как описано выше. Однако значения массы тары – и, следовательно, значения брутто – обычно не записывают.

Погрешность тогда можно оценить как

$$E_{\text{Net}} = E(\text{Net}) + \delta R_{\text{Tare}} \quad (7.4.4-3)$$

где $E(\text{Net})$ – погрешность для показаний R_{Net} , а δR_{Tare} – добавочная поправка, учитывающая влияние нелинейности кривой погрешности $E_{\text{ca}}(I)$.

Для количественной оценки нелинейности можно применить регрессионную модель к первой производной функции $E = f(R)$, если она известна, или можно вычислить угловой коэффициент q_E по двум последовательным точкам калибровки согласно

$$q_E = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{E_{j+1} - E_j}{I_{j+1} - I_j} \quad (7.4.4-4)$$

Наибольшее и наименьшее значения производных или коэффициентов принимают в качестве предельных значений для поправки δR_{Tare} , для которой может быть принято прямоугольное распределение. Эти результаты в относительной стандартной неопределенности

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{Tare}}) = (q_{E\text{max}} - q_{E\text{min}}) / \sqrt{12} \quad (7.4.4-5)$$

Чтобы оценить неопределенность $u(W)$, считают $R = R_{\text{Net}}$. Для $u(E)$ справедливо принимать $u(E(\text{Net})) = u(E(R = \text{Net}))$, потому что имеется полная корреляция между величинами, вносящими вклад в неопределенности погрешностей недействительных показаний массы брутто и тары.

7.4.4.2 δR_{time} учитывает возможные влияния эффектов ползучести и гистерезиса в таких ситуациях как

- а) при калибровке нагружение производилось непрерывно с возрастанием, или непрерывно с возрастанием и убыванием (метод 2 или 3 в 5.2) массы так, что нагрузка остается на грузоприемном устройстве в течение определенного периода времени; это весьма существенно для весов с большой максимальной нагрузкой, когда применяется метод замещения. При обычном использовании весов взвешиваемая отдельная нагрузка находится на грузоприемном устройстве в течение времени, необходимого для снятия показания весов или вывода результата на печатающее устройство; погрешность показания может отличаться от значения погрешности, полученного для этой же нагрузки при калибровке.

Если испытания были выполнены с непрерывно нарастающей и непрерывно убывающей нагрузками, то наибольшую разность погрешностей ΔE_j для любой испытательной нагрузки m_j можно принимать в качестве предельного значения при влиянии эффектов ползучести и гистрезиса, приводящего к относительной стандартной неопределенности

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = \Delta E_{j\text{max}} / (m_j \sqrt{12}) \quad (7.4.4-6)$$

Если испытания были выполнены только при возрастающей массе нагрузки, и определена погрешность невозврата показания к нулю E_0 после разгрузки, то E_0 можно использовать для оценки относительной стандартной неопределенности

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = E_0 / (M_{\text{max}} \sqrt{3}) \quad (7.4.4-7)$$

Если подобная информация отсутствует, то предельное значение разности погрешностей для весов утвержденного типа по ГОСТ OIML R7 6 -1 -2 0 1 1 [2] (или EN 45501 [3]) можно оценивать как

$$\Delta E(R) = R \cdot mpe(M_{\text{max}}) \quad (7.4.4-8)$$

Для весов, тип которых не утверждён, применяется консервативная оценка, приводящая к многократному ($m = 3 \div 10$ раз) увеличению значения.

Относительная стандартная неопределённость для весов утверждённого типа равна

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = mpe(M_{\text{max}}) / (M_{\text{max}} \sqrt{3}) \quad (7.4.4-9a)$$

и для весов, тип которых не утверждён

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{time}}) = m \cdot mpe(M_{\text{max}}) / (M_{\text{max}} \sqrt{3}) \quad (7.4.4-9b)$$

- б) при калибровке нагружение производилось с разгрузкой между шагами нагружения, взвешиваемые при обычном использовании нагрузки находятся на грузоприемном устройстве в течение более длительного периода. При отсутствии какой-либо другой информации – например, наблюдения за изменением показания в течение типичного периода времени – в качестве применимой для (7.4.4-9) может быть принята регрессионная модель.
- с) при калибровке нагружение выполнялось только с возрастанием массы, в процессе эксплуатации производится разгрузочное взвешивание. Данную ситуацию можно считать обратной операции тарирования – см. 7.4.4.1

совместно с перечислением в данного пункта. Применяются (7.4.4-5) и (7.4.4-9).

Примечание. В случае разгрузочного взвешивания показание R следует брать в виде положительного значения, хотя весы могут показывать его отрицательным.

7.4.4.3 δR_{ecc} учитывает погрешность вследствие смещения центра тяжести испытательной нагрузки относительно центрагрузоприёмной платформы. Формула (7.4.1-5) применяется с изменением, полностью учитывающим влияние, обнаруженное во время калибровки, поэтому

$$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = |\Delta I_{\text{ecc}i}|_{\text{max}} / (L_{\text{ecc}} \sqrt{3}) \quad (7.4.4-10)$$

7.4.5 Стандартная неопределенность результата взвешивания

Стандартную неопределенность результата взвешивания вычисляют по формулам, указанным в пп. с 7.4.1 по 7.4.4, по применимости.

Для результата взвешивания в условиях калибровки

$$u^2(W^*) = d_0^2/12 + d_L^2/12 + s^2(R) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{ecc}})R^2 + u^2(E) \quad (7.4.5-1a)$$

Для результата взвешивания в общем

$$u^2(W) = u^2(W^*) + \quad (7.4.5-1b)$$

$$+ [u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{temp}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{buoy}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{adj}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{fare}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta R_{\text{time}})]R^2$$

Многие составляющие в $u(W)$ можно сгруппировать в два члена α_w^2 и β_w^2

$$u^2(W) = \alpha_w^2 + \beta_w^2 R^2 \quad (7.4.5-2)$$

где α_w^2 - сумма квадратов всех абсолютных стандартных неопределенностей, и β_w^2 - сумма квадратов всех относительных стандартных неопределенностей.

7.5 Расширенная неопределенность результата взвешивания

7.5.1 Погрешности, учитываемые поправками

Окончательная формула для результата взвешивания, равнопоказанию, скорректированному на погрешность, определённую при калибровке, следующая

$$W^* = R - E(R) \pm U(W) \quad (7.5.1-1a)$$

или

$$W = R - E(R) \pm U(W) \quad (7.5.1-1b)$$

по применимости.

Расширенную неопределенность $U(W)$ определяют как

$$U(W^*) = k u(W^*) \quad (7.5.1-2a)$$

или

$$U(W) = k u(W) \quad (7.5.1-2b)$$

где $u(W^*)$ или $u(W)$ по применимости из 7.4.5.

Для $U(W^*)$ коэффициент охвата k следует определять согласно 7.3.

Для $U(W)$ коэффициент охвата k будет, во многих случаях, равен 2, даже когда среднее квадратическое отклонение S получено только по нескольким измерениям, и/или когда $k_{ca} > 2$ указано в сертификате калибровки. Это обусловлено большим количеством членов, вносящих вклад в $u(W)$.

7.5.2 Погрешности, включаемые в неопределенность

Калибровочная лаборатория и заказчик могут согласовать получение «общей неопределенности» $U_g(W)$, которая включает в себя погрешности показания, так что в используемые показания не требуется вносить поправки

$$W = R \pm U_g(W) \quad (7.5.2-1)$$

Если погрешности не распределены симметрично вокруг нуля, то они создают односторонний вклад в неопределенность, который можно учесть только приблизительно. Для простоты и удобства «общую неопределенность» лучше задавать в виде некоторого выражения для всего диапазона взвешивания, вместо отдельных значений, заданных для определенных значений результата взвешивания.

Пусть $E(R)$ будет некоторая функция, или E^0 будет одно значение, репрезентативное для всех погрешностей, указанных в диапазоне измерений в сертификате калибровки. Сочетание с используемыми неопределенностями может, в принципе, принять вид, описываемый одним из этих выражений

$$U_{gl}(W) = k\sqrt{u^2(W) + (E(R))^2} \quad (7.5.2-2a)$$

$$U_{gl}(W) = k\sqrt{u^2(W) + (E^0)^2} \quad (7.5.2-2b)$$

$$U_{gl}(W) = k\sqrt{u^2(W) + (E^0)^2 (R/M_{ax})^2} \quad (7.5.2-2c)$$

$$U_{gl}(W) = ku(W) + |E(R)| \quad (7.5.2-3a)$$

$$U_{gl}(W) = ku(W) + |E^0| \quad (7.5.2-3b)$$

$$U_{gl}(W) = ku(W) + |E^0| R/M_{ax} \quad (7.5.2-3c)$$

Достаточно часто (7.5.2-3a) принимают в качестве основы для выражения общей неопределенности. Таким образом, $U(W) = ku(W)$ часто аппроксимируют следующей формулой

$$U(W) \approx U(W=0) + \left\{ \left[\frac{U(W=M_{ax}) - U(W=0)}{M_{ax}} \right] R \right\} \quad (7.5.2-3d)$$

и $E(R)$ часто аппроксимируют выражением $E(R) = \frac{R}{M_{ax}}$ согласно (C2.2-16) и (C2.2-16a), так что

$$U_{g1}(W) \approx U(W = 0) + \left\{ \frac{U(W = Ma_{\chi}) - U(W = 0)}{Ma_{\chi} - 0} \right\} \cdot Ma_{\chi} + a_1 |R| \quad (7.5.2-3e)$$

Дополнительные сведения о получении формулы $E(R)$ репрезентативного значения E^0 см. в приложении С.

По аналогии с (7.5.2-3d), для многоинтервальных весов $U(W)$ указывается по интервалам, как

$$U(W) \approx U(Ma_{\chi-1}) + \left\{ \frac{U(Ma_{\chi}) - U(Ma_{\chi-1})}{Ma_{\chi} - Ma_{\chi-1}} \right\} \cdot (R - Ma_{\chi-1}) \quad (7.5.2-3f)$$

а для многодиапазонных весов $U(W)$ указывается по диапазонам.

Важно обеспечить, чтобы $U_g(W)$ сохраняла вероятность охвата не меньше 95 % во всем диапазоне взвешивания. Для $U_g(W)$ коэффициент охвата k будет, во многих случаях, равен 2, даже когда среднее квадратическое отклонение S получено только по нескольким измерениям, и/или когда $k_{ca} > 2$ указано в сертификате калибровки. Это обусловлено большим количеством членов, вносящих вклад в $U(W)$.

7.5.3 Другие способы квалификации весов

Заказчик может ожидать от калибровочной лаборатории или запросить у нее формулировку соответствия определенным техническим требованиям $|W - R| \leq Tol$, где Tol является приемлемым допуском. Допуск может быть задан в виде " $Tol = \% \text{от } R$ ", или " $Tol = n\phi$ " или подобном.

Соответствие может быть заявлено согласно ISO/IEC 17025, при условии, что

$$|E(R) + U(W(R))| \leq Tol(R) \quad (7.5.3-1)$$

для отдельных значений R или для каких-либо значений в пределах целого диапазона взвешивания или его части.

В пределах одного и того же диапазона взвешивания можно заявлять о соответствии для различных частей диапазона взвешивания различным значениям Tol .

Если пользователь определяет требование относительной точности измерений, в приложении G «Минимальная масса» приведены дополнительные рекомендации.

8 СЕРТИФИКАТ КАЛИБРОВКИ

В данном разделе приведены рекомендации относительно информации, которую полезно представлять в сертификате калибровки. Они предназначены для обеспечения соответствия ISO/IEC 17025, который имеет приоритет.

8.1 Общие сведения

Идентификация калибровочной лаборатории;
справка об аккредитации (аккредитующий орган, номер аккредитации);
идентификация сертификата (номер калибровки, дата выпуска, количество страниц);
подпись(и) уполномоченных лиц(а).

Идентификация заказчика.

Идентификация калибруемых весов;
сведения о весах (изготовитель, тип весов, максимальная нагрузка $M_{\max}$, цена деления шкалы d , место установки).

Предупреждение о возможности воспроизведения сертификата только полностью, если нет письменного разрешения калибровочной лаборатории на иное.

8.2 Сведения о процедуре калибровки

Дата проведения измерений;
место калибровки;
условия окружающей среды и/или способ использования, которые могут влиять на результаты калибровки.

Сведения о весах (выполняемая юстировка: внутренняя или внешняя, в случае внешней указать используемую гирю, любые отклонения в функционировании, настройка ПО в той степени, в которой она влияет на калибровку, и т.д.).

Ссылка на применяемую процедуру или ее описание, если это не очевидно из сертификата, например, постоянный интервал времени, выдерживаемый между нагружениями и/или показаниями.

Согласования с заказчиком, например, превышенный диапазон калибровки, метрологические характеристики, соответствие которым заявлено.

Сведения о прослеживаемости результатов измерений.

8.3 Результаты измерений

Показания и/или погрешности для приложенных испытательных нагрузок, или относящиеся к показаниям погрешности – в виде дискретных значений и/или уравнений, полученных аппроксимацией;
подробности процедуры нагружения, если целесообразно для понимания вышеуказанного;
СКО, определенные применительно к единичному показанию;
сведения о выполненных испытаниях на нецентральное нагружение;
расширенная неопределенность результатов измерений для погрешности показаний результатов.

Указание коэффициента охвата k , с указанием вероятности охвата, и обоснованием $k \neq 2$, если применимо.

Если показания/погрешности определяются не с нормальным разрешением весов, а с увеличенным, то следует привести предупреждение о том, что сообщаемая неопределенность меньше, чем определяемая по показаниям с нормальным разрешением.

8.4 Дополнительные сведения

Дополнительные сведения об ожидаемой в применении неопределенности измерений, включая условия, при которых она применима, можно добавлять к сертификату, не делая их его частью.

Если погрешности учитываются поправкой, следует использовать формулу

$$W = R - E(R) \pm U(W) \quad (8.4-1)$$

вместе с уравнением для $E(R)$.

Если погрешности включены в «общую неопределенность», следует использовать формулу

$$W = R \pm U(W) \quad (8.4-2)$$

При этом необходимо добавить формулировку о том, что расширенная неопределенность значений из этой формулы соответствует вероятности охвата не меньше 95 %.

Дополнительно:

Формулировка о соответствии заданным техническим требованиям диапазоне применимости, где уместно.

Данная формулировка может иметь вид

$$W = R \pm Tol \quad (8.4-3)$$

и быть дана

в дополнение к результатам измерений или
в качестве отдельной формулировки со ссылкой на результаты измерений, заявленные в качестве сохраняемых в калибровочной лаборатории.

Данную формулировку можно сопроводить указанием на то, что все результаты измерений, дополненные расширенной неопределенностью измерений, находятся в заданных техническими требованиями пределах.

Можно приводить сведения о минимальных значениях массы для различных предельных значений погрешностей взвешивания согласно приложению G.

Для менее сведущих заказчиков, если уместно, можно предоставить рекомендации по

определению погрешности показания;
корректировке показаний весов, путем вычитания соответствующих погрешностей;
интерпретации показаний и/или погрешностей, представленных меньшим числом разрядов, чем с ценой деления шкалы d .

Может быть полезным представить значения $U(W^*)$ для всех отдельных погрешностей (дискретных значений) или для функции $E(R)$, полученной аппроксимацией.

9 ЗНАЧЕНИЕ МАССЫ ИЛИ УСЛОВНОЕ ЗНАЧЕНИЕ МАССЫ

Величина W – оценка условного значения массы m_x взвешиваемого объекта⁶. Для определенных применений может быть необходимо получать из W значение массы m или более точное значение для m_x .

Плотность ρ или объем V объекта, вместе с оценкой их стандартной неопределенности, должны быть известны из других источников.

9.1 Значение массы

Масса объекта равна

$$m = W[1 + \rho(1/\rho - 1/\rho)] \quad (9.1-1)$$

⁶ В большинстве случаев, особенно когда результаты используются для торговли, значение W используется как результат взвешивания.

Пренебрегая членами второго и высших порядков, относительную стандартную неопределенность $u_{\text{rel}}(m)$ получают в виде

$$u_{\text{rel}}^2(m) = \frac{u^2(W)}{W^2} + u^2(\rho_a) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + \rho_a^2 \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} \quad (9.1-2)$$

Для ρ_a и $u(\rho_a)$ (плотность воздуха) см. приложение А.

Если V и $u(V)$ известны вместо ρ и $u(\rho)$, ρ можно аппроксимировать W/V , и $u_{\text{rel}}(\rho)$ можно заменить на $u_{\text{rel}}(V)$.

9.2 Условное значение массы

Условное значение массы объекта равно

$$m_c = W[1 + (\rho - \rho_a)(1/\rho - 1/\rho_a)] \quad (9.2-1)$$

Пренебрегая членами второго и высших порядков, относительную стандартную неопределенность $u_{\text{rel}}(m_c)$ получают в виде

$$u_{\text{rel}}^2(m_c) = \frac{u^2(W)}{W^2} + u^2(\rho_a) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + (\rho_a - \rho) \frac{u^2(\rho)}{\rho^4} \quad (9.1-2)$$

Применимы комментарии, данные к (9.1-2).

10 ССЫЛОЧНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

- [1] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (МБМВ, МЭК, Международная федерация клинической химии и лабораторной медицины, ИСО, ИЮПАК, ИЮПАП, МОЗМ и Международное сотрудничество по аккредитации лабораторий (2008): Оценка данных измерений – Руководство по выражению неопределенности измерений (GUM), GUM 1995 с небольшими поправками, JCGM 2008).
- [2] ГОСТ ОИМ LR 76-1-2011: ГСИ. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания.
- [3] EN 45501: Metrological Aspects of Non-automatic Weighing Instruments, Edition 2015 (Приборы для взвешивания неавтоматические. Метрологические аспекты, издание 2015).
- [4] ГОСТ ОИМ LR 111-1-2009. ГСИ. Гирь классы E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃, M₃. Часть 1. Метрологические и технические требования.
- [5] JCGM 200:2012 (VIM), International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), JCGM 200:2012 (МБМВ, МЭК, Международная федерация клинической химии и лабораторной медицины, ИСО, ИЮПАК, ИЮПАП, МОЗМ и Международное сотрудничество по аккредитации лабораторий (2012): Международный словарь по Метрологии – Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM), 3-е издание с небольшими изменениями, 2012)
- [6] Comprehensive Mass Metrology, M. Kochsiek, M. Glaser, WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, Berlin. (Полная метрология массы, М.Кошичек, М. Глязер, WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, Берлин) ISBN 3-527-29614-X
- [7] M. Gläser: Change of the apparent mass of weights arising from temperature differences, Metrologia 36 (1999), p. 183-197 (Изменение наблюдаемой массы гирь вследствие разностей температур, Метрология 36 (1999), с. 183-197)
- [8] ILAC P10:01/2013, ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results, 2013 (Международное сотрудничество по аккредитации лабораторий, Политика ILAC по прослеживаемости результатов измерений, 2013)
- [9] JCGM 101:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (101:2008, Оценка данных измерений –

Дополнение 1 к «Руководству по выражению неопределенности измерений» – Распространение распределений с использованием метода Монте-Карло, 1-е издание, 2008)

- [10] A. Malengo, Buoyancy effects and correlation in calibration and use of electronic balances, Metrologia 51 (2014) p. 441–451 (А. Маленго, Влияния выталкивающей силы и корреляции в калибровке и применении электронных весов, Метрология 51 (2014) с. 441–451)
- [11] A. Picard, R. S. Davis, M. Gläser, K. Fujii: Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007), Metrologia 45 (2008) с. 149-155 (А. Пикар, Р.С. Дэвис, М. Глязер и К. Фуджи: Пересмотренная формула для плотности влажного воздуха (Международный комитет мер и весов - 2007) Metrologia 45 (2008), с. 149–155)
- [12] R. T. Birge, The Calculation of Errors by the Method of Least Squares, Phys. Rev. 40, 207 (1932) (Т. Бирдж, Вычисление погрешностей методом наименьших квадратов, Физ. рев. 40, 207 (1932))
- [13] Dictionary of Weighing Terms – A Guide to the Terminology of Weighing, R. Nater, A. Reichmuth, R. Schwartz, M. Borys and P. Zervos, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. (Словарь терминов взвешивания – Руководство по терминологии взвешивания, Р.Нэтер, А.Райхмут, Р.Шварц, М.Борис и П.Цервос, Шпрингер, Берлин, Гейдельберг, 2009) ISBN 978-3-642-02013-1

ПРИЛОЖЕНИЕ А: РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА

Примечание - В приложении А используются обозначения:

T -температура по шкале Кельвина (K);

t - температура по шкале Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

А1 Формула для плотности воздуха

Самой точной формулой для определения плотности влажного воздуха является формула, рекомендованная CIPM [11]⁷. Для целей настоящего руководства достаточна менее сложная формула, дающая несколько менее точные результаты.

А1.1 Упрощенная версия формулы CIPM, экспоненциальная версия

Из ГОСТ OIML R1 1 1 -1 -2 0 0 9 [4], раздел E3

$$\rho_a = \frac{0,34848p - 0,009RH \exp(0,061t)}{273,15 + t} \quad (\text{A1.1-1})$$

где

ρ_a - плотность воздуха, кг/м^3 ;
 p - атмосферное давление, гПа ;
 RH - относительная влажность воздуха, %;
 t - температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Относительная неопределенность данной формулы: $u_{\text{form}} / \rho_a = 2,0 \times 10^{-4}$ при следующих окружающих условиях

$900 \text{ гПа} \leq p \leq 1000 \text{ гПа}$;
 $20 \% \leq RH \leq 80 \%$;
 $15 ^{\circ}\text{C} \leq t \leq 25 ^{\circ}\text{C}$.

Неопределенность для ρ_a (см. раздел А3) помимо неопределенности u_{form} включает в себя неопределенности оценок p , RH и t .

А1.2 Среднестатистическая плотность воздуха

Если измерение температуры и атмосферного давления невозможно, среднюю плотность воздуха на месте можно рассчитать исходя из высоты над уровнем моря, как рекомендовано в [4]

$$\rho_a = \rho_0 \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} g h_{\text{SL}}\right) \quad (\text{A1.2-1})$$

где $p_0 = 1013,25 \text{ гПа}$;
 $\rho_0 = 1,200 \text{ кг/м}^3$;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
 h_{SL} = высота над уровнем моря, м

⁷ Относительная неопределенность формулы плотности воздуха CIPM-2007 (без неопределенностей параметров) равна $u_{\text{form}} / \rho_a = 2,2 \times 10^{-5}$, наилучшая достижимая относительная неопределенность, которая включает неопределенности параметров (температуры, влажности и давления), составляет $u(\rho_a) / \rho_a = 8 \times 10^{-5}$. Рекомендованные диапазоны температуры и давления, в которых возможно использование формулы CIPM-2007, следующие: $900 \text{ гПа} \leq p \leq 1000 \text{ гПа}$, $15 ^{\circ}\text{C} \leq t \leq 25 ^{\circ}\text{C}$.

Данный расчет плотности воздуха выполнен для температуры: 20 °С и относительной влажности $RH = 50\%$.

Относительная неопределенность данной приближенной формулы $u_{\text{form}} / \approx 1,2 \times 10^{-2}$.

A2 Вариации параметров, определяющих плотность воздуха

Для оценки неопределенностей, связанных с оценками p , RH и t , в следующей главе приведены некоторые сведения по их типичным вариациям. Эти сведения можно использовать, когда измерения параметров окружающей среды не производятся.

A2.1 Атмосферное давление

В любом определённом месте вариация атмосферного давления не превышает $\Delta p = \pm 40$ гПа относительно среднего⁸. В этих пределах распределение не равномерное, так как предельные значения имеют место раз в несколько лет. Было обнаружено, что это распределение в основном нормальное. Учитывая типичные изменения атмосферного давления, практически принять стандартную неопределенность

$$u(p) = 10 \text{ гПа} \quad (\text{A2.1-1})$$

Среднее атмосферное давление $p(h_{\text{SL}})$ (в гПа) можно оценивать в соответствии с ГОСТ 4401-81, и можно оценить исходя из высоты h_{SL} в метрах над уровнем моря для места расположения, используя соотношение

$$p(h_{\text{SL}}) = p_0 \exp(-h_{\text{SL}} \times 0,00012 \text{ м}^{-1}) \quad (\text{A2.1-2})$$

где $p_0 = 1\,013,25$ гПа

A2.2 Температура

Возможные изменения $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ температуры в месте использования весов можно оценить, исходя из информации, которую легко получить

пределы, заданные заказчиком на основании его опыта;
показания подходящих (соответствующих) записывающих средств;
настройки контрольного средства измерений, когда помещение акклиматизировано или температура установилась;

в случае по умолчанию, следует применять разумное суждение, приводящее к — например

$15\text{ °C} \leq t \leq 25\text{ °C}$ для закрытых офисных или лабораторных помещений с окнами,
 $\Delta T \leq 10\text{ K}$ для закрытых помещений без окон в центре здания,
 $-10\text{ °C} \leq t \leq +30\text{ °C}$ или $\Delta T \leq 40\text{ K}$ для открытых мастерских или заводских площадей.

Как и в случае с атмосферным давлением, равномерное распределение маловероятно для открытых мастерских или цеховых площадей, где преобладает атмосферная температура. Однако во избежание различных допущений для ситуаций в различных помещениях, рекомендуется допущение равномерного распределения, дающее

⁸ Пример: в Ганновере (Германия) наблюдавшаяся за 20 лет разность между наивысшим и самым низким атмосферным давлением была 77,1 гПа (сведения DWD, Немецкой метеорологической службы).

$$u(T) = \Delta T \sqrt{12} \quad (\text{A2.2-1})$$

A2.3 Относительная влажность

Возможные изменения $\Delta RH = RH_{\max} - RH_{\min}$ относительной влажности в месте использования весов можно оценить, исходя из информации, которую легко получить

пределы, заданные заказчиком на основании его опыта;
показания подходящих (соответствующих) записывающих средств
настройки контрольного средства измерений, когда помещение акклиматизировано;

в случае по умолчанию, следует применять разумное суждение, приводящее, например, к

30 % $\leq RH \leq$ 80 % для закрытых офисных или лабораторных помещений с окнами,
 $\Delta RH \leq$ 30 % для закрытых помещений без окон в центре здания,
20 % $\leq RH \leq$ 80 % для открытых мастерских или цеховых площадей.

Следует помнить, что

при $RH < 40$ % эффекты электростатики могут влиять на результат взвешивания на весах с высоким разрешением,

при $RH > 60$ % может начать появляться коррозия.

Как и в случае с атмосферным давлением, равномерное распределение маловероятно для открытых мастерских или цеховых площадей, где преобладает атмосферная относительная влажность. Однако во избежание различных допущений для ситуаций в различных помещениях, рекомендуется допущение равномерного распределения, дающее

$$u(RH) = \Delta RH \sqrt{12} \quad (\text{A2.3-1})$$

A3 Неопределенность плотности воздуха

Относительную стандартную неопределенность плотности воздуха $u(\rho_a) / \rho_a$ можно рассчитать

$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{\left(\frac{u_p(\rho_a)}{\rho_a} \cdot u(p)\right)^2 + \left(\frac{u_T(\rho_a)}{\rho_a} \cdot u(T)\right)^2 + \left(\frac{u_{RH}(\rho_a)}{\rho_a} \cdot u(RH)\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{form}}(\rho_a)}{\rho_a}\right)^2} \quad (\text{A3-1})$$

с коэффициентами чувствительности (полученными из формулы CIPM для плотности воздуха)

$u_p(\rho_a) / \rho_a = 1 \times 10^{-5} \text{ Па}^{-1}$ для атмосферного давления,

$u_T(\rho_a) / \rho_a = 4 \times 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ для температуры воздуха,

$u_{RH}(\rho_a) / \rho_a = 9 \times 10^{-3}$ для относительной влажности (безразмерная величина, не проценты).

Эти коэффициенты чувствительности также можно использовать для уравнения (A1.1-1).

Уравнение (A3-1) можно аппроксимировать в виде (A3-2), исходя из следующих допущений:

- стандартная неопределенность для вариаций давления, исходя из метеорологических данных, показывающая, что это нормальное распределение, равна 10 гПа;
- максимальная вариация влажности равна 80 %.
- максимальную вариацию температуры в этом месте включают в виде ΔT

$$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = \sqrt{1,07 \times 10^4 + 1,33 \times 10^6 K^{-2} \Delta T^2} \quad (A3-2)$$

Примеры стандартной неопределенности плотности воздуха, вычисленной для различных значений параметров с помощью формулы (A.1.1-1)

$u(p)$, гПа	ΔT , К	ΔRH , %	$\frac{u_p(\rho_a)}{\rho_a} u(p)$	$\frac{u_T(\rho_a)}{\rho_a} u(T)$	$\frac{u_{RH}(\rho_a)}{\rho_a} u(RH)$	$\frac{u_{form}(\rho_a)}{\rho_a}$	$\frac{u(\rho_a)}{\rho_a}$
10	2	20	1×10^{-2}	$-2,31 \times 10^{-3}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-2}$
10	2	100	1×10^{-2}	$-2,31 \times 10^{-3}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-2}$
10	5	20	1×10^{-2}	$-5,77 \times 10^{-3}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-2}$
10	5	100	1×10^{-2}	$-5,77 \times 10^{-3}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-2}$
10	10	20	1×10^{-2}	$-1,15 \times 10^{-3}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-2}$
10	10	100	1×10^{-2}	$-1,15 \times 10^{-3}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,55 \times 10^{-2}$
10	20	20	1×10^{-2}	$-2,31 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,52 \times 10^{-2}$
10	20	100	1×10^{-2}	$-2,31 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$2,53 \times 10^{-2}$
10	30	20	1×10^{-2}	$-3,46 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,61 \times 10^{-2}$
10	30	100	1×10^{-2}	$-3,46 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$3,61 \times 10^{-2}$
10	40	20	1×10^{-2}	$-4,62 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-2}$
10	40	100	1×10^{-2}	$-4,62 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$4,73 \times 10^{-2}$
10	50	20	1×10^{-2}	$-5,77 \times 10^{-2}$	$-5,20 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$5,86 \times 10^{-2}$
10	50	100	1×10^{-2}	$-5,77 \times 10^{-2}$	$-2,60 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$5,87 \times 10^{-2}$

ΔT -максимальная вариация температуры и ΔRH - максимальная вариация влажности в месте расположения весов.

ПРИЛОЖЕНИЕ В: КОЭФФИЦИЕНТ ОХВАТА k ДЛЯ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Примечание - В данном приложении общее обозначение "у" используется для результата измерений, а не в качестве какой-либо отдельной величины в виде показания, погрешности, массы взвешиваемого тела и т.д.

В1 Цель

Коэффициент охвата k следует во всех случаях выбирать таким, чтобы расширенная неопределенность измерения имела вероятность охвата 95,45 %.

В2 Нормальное распределение и достаточная достоверность

Значение $k = 2$, соответствующее вероятности 95,45%, применяется когда

- а) погрешности показания можно приписать нормальное (Гауссово) распределение,

и

б) стандартная неопределенность $u(E)$ является достаточно достоверной (т.е. имеет достаточное число степеней свободы), см. JCGM 100 [1].

Допущение о нормальном распределении можно принимать, когда несколько (т.е. $N \geq 3$) составляющих неопределенности, полученных по «регулярным» распределениям (нормальное, равномерное или подобное), дают в $u(E)$ сравнимые вклады.

Достаточность достоверности зависит от степеней свободы. Данный критерий выполняется, когда в $u(E)$ нет составляющих по типу А, основанных менее чем на 10 наблюдениях. Типичный вклад по типу А возникает из повторяемости. Следовательно, если в течение испытания на повторяемость некоторую нагрузку накладывают не менее 10 раз, можно принять допущение о достаточной достоверности.

В3 Нормальное распределение, достаточная достоверность отсутствует

Если погрешности показания можно приписать нормальное распределение, но $u(E)$ не является достаточно достоверной, тогда фактические степени свободы ν_{eff} следует определять по формуле Уэлча-Саттертуэйта

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(E)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(E)}{\nu_i}} \quad (\text{B3-1})$$

где $u_i(E)$ - вклады в стандартную неопределенность согласно (7.1.3-1а), и ν_i - степени свободы вклада $u_i(E)$ в стандартную неопределенность. Исходя из ν_{eff} , применимый коэффициент охвата k берут из расширенной таблицы G.2 в [1] или же можно использовать лежащее в ее основе t-распределение, описанное в [1], приложение С.3.8, чтобы определить коэффициент охвата k .

В4 Определение k для распределений, не являющихся нормальными

В любом из следующих случаев расширенная неопределенность равна $U(y) = k u(y)$.

В данной ситуации может быть очевидным, что $u(y)$ содержит одну составляющую неопределенности типа В $u_1(y)$ из вклада, распределение которого не является нормальным, например равномерным или треугольным, которая значительно больше всех остальных составляющих. В таком случае $u(y)$ разделяется на часть (возможно, преобладающую) u_1 и u_R = квадратный корень из $\sum u_j^2$ с $j \geq 2$, комбинированной стандартной неопределенности, состоящей из остальных вкладов, см. [1].

Если $u_R \leq 0,3 u_1$, то u_1 считается «преобладающей» и распределение u считается по существу одинаковым с таковым у преобладающего вклада.

Коэффициент охвата выбирают в соответствии с характером распределения преобладающей составляющей

для трапецеидального распределения с $\beta < 0,95$

(β = краевой параметр, отношение меньшего ребра трапецоида к большему)

$$k = \{1 - \sqrt{0,05(1 - \beta)}\} / \sqrt{[(1 + \beta)/6]} \quad (\text{B4-1})$$

для равномерного распределения ($\beta = 1$), $k = 1,65$;

для треугольного распределения ($\beta = 0$), $k = 1,90$;

для U-образного распределения, $k = 1,41$.

Преобладающая составляющая может сама состоять из 2 преобладающих составляющих $u_1(y)$, $u_2(y)$, например 2 равномерных, составляющих один трапециод, в таком случае u_R будет определяться из остающихся u_j с $j \geq 3$.

ПРИЛОЖЕНИЕ С: ФОРМУЛА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ПОКАЗАНИЙ

С1 Цель

В данном приложении приведены рекомендации по выводу погрешностей и соответствующих неопределенностей для любого другого показания R в пределах калиброванного диапазона взвешивания, на основании полученных при калибровке и/или приведенных в сертификате калибровки отдельных значений.

Предполагается, что калибровка дает n наборов данных I_{Nj} , E_j , U_j , или альтернативно m_{Nj} , I_j , U_j , вместе с коэффициентом охвата k и указанием распределения лежащего в основе k .

В любом случае номинальное показание I_{Nj} считается $I_{Nj} = m_j$.

Также принимается, что для каждого m_{Nj} погрешность E_j остается одинаковой, если I_j заменить на I_{Nj} , поэтому достаточно рассмотреть данные I_{Nj} , E_j , U_j , и для простоты опустить индекс N .

С2 Функциональные зависимости

С2.1 Интерполяция

Существует несколько полиномиальных формул для интерполяции⁹ между табулированными значениями и эквидистантными (равностоящими) значениями, которые относительно легко использовать. Однако испытательные нагрузки во многих случаях могут быть неэквидистантными, что приводит к достаточно сложной формуле интерполяции, если применять ее одну во всем диапазоне взвешивания.

Линейную интерполяцию между двумя смежными точками можно выполнить по

$$E(R) = E_k + (R - I_k)(E_{k+1} - E_k)/(I_{k+1} - I_k) \quad (C2.1-1)$$

$$U(E(R)) = U_k + (R - I_k)(U_{k+1} - U_k)/(I_{k+1} - I_k) \quad (C2.1-2)$$

для показания R с $I_k < R < I_{k+1}$. Для оценивания возможной погрешности интерполяции потребуется многочлен более высокого порядка, что далее не рассматривается.

С2.2 Аппроксимация

Аппроксимацию следует выполнять посредством вычислений или алгоритмов с использованием подхода «минимального χ^2 », т.е. параметры функции f определяют так, что

⁹ Формула интерполяции предполагается для получения именно данных значений, между которыми осуществляется интерполяция. Формула аппроксимации обычно не дает именно данные значения.

$$\chi^2 = \sum p_j v_j^2 = \sum p_j (f(I_j) - E_j)^2 = \text{minimum} \quad (\text{C2.2-1})$$

где

p_j -весовой коэффициент (обычно пропорционален $1/u_j^2$);

v_j -остаток;

f -функция аппроксимации, содержащая n_{par} параметров, которые требуется определить, $j = 1 \dots n$;

n -число испытательных точек.

Из наблюдаемого значения χ_{obs}^2 , если выполняется следующее условие [12]

$$\chi_{\text{obs}}^2 \leq \nu \quad (\text{C2.2-2a})$$

со степенями свободы $\nu = n - n_{\text{par}}$ закономерно допустить, что моделирующая функция вида $E(I) = (f)$ будет математически согласована с лежащими в основе аппроксимации данными.

Альтернативным вариантом для проверки правильности подгонки решения является допущение о том, что максимальное значение взвешенных разностей будет удовлетворять

$$\max \left(\frac{|f(I_j) - E_j|}{U(f(I_j))} \right) < 1 \quad (\text{C2.2-2b})$$

то есть расширенная неопределенность должна содержать остаток для каждой точки j . Данное условие накладывает большее ограничение, чем уравнение (C2.2-2a).

C2.2.1 Аппроксимация посредством многочленов

Аппроксимация посредством многочленов дает общую функцию

$$E(R) = f(R) = a_0 + a_1 R + a_2 R^2 + \dots + a_n R^n \quad (\text{C2.2-3})$$

Степень многочлена n_a следует выбирать такой, чтобы $n_{\text{par}} = n_a + 1 \leq n/2$

Расчёт лучше выполнять в матричном виде.

Пусть $\mathbf{X}_{(n \times n_{\text{par}})}$ будет матрица, у которой n строками являются $(1, I_j, I_j^2, \dots, I_j^{n_a})$;
 $\mathbf{a}_{(n_{\text{par}} \times 1)}$ будет вектором-столбцом, состоящим из коэффициентов $a_0, a_1, \dots, a_{n_a}$, определяемых многочленом аппроксимации;
 $\mathbf{e}_{(n \times 1)}$ будет вектором-столбцом, компонентами которого являются E_j ,
 $\mathbf{U}(\mathbf{e})_{(n \times n)}$ будет дисперсионно-ковариационной матрицей $\mathbf{e}$.

$\mathbf{U}(\mathbf{e})$ задается с помощью

$$\mathbf{U}(\mathbf{e}) = \mathbf{U}(m_{\text{ref}}) + \mathbf{U}(I_{\text{cal}}) + \mathbf{U}(\text{mod}) \quad (\text{C2.2-3a})$$

где $\mathbf{U}(m_{\text{ref}})$ - ковариационная матрица, связанная с опорными значениями m_{ref}

(4.2.4-2). Считаем достаточно высокую корреляцию между опорными значениями

$$\mathbf{U}(m_{\text{ref}}) = \mathbf{s}_{m_{\text{ref}}} \mathbf{s}_{m_{\text{ref}}}^T \quad (\text{C2.2-3b})$$

где $\mathbf{s}_{m_{\text{ref}}}$ - вектор-столбец неопределенностей $u(m_{\text{ref}})$ (equ. 7.1.2-14),

$\mathbf{U}(I_{\text{cal}})$ - диагональная матрица с элементами $u_{jj} = u^2(I_j)$;

$\mathbf{U}(\text{mod})$ - дополнительная ковариационная матрица, задаваемая выражением

$$\mathbf{U}(\text{mod}) = s_m^2 \mathbf{I} \quad (\text{C2.2-3c})$$

где $\mathbf{I}$ единичная матрица и s_m - неопределенность, обусловленная моделью. Этот вклад рассматривается для учета неадекватности модели.

Первоначально s_m устанавливается нулевой, если испытание χ^2 (C2.2-2a) дает неудовлетворительный результат, s_m итеративно увеличивают до тех пор, пока испытание χ^2 не даст удовлетворительный результат.

Если $\mathbf{U}(I_{\text{cal}})$ является преобладающим вкладом, ковариациями можно пренебречь и $\mathbf{U}(\mathbf{e})$ можно аппроксимировать диагональной матрицей с элементами

$$u_{jj} = u^2(E_j) + s_m^2 \quad (\text{C2.2-3d})$$

Матрицей $\mathbf{P}$ весовых коэффициентов является

$$\mathbf{P} = \mathbf{U}(\mathbf{e})^{-1} \quad (\text{C2.2-4})$$

и коэффициенты $a_0, a_1, \dots$ находят решением нормальных уравнений

$$\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \mathbf{a} - \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (\text{C2.2-5})$$

решение которых имеет вид

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \quad (\text{C2.2-6})$$

n остатков $v_j = f(I_j) - E_j$ составляют вектор

$$\mathbf{v} = \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} - \mathbf{e} \quad (\text{C2.2-7})$$

и χ_{obs}^2 получают в виде

$$\chi_{\text{obs}}^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \quad (\text{C2.2-8})$$

При условии выполнения (C2.2-2), дисперсии и ковариации для коэффициентов $\mathbf{a}$ задаются матрицей

$$\mathbf{U}(\hat{\mathbf{a}}) = (\mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X})^{-1} \quad (\text{C2.2-9})$$

Если условие (C2.2-2) не выполняется, можно применить одну из следующих процедур

- a: повторить аппроксимацию с аппроксимирующим многочленом большего порядка n_a , пока $n_a + 1 \leq 2$;
- b: повторить аппроксимацию после увеличения U_{mod} .

Результаты аппроксимации $\hat{a}$ и $U(\hat{a})$ можно использовать для определения погрешностей аппроксимации и соответствующих неопределенностей для n точек I_j .

Погрешности E_{apprj} составляют вектор

$$\mathbf{e}_{appr} = \mathbf{X} \mathbf{a} \quad (C2.2-10)$$

с неопределенностями, заданными выражением

$$u^2(E_{apprj}) = \text{diag}(\mathbf{X} \mathbf{U} \mathbf{X}^T). \quad (C2.2-11)$$

Они также служат для определения погрешности и соответствующей ей неопределенности для любого другого показания – называемого показанием R для отличия от показания I_j – в пределах калиброванного диапазона взвешивания.

Пусть

$\mathbf{r}$ будет вектором-столбцом, элементами которого являются $(1, R, R^2, \dots, R^n)^T$,

$\mathbf{r}'$ будет вектором-столбцом, элементами которого являются производные $(0, 1, 2R, 3R^2, \dots, nR^{n-1})^T$.

Погрешность равна

$$E_{appr}(R) = \mathbf{r}^T \mathbf{a} \quad (C2.2-12)$$

и неопределенность задается с помощью

$$u^2(E_{appr}) = (\mathbf{r}'^T \mathbf{U}(R) \mathbf{r}'^T + \mathbf{r}^T \mathbf{U}(R) \mathbf{r}) \quad (C2.2-13)$$

Первый член справа упрощается, так как все 3 матрицы являются одномерными, принимая вид

$$(\mathbf{r}'^T \mathbf{U}(R) \mathbf{r}'^T = (a_1 + 2a_2 R + 3a_3 R^2 + \dots + na_{n+1} R^{n-1})^2 u^2(R) \quad (C2.2-14)$$

где $u^2(R) = \sigma_0^2/12 + \sigma_R^2/12 + s^2(R) + u_{rel}^2(\delta R_{cc}) R^2$ согласно (7.1.1-12).

C2.2.2 Аппроксимация прямой линией

Конструкция многих современных электронных весов предусматривает встроенную (внутреннюю) корректировку для получения хорошей линейности. Поэтому погрешности, большей частью, являются результатом неправильной юстировки, и погрешность возрастает пропорционально R . Для таких весов может быть целесообразно ограничить многочлен линейной функцией, если она достаточна с учетом условия (C2.2-2).

Обычное решение заключается в применении (C2.2-3) с $n_a = 1$

$$E(R) = f(R) = a_0 + a_1 R \quad (C2.2-15)$$

Один вариант заключается в принятии $a_0 = 0$ и определении только a_1 . Его можно обосновать тем, что вследствие установки нуля, по меньшей мере, для возрастающих нагрузок, погрешность $E(R = 0)$ автоматически является нулевой

$$E(R) = f(R) = a_1 R \quad (C2.2-16)$$

Другим вариантом является определение коэффициента a (равного a_1 в (C2.2-16)) в качестве всех средних относительных погрешностей $g_j = E_j / I_j$. Это позволяет включить погрешности показаний нетто после операции тарирования, если они были определены при калибровке

$$a = \sum (E_j / I_j) / n \quad (C2.2-17)$$

Эти вычисления, за исключением варианта (C2.2-17), можно выполнять используя матричную формулу в C2.2.1.

Другие возможности приведены далее.

C2.2.2.1 Линейную регрессию согласно (C2.2-15) можно выполнять с помощью программного обеспечения.

Соответствие между результатами обычно представляет

«пересечение» a_0

«угловой коэффициент» a_1

Однако простых карманных калькуляторов может быть недостаточно для выполнения линейной регрессии на основании данных взвешенной погрешности, или линейной регрессии с $a_0 = 0$.

C2.2.2.2 Для упрощения программирования вычислений с помощью компьютера не в матричной записи далее будет представлена соответствующая формула.

Если целью является выполнение условия (C2.2-2a), метод начинают с первой линейной регрессии с использованием

$$p_j = 1/u^2(E_j) \quad (C2.2-18a)$$

Если (C2.2-2a) еще не выполняется, то среднее квадратическое отклонение подгонки можно определить в виде

$$stdfit = \sqrt{\frac{\sum_j (f(I_j) - E_j)^2}{(n - n_{par})}} \quad (C2.2-18b)$$

На втором шаге следует определить новые весовые коэффициенты в виде

$$p'_j = 1/(u^2(E_j) + stdfit^2) \quad (C2.2-18c)$$

С этими новыми весовыми коэффициентами следует определить новую линейную регрессию. При этом методе линейная регрессия удовлетворяет условию (C2.2-2a).

Если цель заключается в выполнении более ограничительного условия (C2.2-2b), вероятно необходимость включения в (C2.2-18a) добавочной составляющей неопределенности, S_m . Первоначально S_m устанавливают нулевой, затем S_m итеративно увеличивают до тех пор, пока не будет выполнено условие (C2.2-2b). Рекомендация по увеличению шага для увеличения S_m может заключаться в рассмотрении 1/10 разрешения весов.

Для простоты в следующих выражениях опущены индексы j у I , E , p .

а) линейная регрессия для (C2.2-15)

$$a_0 = \frac{\sum p E \sum p I^2 - \sum p I \sum p I E}{\sum p \sum p I^2 - (\sum p I)^2} \quad (C2.2-15a)$$

$$a_1 = \frac{\sum p \sum p I E \sum p E \sum p I}{\sum p \sum p I^2 - (\sum p I)^2} \quad (C2.2-15b)$$

$$\chi^2 = \sum p (a_0 + a_1 I - E^2) \quad (C2.2-15c)$$

$$u^2(a_0) = \frac{\sum p I^2}{\sum p \sum p I^2 - (\sum p I)^2} \quad (C2.2-15d)$$

$$u^2(a_1) = \frac{\sum p E^2}{\sum p \sum p I^2 - (\sum p I)^2} \quad (C2.2-15e)$$

$$\text{cov}(a_0, a_1) = \frac{\sum p I E}{\sum p \sum p I^2 - (\sum p I)^2} \quad (C2.2-15f)$$

(C2.2-15) применима для аппроксимированной погрешности показания R , и неопределенность аппроксимации $u(E_{\text{appr}})$ задается с помощью

$$u^2(E_{\text{appr}}) = a_1^2 u^2(R) + u^2(a_0) + R^2 u^2(a_1) + 2 R \text{cov}(a_0, a_1) \quad (C2.2-15g)$$

б) линейная регрессия с $a_0 = 0$

$$a_1 = \sum p I E \sum p I^2 \quad (C2.2-16a)$$

$$\chi^2 = \sum p (a_1 I - E^2) \quad (C2.2-16b)$$

$$u^2(a_1) = 1 / \sum p I^2 \quad (C2.2-16c)$$

(C2.2-16) применима для аппроксимированной погрешности показания R , и приписываемая неопределенность $u(E_{\text{appr}})$ задается с помощью

$$u^2(E_{\text{appr}}) = a_1^2 u^2(R) + R^2 u^2(a_1) \quad (C2.2-16d)$$

с) средние градиенты

В данном варианте неопределенности равны $u(E_j / I_j) = u(E_j) / I_j$ и $p_j = \bar{E} / u^2(E_j)$.

$$a = (\sum p E) / \sum p \quad (\text{C2.2-17a})$$

$$\chi^2 = \sum p (a - E / \bar{E})^2 \quad (\text{C2.2-17b})$$

$$u^2(a) = 1 / \sum p \quad (\text{C2.2-17c})$$

(C2.2-17) применима для аппроксимированной погрешности показания R , которое может быть также и аппроксимированным показанием, и неопределенность аппроксимации $u(E_{\text{appr}})$ задается с помощью

$$u^2(E_{\text{appr}}) = a^2 u^2(R) + R^2 u^2(a) \quad (\text{C2.2-17d})$$

С3 Члены, не зависящие от показаний

Если не являющиеся функциями показания члены не дают какое-либо оцениваемое значение для погрешности, которую в эксплуатации следует ожидать для данного показания, они могут быть полезны для получения указанной в 7.5.2 «общей неопределенности».

С3.1 Средняя погрешность

Среднее значение всех погрешностей равно

$$E^0 = \bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_j \quad (\text{C3.1-1})$$

со средним квадратическим отклонением

$$s(E) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{E} - E_j)^2} = u_{\text{appr}} \quad (\text{C3.1-2})$$

Примечание: Точку данных $I = 0$ $E = 0$ следует включать в виде I_1, E_1 .

Когда $\bar{E}$ близко к нулю, в (7.5.2-2а) может добавляться только $s^2(E)$. В других случаях, в частности когда $|\bar{E}| \geq u(W)$ следует использовать (7.5.2-3а) с $u(W)$, увеличенной на $u_{\text{appr}} = s(E)$.

С3.2 Максимальная погрешность

«Максимальную погрешность» следует понимать как наибольшее абсолютное значение всех погрешностей

$$E_{\text{max}} = |E_j|_{\text{max}} \quad (\text{C3.2-1})$$

С3.2.1 С $E^0 = E_{\text{max}}$ (7.5.2-3а) будет означать «общую неопределенность», которая охватывает любую погрешность в диапазоне взвешивания с вероятностью охвата больше 95 %. Преимущество формулы в том, что она проста и понятна.

С3.2.2 Принимая равномерное распределение всех погрешностей в – мнимом! – диапазоне $\pm E_{\text{max}}$ E^0 можно определить как среднее квадратическое отклонение погрешностей

$$E^0 = E_{\text{max}} / \sqrt{3} \quad (\text{C3.2-2})$$

для подстановки в (7.5.2-2а).

ПРИЛОЖЕНИЕ D: ОБОЗНАЧЕНИЯ

В данном приложении приведены обозначения и их определения, используемые более чем в одном разделе основного документа.

Обозначение	Определение
D	Дрейф, изменение величины во времени
E	Погрешность (показания)
I	Показание весов
I_{ref}	Опорное значение показания весов
K_T	Температурный коэффициент, характеризует чувствительность весов к изменению температуры
L	Нагрузка на весах
Max	Максимальная нагрузка
$Max_{\downarrow}$	Верхний предел диапазона взвешивания с наименьшей ценой деления шкалы
Max'	Верхний предел заданного диапазона взвешивания, $Max' < Max$
Min	Значение нагрузки, ниже которого результат взвешивания может характеризоваться избыточной относительной погрешностью (из [2] и [3])
Min'	Нижний предел заданного диапазона взвешивания, $Min' > Min$
R	Показание весов, не относящееся к испытательной нагрузке
R_{min}	Минимальное показание
$R_{min,SF}$	Минимальное показание для коэффициента запаса >1
Req	Требование пользователя к относительной точности взвешивания
T	Температура (в K)
Tol	Заданное значение допуска
U	Расширенная неопределенность
U_{gl}	Общая расширенная неопределенность
W	Результат взвешивания в воздухе
d	Цена деления шкалы, разница в единицах массы двух соседних показаний показывающего устройства
d_1	Наименьшая цена деления шкалы
d_T	Фактическая цена деления шкалы $< d$, использованная при калибровке
g	Местное ускорение свободного падения
k	Коэффициент охвата
k_s	Юстировочный коэффициент
m	Масса объекта
m_c	Условное значение массы, как правило, гири
m_N	Номинальное значение массы гири
m_{ref}	Опорное значение массы испытательной нагрузки
mpe	Максимальная допускаемая погрешность (показания, гири и т.д.) в заданном контексте
n	Количество элементов, как указано в каждом случае
p	Атмосферное давление
s	Среднее квадратическое отклонение
t	Температура ($^{\circ}C$)
u	Стандартная неопределенность
u_{rel}	Относительная стандартная неопределенность, равная отношению стандартной неопределенности к соответствующей основной

	величине
ν	Число степеней свободы
ρ	Плотность
ρ_0	Стандартная плотность воздуха, $\rho_0 = 1,2 \text{ кг/м}^3$
ρ_a	Плотность воздуха
ρ_c	Стандартная плотность гири, $\rho_c = 8000 \text{ кг/м}^3$

Индекс	означает
B	выталкивающая сила воздуха (при калибровке)
D	дрейф
L	при нагрузке
N	номинальное значение
St	эталонная (масса)
T	испытательное
adj	юстировочное
appr	аппроксимация
buoy	выталкивающая сила воздуха (результат взвешивания)
cal	калибровочное
conv	конвекционное
corr	поправочное
dig	дискретизация
ecc	нецентральное нагружение
gl	общее
i, j	нумерация
instr	весы
max	максимальное значение из данной совокупности
min	минимальное значение из данной совокупности
proc	процедура взвешивания
ref	опорное
rel	относительное
rep	повторяемость
s	фактическое во время измерения
sub	замещающий груз
tare	работа устройства тарирования
temp	температурное
time	время
0	нулевое, без нагрузки

ПРИЛОЖЕНИЕ Е: СВЕДЕНИЯ О ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЕ ВОЗДУХА

В данном приложении приведены дополнительные сведения для поправки на выталкивающую силу воздуха, рассматриваемой в 7.1.2.2.

Е1 Плотность гирь

Если плотность гири ρ и ее стандартная неопределенность $u(\rho)$ неизвестны, для гирь классов точности с E_2 по M_2 согласно ГОСТ О IML R1 1 1 -1 -2 0 0 9 можно использовать следующие значения (взято из [4], таблица B7).

Сплав/материал	Принятая плотность ρ , кг/м ³	Стандартная неопределенность $u(\rho)$, кг/м ³
Нейзильбер	8 600	85
Латунь	8 400	85
Нержавеющая сталь	7 950	70
Углеродистая сталь	7 700	100
Железо	7 800	100
Чугун (белый)	7 700	200
Чугун (серый)	7 100	300
Алюминий	2 700	65

Для гирь с подгоночной полостью, заполненной значительным количеством материала отличающейся плотности, в [4] дана формула для расчета общей плотности такой гири.

Е2 Выталкивающая сила воздуха для гирь, соответствующих ГОСТ OIMLR1 1 1 -1 -2 0 0 9

Как указано в подстрочном примечании к 7.1.2.2, ГОСТ О IML R1 1 1 -1 -2 0 0 9 требует, чтобы плотность гири находилась в определенных пределах, связанных с максимальной допускаемой погрешностью m_{pe} определенной вариацией плотности воздуха. Значения m_{pe} пропорциональны номинальному значению для гирь массой 100 г и более. Это позволяет оценить относительную неопределенность $u_{rel}(\delta m_B)$. Соответствующие формулы для случаев с юстировкой весов непосредственно перед калибровкой (7.1.2-5с) и без юстировки весов перед калибровкой (7.1.2-5d) приведены в таблице Е2.1 для классов точности E_2 по M_1 .

Для гирь с $m_N \leq 50$ г значения m_{pe} приведены в ГОСТ OIMLR1 1 1 -1 -2 0 0 9, относительное значение m_{pe}/m_N увеличивается с уменьшением массы. Для этих гирь в таблице Е2.1 приведены абсолютные стандартные неопределенности $u(\delta m_B) = u_{rel}(\delta m_B) m_N$.

Значения из таблицы Е2.1 можно использовать для оценки вклада в неопределенность, если на выталкивающую силу воздуха поправка не вносится.

Таблица Е2.1: Стандартная неопределенность поправки на выталкивающую силу воздуха для гирь, соответствующих ГОСТ OIMLR1 1 1 -1 -2 0 0 9

Расчёты выполнены согласно 7.1.2.2 для случаев с юстировкой весов непосредственно перед калибровкой (7.1.2-5с), u_A , и без юстировки весов перед калибровкой (7.1.2-5d), u_B .

	Класс E ₂			Класс F ₁			Класс F ₂			Класс M ₁		
m_N в г	mpe в мг	u_A в мг	u_B в мг	mpe в мг	u_A в мг	u_B в мг	mpe в мг	u_A в мг	u_B в мг	mpe в мг	u_A в мг	u_B в мг
50	0,100	0,014	0,447	0,30	0,043	0,476	1,00	0,14	0,58	3,0	0,43	0,87
20	0,080	0,012	0,185	0,25	0,036	0,209	0,80	0,12	0,29	2,5	0,36	0,53
10	0,060	0,009	0,095	0,20	0,029	0,115	0,60	0,09	0,17	2,0	0,29	0,38
5	0,050	0,007	0,051	0,16	0,023	0,066	0,50	0,07	0,12	1,6	0,23	0,27
2	0,040	0,006	0,023	0,12	0,017	0,035	0,40	0,06	0,08	1,2	0,17	0,19
1	0,030	0,004	0,013	0,10	0,014	0,023	0,30	0,04	0,05	1,0	0,14	0,15
0,5	0,025	0,004	0,008	0,08	0,012	0,016	0,25	0,04	0,04	0,8	0,12	0,12
0,2	0,020	0,003	0,005	0,06	0,009	0,010	0,20	0,03	0,03	0,6	0,09	0,09
0,1	0,016	0,002	0,003	0,05	0,007	0,008	0,16	0,02	0,02	0,5	0,07	0,07
<u>Относительные пределы допускаемой погрешности (mpe/m_N) и относительные стандартные неопределенности $u_{rel}(\delta m_B)$, мг/кг, для гирь массой 100 г и больше</u>												
	Класс E ₂			Класс F ₁			Класс F ₂			Класс M ₁		
	mpe/m_N мг/кг	$u_{rel} A$	$u_{rel} B$	mpe/m_N мг/кг	$u_{rel} A$	$u_{rel} B$	mpe/m_N мг/кг	$u_{rel} A$	$u_{rel} B$	mpe/m_N мг/кг	$u_{rel} A$	$u_{rel} B$
≥ 100	1,60	0,23	8,89	5,00	0,72	9,38	16,0	2,31	11,0	50,0	7,22	15,88

ПРИЛОЖЕНИЕ F: ВЛИЯНИЕ КОНВЕКЦИИ

В 4.2.3 объяснено изменение наблюдаемой массы Δm_{conv} разностью температур ΔT гири и окружающего воздуха. Представленные далее более подробные сведения позволяют оценивать ситуации, в которых влияние конвекции должно быть учтено в неопределенности калибровки.

Все приведенные в следующих таблицах значения рассчитаны на основании [7]. Соответствующие формулы и используемые параметры здесь не приводятся. Приведены только основная формула и обязательные условия.

Рассматриваемый вопрос достаточно сложен как в самой физике, так и в оценке экспериментальных результатов. Прецизионность представленных ниже значений не следует переоценивать.

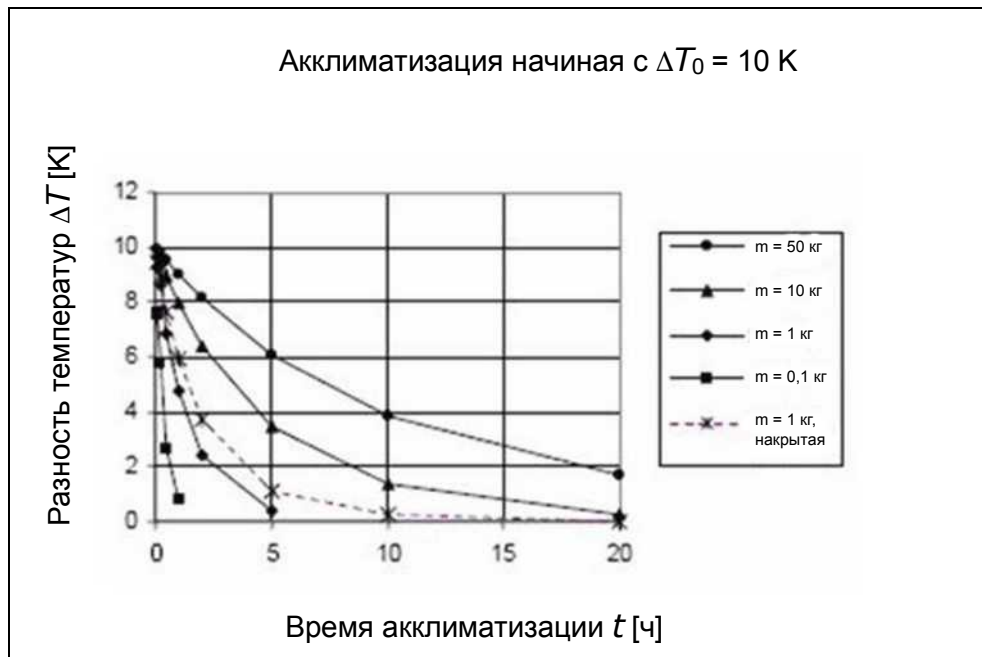
F1 Соотношение между температурой и временем

Начальная разность температур ΔT_0 снижается со временем Δt вследствие теплообмена между гирей и окружающим воздухом. Скорость теплообмена в достаточной степени независима от знака ΔT_0 , поэтому нагрев или охлаждение гири происходит за одинаковые интервалы времени.

На рисунке F1.1 показаны некоторые примеры результата акклиматизации. Начиная с начальной разности температур 10 К, показаны значения фактической разности температур ΔT после различных промежутков времени акклиматизации для 4 различных гирь. Гири помещены на трех достаточно тонких колонках из ПВХ на «открытом воздухе». Для сравнения показана ΔT для гири 1 кг, помещенной на такие же стойки, но накрытой стеклянным колоколом, уменьшающим конвекционный поток воздуха. Видно, что из-за применения стеклянного колокола требуется в 1,5-2 раза больше времени для достижения такого же снижения ΔT .

Ссылки в [7]: формула (21) и параметры для случаев 3b и 3c в таблице 4.

Рисунок F1.1: Акклиматизация гирь



В таблицах F1.2 и F1.3 приведены значения времени акклиматизации Δt для гирь, которые следует выдерживать для снижения разности температур с ΔT_1 до меньшего ΔT_2 . Условия теплообмена такие же, как на рисунке F1.1: таблица F1.2 для гирь массой от « $m = 0,1$ кг » до « $m = 50$ кг »; таблица F1.3 как для « $m = 1$ кг, накрытой колпаком ».

В реальных условиях значения времени акклиматизации могут быть меньше при помещении гирь непосредственно на теплопроводную опору или, наоборот, быть больше при частичном размещении гири в футляре.

Ссылки в [7]: формула (26) и параметры для случаев 3b, 3с в таблице 4.

Таблица F1.2 Интервалы времени для ступенчатого снижения разности температур

Гири, стоящие на трех достаточно тонких колонках из ПВХ на открытом воздухе.

Время акклиматизации для достижения ΔT из ближайшего большего ΔT , случай 3b, мин.							
m, кг	ΔT , К						
	от 20 до 15 К	от 15 до 10 К	от 10 до 7 К	от 7 до 5 К	от 5 до 3 К	от 3 до 2 К	от 2 до 1 К
50	149,9	225,3	212,4	231,1	347,9	298,0	555,8
20	96,2	144,0	135,2	135,0	219,2	186,6	345,5
10	68,3	101,9	95,3	94,8	153,3	129,9	239,1
5	48,1	71,6	66,7	66,1	106,5	89,7	164,2
2	30,0	44,4	41,2	40,6	65,0	54,4	98,8
1	20,8	30,7	28,3	27,8	44,3	37,0	66,7
0,5	14,3	21,0	19,3	18,9	30,0	24,9	44,7
0,2	8,6	12,6	11,6	11,3	17,8	14,6	26,1
0,1	5,8	8,5	7,8	7,5	11,8	9,7	17,2
0,05	3,9	5,7	5,2	5,0	7,8	6,4	11,3
0,02	2,3	3,3	3,0	2,9	4,5	3,7	6,4

Время акклиматизации для достижения ΔT из ближайшего большего ΔT , случай 3b, мин.							
	ΔT , К						
м, кг	от 20 до 15 К	от 15 до 10 К	от 10 до 7 К	от 7 до 5 К	от 5 до 3 К	от 3 до 2 К	от 2 до 1 К
0,01	1,5	2,2	2,0	1,9	2,9	2,4	4,2

Примеры для гири 1 кг:

для снижения ΔT с 20 до 15 К требуется 20,8 мин,

для снижения ΔT от 15 до 10 К требуется 30,7 мин,

для снижения ΔT от 10 до 5 К требуется 28,3 мин + 27,8 мин = 56,1 мин.

Таблица F1.3 Интервалы времени для ступенчатого снижения разности температур

Гири, стоящие на трех достаточно тонких колонках из ПВХ и накрытые стеклянным колоколом.

Время акклиматизации для достижения ΔT из ближайшего большего ΔT , случай 3b, мин.							
	ΔT , К						
м, кг	от 20 до 15 К	от 15 до 10 К	от 10 до 7 К	от 7 до 5 К	от 5 до 3 К	от 3 до 2 К	от 2 до 1 К
50	154,2	235,9	226,9	232,1	388,7	342,7	664,1
20	103,8	158,6	152,4	155,6	260,2	228,9	442,2
10	76,8	117,2	112,4	114,7	191,5	168,1	324,0
5	56,7	86,4	82,8	84,3	140,5	123,1	236,5
2	37,8	57,5	54,9	55,8	92,8	81,0	155,0
1	27,7	42,1	40,1	40,7	67,5	58,8	112,0
0,5	20,2	30,7	29,2	29,6	48,9	42,4	80,5
0,2	13,3	20,1	19,1	19,2	31,7	27,3	51,6
0,1	9,6	14,5	13,7	13,8	22,6	19,5	36,6
0,05	6,9	10,4	9,8	9,9	16,1	13,8	25,7
0,02	4,4	6,7	6,3	6,2	10,2	8,6	16,0
0,01	3,2	4,7	4,4	4,4	7,1	6,0	11,1

F2 Изменение наблюдаемой массы

Поток воздуха, вызываемый разностью температур ΔT , направлен вверх, если гиря теплее ($\Delta T > 0$) окружающего воздуха, и вниз, если она холоднее ($\Delta T < 0$). Поток воздуха создает силы трения на вертикальной поверхности гири, и выталкивающие или давящие усилия на ее горизонтальных поверхностях, вызывая изменение Δm_{conv} наблюдаемой массы. Грузоприемное устройство весов также вносит вклад в изменение массы, но его характер еще не исследован полностью.

Эксперименты показывают, что абсолютные значения изменений обычно меньше для $\Delta T < 0$, чем для $\Delta T > 0$. Следовательно, имеет смысл вычислять изменения массы для абсолютных значений ΔT , используя параметры для $\Delta T > 0$.

В таблице F2.1 даны значения Δm_{conv} для гирь при разностях температур ΔT , приведённых в таблицах F1.2 и F1.3. Они получены на основании экспериментов, выполненных на компараторе массы с поворотным столом для смены гирь внутри стеклянного корпуса. Преобладающие при калибровке «обычных» весов условия

различаются, значения в таблице следует принимать в качестве оценок влияний, которые можно ожидать при фактической калибровке.

Ссылки в [7]: формула (34) и параметры для случая 3d в таблице 4.

Таблица F2.1 Изменение наблюдаемой массы Δm_{conv}

Изменение массы гирь Δm_{conv} при заданных разностях температур ΔT , мг								
	$\Delta T, \text{K}$							
$m, \text{кг}$	20	15	10	7	5	3	2	1
50	113,23	87,06	60,23	43,65	32,27	20,47	14,30	7,79
20	49,23	38,00	26,43	19,25	14,30	9,14	6,42	3,53
10	26,43	20,47	14,30	10,45	7,79	5,01	3,53	1,96
5	14,30	11,10	7,79	5,72	4,28	2,76	1,96	1,09
2	6,42	5,01	3,53	2,61	1,96	1,27	0,91	0,51
1	3,53	2,76	1,96	1,45	1,09	0,72	0,51	0,29
0,5	1,96	1,54	1,09	0,81	0,61	0,40	0,29	0,17
0,2	0,91	0,72	0,51	0,38	0,29	0,19	0,14	0,08
0,1	0,51	0,40	0,29	0,22	0,17	0,11	0,08	0,05
0,05	0,29	0,23	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03
0,02	0,14	0,11	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01
0,01	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01

Значения из таблицы можно сравнивать с неопределенностью калибровки, или с заданным допуском для гирь, используемых для калибровки, с тем, чтобы оценить могут ли фактические значения ΔT вызвать значительное изменение наблюдаемой массы.

В качестве примера в таблице F2.2 приведены разности температур, которые, вероятно, вызывают для гирь, соответствующих Г О С Т О I M L R 1 1 1 - 1 - 2 0 0 9, изменения массы Δm_{conv} , не превышающие определенные пределы. Для сравнения использованы данные из таблицы F2.1.

Рассматриваемые пределы это - максимальные допускаемые погрешности и 1/3 от них.

Можно полагать, что с такими пределами влияние конвекции важно только для гирь классов F₁ Г О С Т О I M L R 1 1 1 - 1 - 2 0 0 9 или выше.

Таблица F2.2 Температурные ограничения для заданных Δm_{conv}

ΔT_A = разность температур для $\Delta m_{\text{conv}} \leq m_{\text{ре}}$

ΔT_B = разность температур для $\Delta m_{\text{conv}} \leq m_{\text{ре}}/3$

Разности ΔT_A для $\Delta m_{\text{conv}} \leq m_{\text{ре}}$ и ΔT_B для $\Delta m_{\text{conv}} \leq m_{\text{ре}}/3$						
	Класс E ₂			Класс F ₁		
$m, \text{кг}$	$m_{\text{ре}}, \text{мг}$	$\Delta T_A, \text{K}$	$\Delta T_B, \text{K}$	$m_{\text{ре}}, \text{мг}$	$\Delta T_A, \text{K}$	$\Delta T_B, \text{K}$
50	75	12	4	250	>20	12
20	30	11	3	100	>20	11
10	15	10	3	50	>20	10
5	7,5	10	3	25	>20	10
2	3	9	1	10	>20	9
1	1,5	7	1	5	>20	7
0,5	0,75	6	1	2,5	>20	6
0,2	0,30	5	1	1,0	>20	5

Разности ΔT_A для $\Delta m_{\text{conv}} \leq m_{\text{пр}}$ и ΔT_B для $\Delta m_{\text{conv}} \leq m_{\text{пр}}$						
	Класс E ₂			Класс F ₁		
m_N , кг	$m_{\text{пр}}$, мг	ΔT_A , К	ΔT_B , К	$m_{\text{пр}}$, мг	ΔT_A , К	ΔT_B , К
0,1	0,15	4	1	0,50	>20	4
0,05	0,10	6	1	0,30	>20	6
0,02	0,08	10	2	0,25	>20	10
0,01	0,06	15	3	0,20	>20	15

ПРИЛОЖЕНИЕ G: МИНИМАЛЬНАЯ МАССА

Минимальная масса это - наименьшее количество образца, требуемого для навески, только чтобы обеспечить заданную относительную точность взвешивания [13].

Следовательно, при взвешивании некоторого количества $R_{\min}$, представляющего минимальную массу, относительная неопределенность измерений результата взвешивания равна требуемой относительной точности взвешивания Req , поэтому

$$\frac{U(R_{\min})}{R_{\min}} = Req \quad (G-1)$$

Это приводит к следующему соотношению, описывающему минимальную массу

$$R_{\min} = \frac{U(R_{\min})}{Req} \quad (G-2)$$

Общепринятой практикой является задание пользователями определенных требований к метрологическим характеристикам весов (технические требования пользователя). Обычно они задают верхние границы для значений неопределенности измерений, приемлемые для определенной задачи взвешивания. Иными словами, пользователи ссылаются на требования к точности процесса взвешивания или к допустимым отклонениям при взвешивании. Также очень часто пользователи должны придерживаться нормативных документов, которые предусматривают соблюдение определенного требования к неопределенности измерений. Как правило, требования приводят в виде относительного значения, например, относительная неопределенность измерений 0,1 %.

Обычно для оценки способности весов соответствовать определенным требованиям пользователя используют общую неопределенность.

Общую неопределенность, как правило, аппроксимируют линейным уравнением (7.5.2-3e)

$$U_{gl}(W) \approx U(W) = 0 + \left\{ \left[\frac{U(W=Ma)}{U(W=0)} \right] / Ma \right\} R + a_1 R = \alpha_{gl} + \beta_{gl} \cdot R \quad (G-3)$$

Относительная общая неопределенность, таким образом, является гиперболической функцией [так в оригинале – прим. перев.] и определяется в виде

$$U_{gl,rel}(W) = \frac{U_{gl}(W)}{R} = \frac{\alpha_{gl}}{R} + \beta_{gl} \quad (G-4)$$

Для заданного требования точности Req только взвешивания с

$$U_{gl,rel}(W) \leq Req \quad (G-5)$$

отвечают соответствующему требованию пользователя. Следовательно, только взвешивания с показанием

$$R \geq \frac{a_{gl}}{Req - \beta_1} \quad (G-6)$$

имеют относительную общую неопределенность измерения меньше установленного пользователем определенного требования, и поэтому приемлемы. Предельное значение, т.е. наименьший результат взвешивания, отвечающий требованиям пользователя, равно

$$R_{\min} = \frac{a_{gl}}{Req - \beta_1} \quad (G-7)$$

и называется «минимальная масса». Исходя из этого значения, пользователь может определить соответствующие стандартные рабочие процедуры, которые обеспечивают ему взвешивание на весах, соответствующие требованиям к минимальной массе, т.е. взвешивание только масс, которые превышают минимальную массу.

Так как оценка неопределенности измерений в эксплуатации может быть затруднена по причине таких факторов как: уровни вибрации, сквозняки, влияния, обусловленные оператором, и т.д., или вследствие специфических влияний применения взвешивания: например, навески с электростатическим зарядом, магнитные мешалки и т.д., вводится коэффициент запаса.

Коэффициент запаса SF представляет собой число большее единицы, на которое делят Req (требование пользователя). Цель заключается в обеспечении относительной общей неопределенности измерений не превышающей значения Req , деленного на коэффициент запаса. Это гарантирует то, что, не смотря на воздействие окружающей среды или специфическое применение взвешивания, оказывающих заметное влияние на результат измерений и способных увеличивать неопределенность измерений выше некоторого уровня, оцениваемого общей неопределенностью, с высокой степенью подстраховки, требование пользователя Req будет выполнено.

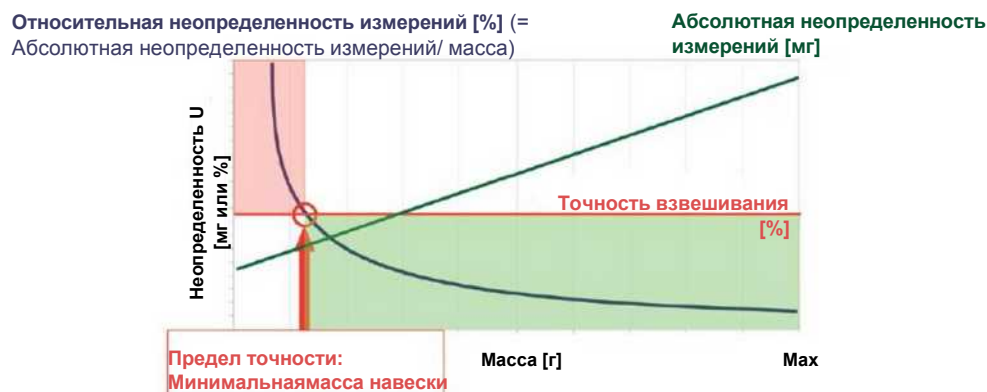
$$U_{gl,rel}(W) \leq Req / SF \quad (G-8)$$

Поэтому минимальную массу с коэффициентом запаса можно рассчитать как

$$R_{\min, SF} = \frac{a_{gl} \cdot SF}{Req - \beta_1 \cdot SF} \quad (G-9)$$

Пользователь отвечает за определение коэффициента запаса в зависимости от степени, с которой воздействие окружающей среды и специфичность применения взвешивания могут оказывать влияние на неопределенность измерений.

Следует отметить, что минимальная масса относится к измеряемой на весах массе нетто (массе навески), т.е. для выполнения требования пользователя Req массу тарной ёмкости учитывать не следует. Поэтому минимальную массу часто называют «минимальной массой навески».

Рисунок G.1: Неопределённость измерений

Абсолютная (зеленая линия) и относительная (синяя линия) неопределенности измерений массы. Предел точности весов, так называемое, минимальное значение *массы навески*, представляет собой точку пересечения относительной неопределенности измерений и требуемой точности взвешивания.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н: ПРИМЕРЫ

Примеры, представленные в данном приложении, демонстрируют разные варианты того, как положения, содержащиеся в настоящем руководстве, могут быть корректно использованы. Они не указывают на предпочтительность каких-либо отдельных процедур по отношению к тем, для которых примеры не приведены.

Если калибровочная лаборатория предпочитает действовать в полном соответствии с одним из приведённых примеров, она может приводить ссылку на него в своем руководстве по качеству и в любом выдаваемом сертификате.

Примеры Н1, Н2 и Н3 представляют основной подход к определению погрешности и неопределенностей при калибровке. Пример Н4 демонстрирует более сложный подход.

- Примечания:
1. В сертификате должна содержаться вся, насколько возможно, информация, приведенная в Нп.1, и, если применимо, по меньшей мере, та, что выделена жирным шрифтом в Нп.2 и Нп.3, где Нп = Н1, Н2...
 2. Для наглядности значения в примерах даны с большим числом разрядов, чем может быть в калибровочном сертификате.
 3. Для равномерных распределений принимается бесконечное количество степеней свободы.

Н1 Весы на нагрузку 220 г и ценой деления шкалы 0,1 мг

Предварительное замечание:

Продемонстрирована калибровка лабораторных весов. Пример показывает полную стандартную процедуру для представления результатов измерений и соответствующих неопределенностей, как это делается большинством лабораторий. Альтернативный метод с учётом влияний выталкивающей силы воздуха и конвекции также представлен в виде варианта 2 (выделен курсивом).

Первая ситуация: Юстировка чувствительности выполняется независимо от калибровки**Н1.1/А Условия, при которых выполняется калибровка**

Прибор	Электронные весы, описание и идентификация
Максимальная нагрузка <i>Max</i> / Цена деления шкалы <i>d</i>	220 г / 0,1 мг
Температурный коэффициент	$K_T = 1,5 \times 10^{-6}/K$ (из руководства изготовителя); необходим единственно для расчета неопределенности результата взвешивания.
Встроенное юстировочное устройство	Работает автоматически после включения весов и при $\Delta T \geq 3 K$. Необходимо единственно для расчета неопределенности результата взвешивания. Состояние: активно
Юстировка исполнителем калибровки	Не юстируются непосредственно перед калибровкой.
Температура во время калибровки	21 °C в начале калибровки.
Атмосферное давление и влажность (необязательные параметры)	990 гПа, 50 % RH
Условия в помещении	Максимальное изменение температуры 5 K (лабораторное помещение без окон). Если используется для вычисления неопределенности выталкивающей силы согласно формуле 7.1.2-5е, его следует представить в сертификате калибровки. Не имеет значения для неопределенности результата взвешивания, если задействовано встроенное юстировочное устройство ($\Delta T \geq 3 K$). В таком случае максимальное изменение температуры для оценки неопределенности результата взвешивания равно 3 K.
Испытательные нагрузки/ акклиматизация	Гири, класс точности E₂ , акклиматизированные к температуре помещения (в варианте 2 следует учитывать разность температур 2 K относительно температуры помещения).

Н1.2/А Испытания и результаты

Повторяемость	Испытательная нагрузка 100 г (приложена 5 раз)
Требования приведены в главе 5.1. Показания ненагруженных весов при необходимости устанавливают на нуль; показания при нагрузке записывают.	100,000 6 г
	100,000 3 г
	100,000 5 г
	100,000 4 г
	100,000 5 г
Среднее квадратическое отклонение	$s = 0,00011 \text{ г}$

Нецентральное нагружение	Расположение нагрузки на чашке	Испытательная нагрузка 100 г
Требования приведены в главе 5.3. Перед нагружением показание устанавливают на нуль; нагрузку сначала помещают в центр, затем в указанные положения	Центр	100,000 6 г
	Спереди слева	100,000 4 г
	Сзади слева	100,000 5 г
	Сзади справа	100,000 7 г
	Спереди справа	100,000 5 г
Максимальное отклонение	$ \Delta_{\text{ecc}} _{\text{max}}$	0,000 2 г

Погрешности показаний:

Общие предварительные условия: Требования приведены в главе 5.2, гири распределены в диапазоне взвешивания достаточно равномерно. Каждая из испытательных нагрузок накладывается однократно; отдельные нагружения выполняются только в сторону увеличения нагрузки, показание ненагруженных весов устанавливают при необходимости на нуль.

Вариант 1: Плотности воздуха неизвестны во время юстировки и калибровки (т.е. без внесения поправки на выталкивающую силу воздуха в значения погрешности показаний)

Нагрузка m_{ref}	Показание I	Погрешность показания E
0,0000 г	0,000 0 г	0,000 0 г
50,0000 г	50,000 4 г	0,000 4 г
99,9999 г	100,000 6 г	0,000 7 г
149,9999 г	150,000 9 г	0,001 0 г
220,0001 г	220,001 4 г	0,001 3 г

Вариант 2: плотность воздуха ρ_{as} неизвестна во время юстировки, и плотность воздуха ρ_{acal} во время калибровки рассчитана по упрощенной формуле CIPM (A1.1-1)

Измеренные значения, использованные для расчета:

Атмосферное давление p : 990 гПа

Относительная влажность RH : 50 %RH

Температура t : 21 °C

Плотность воздуха ρ_{acal} : 1,173 кг/м³

Рассчитанная поправка на выталкивающую силу δm определяется формулой (4.2.4-4).

Числовое значение, использованное для расчёта:

Плотность гири ρ_{cal} : (7950 ± 70) кг/м³

Поправка на выталкивающую силу δm_B : $2,138 \times 10^{-8} m_{\text{ref}}$

Рассчитанная поправка на выталкивающую силу δm_B для m_{ref} нагрузки L по формуле (4.2.4-4) пренебрежимо мала, так как относительное разрешение весов имеет порядок 10^{-6} , что намного больше поправки на выталкивающую силу. Поэтому приведённые в таблице выше (вариант 1) значения актуальны и для данного варианта.

Н1.3/А Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия, общие для обоих вариантов:

- Неопределенность для начального (нулевого) показания обусловлена только ценой деления d_0 и повторяемостью s .
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1- 10).
- Условное значение массы испытательных гирь (класс точности E_2) учитывается в результатах калибровки. Поэтому $u(\delta m_c) = U/k$ рассчитывается по формуле (7.1.2-2).
- Изменение массы гирь контролируется статистически и коэффициент k_D в формуле (7.1.2-10) выбран равным 1,25.
- Степени свободы для расчета коэффициента охвата k получены согласно приложению В3 и таблице G.2 из [1]. В случае данного примера влияние неопределенности результатов испытания на повторяемость с 5 измерениями значительное.
- Сведения об относительной неопределенности $U_{rel}(E)=U(E)/L$ не обязательны, но помогают продемонстрировать характеристики неопределенностей.

Бюджет неопределенности для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы не юстируются непосредственно перед калибровкой. Применяется процедура согласно варианту 1, без информации о плотности воздуха. Поэтому для вычисления неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5d). В качестве альтернативы в таблице использовалась формула (7.1.2-5e), таким образом, предполагается, что изменение температуры в процессе работы с весами составляет 5 К.

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка m_{ref} , г	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Показание I , г	0,000 0	50,000 4	100,000 6	150,000 9	220,001 4	
Погрешность показания E , г	0,000 0	0,000 4	0,000 7	0,001 0	0,001 3	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{rep})$, г	0,000 114					7.1.1-5
Разрешение $u(\delta k_{digo})$, г	0,000 029					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta k_{digL})$, г	0,000 000	0,000 029				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{ecc})$, г	0,000 000	0,000 029	0,000 058	0,000 087	0,000 127	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, г	0,000 118	0,000 124	0,000 134	0,000 149	0,000 175	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_c , г	0,000 0	50,000 0	99,999 9	99,999 9 50,000 0	200,000 1 20,000 0	
Условная масса $u(\delta m_c)$, г	0,000 000	0,000 015	0,000 025	0,000 040	0,000 062	7.1.2-2
Дрейф $u(\delta m_D)$, г	0,000 000	0,000 022	0,000 036	0,000 058	0,000 089	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000 000	0,000 447	0,000 889	0,001 330	0,001 960	7.1.2-5d/ Таблица E2.1
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (гири акклиматизированы).					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000 000	0,000 448	0,000 890	0,001 332	0,001 963	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	0,000 118	0,000 465	0,000 900	0,001 340	0,001 971	7.1.3-1a
v_{eff} (степени свободы)	4	1104	15538	76345	357098	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,87	2,00	2,00	2,00	2,00	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	0,000 34	0,000 93	0,001 80	0,002 68	0,003 94	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,001 86	0,001 80	0,001 79	0,001 79	
<i>Альтернатива: Неопределенность, обусловленная выталкивающей силой, вычисляется по формуле (7.1.2-5e) вместо (7.1.2-5d), т.е. заменяется приближение для наихудшего случая значением, полученным из оценки при изменении температуры в помещении на 5 K во время работы с весами.</i>						
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000 000	0,000 103	0,000 201	0,000 304	0,000 446	7.1.2-5e
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000 000	0,000 107	0,000 205	0,000 312	0,000 459	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	0,000 118	0,000 164	0,000 245	0,000 346	0,000 491	7.1.3-1a
v_{eff} (степени свободы)	4	17	85	338	1377	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,87	2,16	2,03	2,01	2,00	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	0,000 34	0,000 35	0,000 50	0,000 69	0,000 98	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,000 70	0,000 50	0,000 46	0,000 45	

На данном примере видно, что неопределенность опорного значения массы значительно снижается, если вклад в неопределенность от выталкивающей силы учитывается на основании оценки изменений температуры в помещении

во время работы с весами по сравнению с использованием более консервативного подхода (7.1.2-5d).

Допускается указывать в сертификате только наибольшее значение расширенной неопределенности для всех погрешностей, данных в отчете: $U(E)=0,00394$ г (или альтернативно **0,00098** г) исходя из $k = 2,00$ вместе с формулировкой о вероятности охвата не меньше 95 %.

В сертификате должно быть приведено уведомление для пользователя о том, что указанная в нем расширенная неопределенность применима только, когда учитывается погрешность (E).

Бюджет неопределенности для варианта 2 (с внесением поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы не юстируются непосредственно перед калибровкой. Применяется процедура согласно варианту 2, с учетом определения плотности воздуха и поправки на выталкивающую силу воздуха. Поэтому для неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5a).

Выше было показано для варианта 2, что поправка на выталкивающую силу δm_B пренебрежимо мала, так как меньше относительного разрешения весов, но результат ее расчёта, тем не менее, приведен в следующей таблице. В данном случае неопределенность поправки на выталкивающую силу $u(\delta m_B)$ рассчитывается по формуле (7.1.2-5a). Следует обратить внимание на то, что плотность воздуха во время юстировки (которая происходит независимо от калибровки) неизвестна, поэтому изменение плотности воздуха во времени принимается в качестве оценки для неопределенности. Следовательно, неопределенность плотности воздуха рассчитывается исходя из возможных изменений давления, температуры и влажности, которые могут наблюдаться в месте установки весов.

В приложении A3 приведены рекомендации по оценке неопределенности плотности воздуха. В данном примере используется аппроксимация неопределенности на основе (A3-2) вместо общего уравнения (A3-1), т.е. с температурой, являющейся свободным параметром.

При изменении температуры на 5 К расчёт по формуле аппроксимации (A3-2) дает относительную неопределенность $u(\rho_a)/\rho_a = 1,18 \times 10^{-2}$, что для плотности воздуха при калибровке $\rho_a = 1,173$ кг/м³ дает неопределенность $u(\rho_a) = 0,014$ кг/м³. Такой же результат можно получить, используя точную формулу неопределенности плотности воздуха (A3-1).

Для расчета относительной неопределенности поправки на выталкивающую силу по формуле (7.1.2-5a) взяты следующие числовые значения:

Плотность воздуха ρ_{aCal} : $(1,173 \pm 0,014)$ кг/м³

Плотность гирь ρ_{Cal} : (7950 ± 70) кг/м³

Формула (7.1.2-5a) дает относительную неопределенность поправки на выталкивающую силу $u_{rel}(\delta m_B) = 3,203 \times 10^{-8}$.

Относительная неопределенность поправки на выталкивающую силу пренебрежимо мала по сравнению с другими факторами, влияющими на неопределенность опорного значения массы, но результат ее расчета, тем не менее, приведен в следующей таблице.

Данный пример показывает, что вычисленные значения поправки к погрешности δm_B и относительной неопределенности поправки на выталкивающую силу $u(\delta m_B)$ пренебрежимо малы, что позволяет записать бюджет неопределенности по-другому.

Показана неопределенность влияний конвекции вследствие неаκκлиматизированных гирь $u(\delta m_{\text{conv}})$ для разности температур 2 К. Остальные составляющие неопределенности такие же, как в приведенной выше таблице, и поэтому в следующей таблице не приводятся.

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка m_{ref} , г	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Поправка δm_B , г	0,000 0	0,000 001	0,000 002	0,000 003	0,000 005	4.2.4.3
Показание I , г	0,000 0	50,000 4	100,000 6	150,000 9	220,001 4	
Погрешность показания E , г	0,000 0	0,000 4	0,000 7	0,001 0	0,001 3	7.1-1
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000 0	0,00000 2	0,000 003	0,000 005	0,000 007	7.1.2-5a
Конвекция $u(\delta m_{\text{conv}})$, г	0,000 0	0,000 029	0,000 046	0,000 075	0,000 092	7.1.2-13 / Таблица F2.1
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{\text{ref}})$, г	0,000 0	0,000 039	0,000 064	0,000 103	0,000 143	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	0,000 118	0,000 130	0,000 149	0,000 181	0,000 226	7.1.3-1a
ν_{eff} (степени свободы)	4	6	11	25	62	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,87	2,52	2,25	2,11	2,05	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	0,000 34	0,000 33	0,000 33	0,000 38	0,000 46	7.3-1
$U_{\text{rel}}(E)/\%$	-----	0,000 66	0,000 33	0,000 25	0,000 21	

Из примера видно, что вклад выталкивающей силы в стандартную неопределенность значителен, если выбран наиболее консервативный подход по формуле (7.1.2-5d).

Если информация об изменениях температуры во время работы с весами доступна и неопределенность поправки выталкивающей силы воздуха рассчитывается по формуле (7.1.2-5e), то разность неопределенностей погрешности менее значительна.

Н1.4/А Неопределенность результата взвешивания (для варианта 1)

Как записано в 7.4, нижеприведенную информацию можно получить силами калибровочной лаборатории или от пользователя весов. Эти результаты не следует представлять в виде части сертификата калибровки, за исключением аппроксимированной погрешности показания и неопределенности аппроксимированной погрешности, которые могут составлять его часть. Обычно информацию о неопределенности результата взвешивания представляют в виде приложения к сертификату калибровки или иначе, если ее содержание четко отделено от результатов калибровки.

Обычные условия применения весов, как принято, или как указано пользователем, могут включать:

- Встроенное устройство юстировки доступно и работает ($\Delta T \geq 3$ К). Изменение температуры в помещении $\Delta T = 5$ К.
- Функция тарирования используется.
- Нагрузки не всегда накладываются точно в центр.

Неопределенность результата взвешивания получают, используя линейную аппроксимацию погрешности показания в соответствии с (C2.2-16).

Неопределенность результата взвешивания представлена только для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показания). Аппроксимированная погрешность показания по (C2.2-16) и неопределенность аппроксимированной погрешности показания согласно (C2.2-16d) у двух вариантов незначительно отличаются, так как лежащие в основе весовые коэффициенты $p_j = 1/u^2(E_j)$ отличаются на несколько миллионных долей и погрешности показания одинаковы для обоих вариантов (поправка на выталкивающую силу меньше разрешения весов).

Обозначения R и W вводятся для того, чтобы отличать показания весов во время взвешиваний от показания /во время калибровки.

R : показание при взвешивании нагрузки на калиброванных весах, получаемое после калибровки.

W : Результат взвешивания

Следует обратить внимание на то, что в следующей таблице показание R и все результаты приведены в граммах.

[В таблице в формулах неопределённости результата взвешивания «g²» и «g» - единицы измерения массы «г²» и «г», соответственно - прим. перев.]

Величина или влияние	Показание, результат взвешивания и погрешность, г Неопределенность в граммах или в виде относительного значения	Формула
Погрешность показания $E_{\text{appr}}(R)$ для показаний брутто и нетто: Аппроксимация прямой линией через нуль	$E_{\text{appr}}(R) = 6,709 \times 10^6 R$	C2.2-16
Неопределенность аппроксимированной погрешности показания		
Стандартная неопределенность погрешности $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 4,501 \times 10^{11} u^2(R) + 1,543 \times 10^{12} R^2$	C2.2-16d
Стандартная неопределенность погрешности, пренебрегая смещением	$u(E_{\text{appr}}) = 1,242 \times 10^6 R$	
Неопределенности, обусловленные влияниями окружающей среды		
Температурный дрейф чувствительности	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,299 \times 10^{-6}$	7.4.3-1
Выталкивающая сила	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = 1,636 \times 10^{-6}$	7.4.3-4
Изменение характеристик вследствие дрейфа	Не имеет значения в этом случае (встроенная юстировка задействована и дрейф между калибровками пренебрежимо мал).	7.4.3-5
Неопределенности, связанные с функционированием весов		
Работа устройства тарирования	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{tare}}) = 1,072 \times 10^{-6}$	7.4.4 7.4.4-5
Ползучесть и гистерезис (время под нагрузкой)	Не имеет значения в этом случае (непродолжительное время под нагрузкой).	7.4.4-9a/b
Нецентральное нагружение	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,155 \times 10^{-6}$	7.4.4-10
Неопределенность результата взвешивания		
Стандартная неопределенность, поправки для внесения в показания $u(E_{\text{appr}})$	$u(W) = \sqrt{(1,467 \times 10^8 g^2 + 8,390 \times 10^{12} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Расширенная неопределенность, поправки для внесения в показания $u(E_{\text{appr}})$	$U(W) = 2\sqrt{(1,467 \times 10^8 g^2 + 8,390 \times 10^{12} R^2)}$	7.5.1-2b
Упрощение до первого порядка	$U(W) \approx 2,422 \times 10^4 g + 4,796 \times 10^6 R$	7.5.2-3d
Общая неопределенность результата взвешивания без коррекции показаний		
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) + E_{\text{appr}}(R) $	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,422 \times 10^4 g + 1,150 \times 10^6 R$	7.5.2-3a 7.5.2-3e

Проверка условия в отношении наблюдаемого значения χ^2 согласно формуле (C2.2-2a) дала положительный результат. Первая линейная регрессия учитывает весовые коэффициенты p'_j , уравнение (C2.2-18b).

Исходя из общей неопределенности, значение минимальной нагрузки для весов можно определить в соответствии с приложением G.

Пример:

Заданное значение допуска при взвешивании (относительная погрешность): 1 %

Коэффициент запаса: 3

Минимальная нагрузка согласно формуле (G-9) и вышеприведенному уравнению для общей неопределенности составляет 0,0729 г; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто большее, чем 0,0729 г, для обеспечения относительной общей неопределенности измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 3 (равноценно допуску 0,33%).

Вторая ситуация: Юстировка чувствительности выполняется непосредственно перед калибровкой

H1.1/В Условия, при которых выполняется калибровка

Прибор	Электронные весы, описание и идентификация
Максимальная нагрузка <i>L</i> / цена деления шкалы <i>d</i>	220 г / 0,000 1 г
Температурный коэффициент	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (из руководства изготовителя); необходим единственно для расчета неопределенности результата взвешивания.
Встроенное юстировочное устройство	Работает автоматически: после включения весов, и при $\Delta T \geq 3$ К. Необходимо единственно для расчета неопределенности результата взвешивания. Состояние: активно.
Юстировка исполнителем калибровки	Юстировка непосредственно перед калибровкой (встроенные юстировочные гири).
Температура во время калибровки	21 °С в начале калибровки.
Атмосферное давление и влажность (необязательные параметры)	990 гПа, RH 50 %.
Условия в помещении	Максимальное изменение температуры 5 К (лабораторное помещение без окон). Не имеет значения, если задействовано встроенное юстировочное устройство ($\Delta T \geq 3$ К). В данном случае максимальное изменение температуры для оценки неопределенности результата взвешивания равно 3 К.
Испытательные нагрузки/ акклиматизация	Гири, класс точности E_2 , акклиматизированные к температуре помещения (учтена альтернативная разность температур 2 К относительно температуры помещения).

Н1.2/В Испытания и результаты

Вариант 1: Плотности воздуха неизвестны во время юстировки и калибровки (т.е. без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Испытания на повторяемость и нецентральное нагружение не выполнялись, учитывались результаты первой калибровки. Это можно сделать, так как выполнялась только юстировка весов и можно убедиться в отсутствии её влияния на повторяемость и погрешности при нецентральном нагружении. Плотность воздуха не рассчитывается.

Погрешности показания Требования приведены в главе 5.2, гири распределены достаточно равномерно во всём диапазоне взвешивания	Испытательные нагрузки прикладываются однократно; отдельные нагружения выполняются только в сторону увеличения нагрузки, показание ненагруженных весов устанавливают при необходимости на нуль. Показания записывают:	
Нагрузка m_{ref}	Показание I	Погрешность показания E
0,000 0 г	0,000 0 г	0,000 0 г
50,000 0 г	50,000 0 г	0,000 0 г
99,999 9 г	99,999 8 г	- 0,000 1 г
149,999 9 г	149,999 9 г	0,000 0 г
220,000 1 г	220,000 0 г	- 0,000 1 г

Вариант 2: Плотность воздуха ρ_{as} во время юстировки и плотность воздуха ρ_{aCal} во время калибровки одинаковые, так как юстировка выполнена непосредственно перед калибровкой.

Плотность воздуха рассчитывают в соответствии с упрощенной формулой CIPM (A1.1-1):

Измеренные значения, использованные для расчета:

Атмосферное давление p : 990 гПа

Относительная влажность RH : 50 %

Температура t : 21 °C

Плотность ρ_s и ρ_{Cal} : (7950 $\pm$ 70) кг/м³

Плотность воздуха ρ_{aCal} : 1,173 кг/м³

Вычисляют поправку на выталкивающую силу δm_B по формуле (4.2.4-4).

Числовое значение, использованное для расчета:

Плотность гирь ρ_{cal} : (7950 $\pm$ 70) кг/м³

Поправка на выталкивающую силу $2,138 \times 10^{-8} m_{ref}$

δm_B :

Рассчитанная по формуле (4.2.4-4) поправка на выталкивающую силу δm для m_{ref} нагрузки L пренебрежимо мала, так как относительное разрешение весов имеет порядок 10^{-6} , что значительно превышает поправку на выталкивающую силу. Поэтому значения, приведённые в таблице выше, актуальны и для данного варианта.

Н1.3/В Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия:

- Неопределенность для начального (нулевого) показания обусловлена только ценой деления d_0 и повторяемостью s .
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1- 10).

- Условная масса испытательных гирь (класс точности E_2) учитывается в результатах калибровки. Поэтому $u(\delta m_c) = U/k$ рассчитывается по формуле 7.1.2-2.
- Изменение массы гирь (дрейф) контролируется статистически и коэффициент k_D в формуле (7.1.2-10) выбран равным 1,25.
- Степени свободы для расчета коэффициента охвата k получены согласно приложению В3 и таблице G.2 из [1]. В приведённом примере влияние неопределенности результатов испытания на повторяемость с 5 измерениями значительное.
- Сведения об относительной неопределенности $U_{rel}(E)=U(E)/m_{ref}$ не обязательны, но помогают продемонстрировать характеристики неопределенностей.

Бюджет неопределенности для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы юстируют непосредственно перед калибровкой и отсутствует информация о плотности воздуха во время калибровки. Поэтому для вычисления неопределённости применяется формула (7.1.2-5с).

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка m_{ref} , г	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Показание I , г	0,000 0	50,000 0	99,999 8	149,999 9	220,000 0	
Погрешность показания E , г	0,000 0	0,000 0	-0,000 1	0,000 0	-0,000 1	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{rep})$, г	0,000 114					7.1.1-5
Разрешение $u(\delta I_{dig0})$, г	0,000 029					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta I_{digL})$, г	0,000 0	0,000 029				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{ecc})$, г	0,000 0	0,000 029	0,000 058	0,000 087	0,000 127	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, г	0,000 118	0,000 124	0,000 134	0,000 149	0,000 175	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_c , г	0,000 0	50,000 0	99,999 9	99,999 9 50,000 0	200,000 1 20,000 0	
Условная масса $u(\delta m_c)$, г	0,000 0	0,000 015	0,000 025	0,000 040	0,000 063	7.1.2-2
Дрейф $u(\delta m_D)$, г	0,000 0	0,000 022	0,000 036	0,000 058	0,000 090	7.1.2-10
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000 000	0,000 014	0,000 022	0,000 036	0,000 055	7.1.2-5с / ТаблицаЕ 2.1
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (гири акклиматизированы).					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000 00	0,000 03	0,000 049	0,000 079	0,000 123	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	0,000 118	0,000 128	0,000 143	0,000 169	0,000 214	7.1.3-1a
v_{eff} (степени свободы)	4	6	9	19	49	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,87	2,52	2,32	2,14	2,06	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	0,000 34	0,000 32	0,000 33	0,000 36	0,000 44	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,000 64	0,000 33	0,000 24	0,000 20	

Допускается указывать в сертификате только наибольшее значение расширенной неопределенности для всех погрешностей, приведённых в отчете: **$U(E) = 0,000 44$ г**, при коэффициенте охвата **$k = 2,06$** и вероятности охвата не меньше 95 %. В сертификате должно быть приведено уведомление для пользователя о том, что расширенная неопределённость, указанная в сертификате, применима только если учтена погрешность (E).

Бюджет неопределенности для варианта 2 (с внесением поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы юстируют непосредственно перед калибровкой. Применяется процедура согласно варианту 2, с учетом определения плотности воздуха и поправки на выталкивающую силу воздуха. Поэтому для неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5а).

Так как юстировка выполняется непосредственно перед калибровкой, то возможные в месте установки весов максимальные изменения давления, температуры и влажности не обязательно учитывать, в отличие от случая с выполнением юстировки независимо от калибровки. Единственным составляющим, входящим в стандартную неопределенность плотности воздуха, является неопределенность измерений параметров окружающей среды.

Для расчета относительной неопределенности поправки на выталкивающую силу по формуле (7.1.2-5а) взяты следующие числовые значения:

Плотность воздуха ρ_{aCal} :	1,173 кг/м ³
Плотность гирь ρ_{Cal} :	(7950 ± 70) кг/м ³

Кроме этого, для расчета относительной неопределенности плотности воздуха согласно (А3-1) взяты следующие неопределенности для температуры, давления и влажности:

$$\begin{aligned} u(T) &= 0,2 \text{ К} \\ u(p) &= 50 \text{ Па} \\ u(RH) &= 1 \% \end{aligned}$$

$$\text{Получаем } \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = 9,77 \times 10^{-4}, \text{ и } u(\rho_a) = 0,00115 \text{ кг/м}^3$$

Формула (7.1.2-5а) дает относительную неопределенность поправки на выталкивающую силу $u(\delta m_B) = 3,014 \times 10^{-8}$.

Как альтернатива, показана дополнительная неопределенность $u(\delta m_{conv})$, обусловленная конвекцией из-за отличия температуры гирь от температуры помещения на величину 2 К.

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределённость, г					Формула
Нагрузка m_{ref} , г	0,000 0	50,000 0	99,999 9	149,999 9	220,000 1	
Поправка δm_B , г	0,000 0	0,000 001	0,000 002	0,000 003	0,000 005	4.2.4-4
Показание I , г	0,000 0	50,000 0	99,999 8	149,999 9	220,000 0	
Погрешность показания E , г	0,000 0	0,000 0	-0,000 1	0,000 0	-0,000 1	
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000 0	0,000 001 5	0,000 003 0	0,000 004 5	0,000 006 6	7.1.2-5a
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (гири акклиматизированы).					
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000 000	0,000 026	0,000 044	0,000 066	0,000 110	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	0,000 118	0,000 127	0,000 141	0,000 163	0,000 207	7.1.3-1a
ν_{eff} (степени свободы)	4	6	9	16	43	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,87	2,52	2,32	2,17	2,06	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	0,000 34	0,000 32	0,000 33	0,000 35	0,000 43	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,000 64	0,000 33	0,000 23	0,000 20	
Как альтернатива показана дополнительная неопределенность из-за влияния конвекции вследствие неакклиматизированных гирь $u(\delta m_{conv})$ для разности температур 2 К.						
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	0,000 000	0,000 029	0,000 046	0,000 075	0,000 092	7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000 000	0,000 031	0,000 051	0,000 079	0,000 122	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	0,000 118	0,000 128	0,000 144	0,000 168	0,000 214	7.1.3-1a
ν_{eff} (степени свободы)	4	6	10	19	49	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,87	2,52	2,28	2,14	2,06	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	0,000 34	0,000 32	0,000 33	0,000 36	0,000 44	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,000 64	0,000 33	0,000 24	0,000 20	

Расширенные неопределенности погрешности для вариантов 1 и 2 почти одинаковы, так как неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$ очень мала по сравнению с неопределенностью показания $u(I)$. В данном примере определение давления и влажности на месте калибровки весов с целью расчёта поправки на выталкивающую силу воздуха и минимизации составляющей неопределённости, обусловленной выталкивающей силой, не даёт значительного улучшения результатов калибровки.

Н1.4/В Неопределенность результата взвешивания (для варианта 1)

Как указано в 7.4, следующую информацию можно получить силами калибровочной лаборатории или от пользователя весов. Результаты не следует представлять в виде части сертификата калибровки, за исключением аппроксимированной погрешности показания и неопределенности аппроксимированной погрешности, которые могут составлять его часть. Обычно информацию о неопределенности результата взвешивания представляют в виде приложения к сертификату калибровки или иначе, если ее содержание чётко отделено от результатов калибровки.

Обычные условия применения весов, как принято, или как указано пользователем, могут включать:

- Встроенное устройство юстировки доступно и работает ($\Delta T \geq 3 \text{ K}$).
- Изменение температуры в помещении $\Delta T = 5 \text{ K}$.
- Функция тарирования используется.
- Нагрузки не всегда накладываются точно в центр.

Неопределенность результата взвешивания получают, используя линейную аппроксимацию погрешности показания в соответствии с (C2.2-16).

Неопределенность результата взвешивания представлена только для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показания). Аппроксимированная погрешность показания по (C2.2-16) и неопределенность аппроксимированной погрешности показания согласно (C2.2-16d) у двух вариантов незначительно отличаются, так как лежащие в основе весовые коэффициенты $p_j = 1/u^2(E_j)$ отличаются на несколько миллионных долей и погрешности показания одинаковы для обоих вариантов (поправка на выталкивающую силу меньше разрешения весов).

Обозначения R и W вводятся для того, чтобы отличать показания весов во время взвешиваний от показания /во время калибровки.

- R : показание при взвешивании нагрузки на калиброванных весах, получаемое после калибровки.
 W : Результат взвешивания

Следует обратить внимание на то, что в следующей таблице показание R и все результаты приведены в граммах.

[В таблице в формулах неопределённостей результата взвешивания « g^{-2} » и « g » - единицы измерения массы « g^2 » и « g », соответственно - прим. перев.]

Величина или влияние	Показание, результат взвешивания и погрешность, г Неопределенность в граммах или в виде относительного значения	Формула
Погрешность показания $E_{\text{appr}}(R)$ для показаний брутто и нетто: Аппроксимация прямой линией через нуль	$E_{\text{appr}}(R) = -3,895 \times 10^{-6} R$	C2.2-16
Неопределенность аппроксимированной погрешности показания		
Стандартная неопределенность погрешности $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 1,517 \times 10^{-3} u^2(R) + 4,015 \times 10^{-3} R^2$ ¹⁰	C2.2-16d
Стандартная неопределенность погрешности, пренебрегая смещением	$u(E_{\text{appr}}) = 6,337 \times 10^{-6} R$	
Неопределенности, обусловленные влиянием окружающей среды		
Температурный дрейф чувствительности	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,299 \times 10^{-6}$	7.4.3-1
Выталкивающая сила	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{buoy}}) = 1,636 \times 10^{-6}$	7.4.3-4
Изменение характеристик вследствие дрейфа	Не имеет значения в этом случае (работает встроенное устройство юстировки и дрейф между калибровками пренебрежимо мал).	7.4.3-5
Неопределенности, обусловленные эксплуатацией весов		
Работа устройства тарирования	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{tare}}) = 5,774 \times 10^{-7}$	7.4.4-5
Ползучесть и гистерезис (время под нагрузкой)	Не имеет значения в этом случае (непродолжительное время под нагрузкой)	7.4.4-9a/b
Нецентральное нагружение	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,154 \times 10^{-6}$	7.4.4-10
Неопределенность результата взвешивания		
Стандартная неопределенность, поправки в показания $u(E_{\text{appr}})$ должны учитываться	$u(W) = \sqrt{(1,466 \times 10^{-6} g^2 + 6,433 \times 10^{-2} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Расширенная неопределенность, поправки в показания $u(E_{\text{appr}})$ должны учитываться	$U(W) = 2\sqrt{(1,466 \times 10^{-6} g^2 + 6,433 \times 10^{-2} R^2)}$	7.5.1-2b
Упрощение до первого порядка	$U(W) \approx 2,422 \times 10^{-4} g + 4,090 \times 10^{-6} R$	7.5.2-3d
Общая неопределенность результата взвешивания без коррекции показаний		
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) + E_{\text{appr}}(R) $	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,422 \times 10^{-4} g + 4,479 \times 10^{-6} R$	7.5.2-3a

Проверка условия в отношении наблюдаемого значения χ^2 согласно формуле (C2.2-2a) дала положительный результат. Первая линейная регрессия учитывает весовые коэффициенты p'_j , уравнение (C2.2-18b).

¹⁰ Первый член пренебрежимо мал, так как неопределенность показания $u(R)$ имеет порядок нескольких миллиграмм. Так, первый член имеет порядок 10^{-11} мг^2 , а второй член представляет значения до 10^{-7} мг^2 .

РМГ _____ 20 _____ г

Исходя из общей неопределенности, значение минимальной нагрузки для весов можно определить в соответствии с приложением G.

Пример:

Требование к допуску при взвешивании: 1 %

Коэффициент запаса: 3

Минимальная нагрузка согласно формуле (G-9) и вышеприведенному уравнению для общей неопределенности составляет 0,0727 г; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто большее, чем 0,0727 г, для обеспечения относительной общей неопределенности измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 3 (равноценно допуску 0,33%).

H2 Весы на 60 кг, многоинтервальные

Предварительное замечание:

Будет рассмотрена калибровка многоинтервальных весов с ценой деления шкалы 2 г / 5 г / 10 г. Данный пример показывает полную стандартную процедуру представления результатов измерений и соответствующих неопределенностей, выполняемую большинством лабораторий. Альтернативный метод с учётом влияния выталкивающей силы воздуха представлен в виде варианта 2 (набран курсивом).

Первая ситуация: юстировка чувствительности выполняется независимо от калибровки

H2.1/A Условия, при которых выполняется калибровка

Прибор	Электронные весы неавтоматического действия, описание и идентификация
Максимальные нагрузки интервалов взвешивания $M_{\max}$ / цена деления шкалы d	12 000 г / 2 г 30 000 г / 5 г 60 000 г / 10 г
Чувствительность весов к изменению температуры	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (из руководства изготовителя); необходим единственно для расчета неопределенности результата взвешивания.
Встроенное юстировочное устройство	Работает автоматически после включения весов и при $\Delta T \geq 3$ К; необходимо единственно для расчета неопределенности результата взвешивания. Состояние: активно.
Юстировка исполнителем калибровки	Без юстировки непосредственно перед калибровкой.
Температура во время калибровки	21 °С в начале калибровки. 23 °С в конце калибровки.
<i>Атмосферное давление и влажность (необязательные параметры)</i>	990 гПа, RH 50 %.
Условия в помещении	Максимальное изменение температуры при работе на весах 10 К (лабораторное помещение с окнами). Если используется для расчёта неопределенности выталкивающей силы согласно формуле 7.1.2-5е, ее следует представить в сертификате калибровки. Не имеет значения для неопределенности результата взвешивания, если работает встроенное устройство юстировки ($\Delta T \geq 3$ К). В этом случае максимальное изменение температуры для оценки неопределенности результата взвешивания равно 3 К.
Испытательные нагрузки/ акклиматизация	Гири, класс точности F₂, акклиматизированные к температуре помещения.

Н2.2/А Испытания и результаты

Повторяемость	Испытательная нагрузка 10 000 г	Испытательная нагрузка 25 000 г
Требования приведены в главе 5.1	приложена 5 раз (Среднее квадратическое отклонение в интервале 1 принято постоянным)	приложена 5 раз (Среднее квадратическое отклонение в интервалах 2 и 3 принято постоянным)
Показания ненагруженных весов при необходимости устанавливают на нуль	9 998 г	24 995 г
	10 000 г	25 000 г
	9 998 г	24 995 г
	10 000 г	24 995 г
	10 000 г	25 000 г
Испытание на повторяемость выполнено в интервалах 1 и 2		
Среднее квадратическое отклонение	s = 1,095 г	s = 2,739 г

Нецентральное нагружение	Расположение нагрузки	Испытательная нагрузка 20 000 г
Требования приведены в главе 5.3 Перед нагружением показание устанавливают на нуль; сначала нагрузку помещают в центр грузоприёмного устройства, а затем в другие положения	Центр	19 995 г
	Спереди слева	19 995 г
	Сзади слева	19 995 г
	Сзади справа	19 990 г
	Спереди справа	19 990 г
Максимальное отклонение	$ \Delta I_{\text{ecc}} _{\text{max}}$	5 г

Погрешности показаний

Общие предварительные условия:

Требования приведены в главе 5.2, гири распределены в диапазоне взвешивания достаточно равномерно.

Испытательные нагрузки прикладывают однократно; отдельные нагружения выполняют только в сторону увеличения нагрузки, показание ненагруженных весов устанавливают при необходимости на нуль.

Вариант 1: Плотность воздуха неизвестна во время юстировки и калибровки (т.е. без внесения поправки на выталкивающую силу воздуха в значения погрешности показаний)

Требования приведены в главе 5.2, гири распределены равномерно по всему диапазону взвешивания Испытательные нагрузки прикладывают однократно; отдельные нагружения выполняют только в сторону увеличения нагрузки, показание ненагруженных весов устанавливают при необходимости на нуль.	Нагрузка m_{ref} (m_N)	Показание I	Погрешность показания E
	0 г	0 г	0 г
	10 000 г	10 000 г	0 г
	20 000 г	19 995 г	-5 г
	40 000 г	39 990 г	-10 г
	60 000 г	59 990 г	-10 г

Вариант 2: Плотность воздуха ρ_{as} во время юстировки неизвестна, и плотность воздуха ρ_{aCal} во время калибровки рассчитывают по упрощенной формуле CIPM (A1.1-1)

Измеренные значения, использованные для расчета:

Атмосферное давление p : 990 гПа

Относительная влажность RH : 50 %

Температура t : 21 °C

Плотность воздуха ρ_{aCal} : 1,173 кг/м³

Вычисляется поправка на выталкивающую силу δm_B по формуле (4.2.4-4).

Числовое значение, использованное для расчета:

Плотность гирь ρ_{cal} : (7950 ± 70) кг/м³

Поправка на выталкивающую силу δm_B : 2,138 × 10⁻⁸ m_N

Рассчитанная по формуле (4.2.4-4) поправка δm_B для нагрузок массой m_N пренебрежимо мала, так как относительное разрешение весов имеет порядок 10⁻⁴ что намного больше поправки на выталкивающую силу. Поэтому приведённые в таблице выше значения актуальны.

Н2.3/А Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия, общие для обоих вариантов:

- Неопределенность погрешности при нуле включает только неопределенность показания ненагруженных весов (цена деления шкалы $d_0 = d_1 = 2$ г) и повторяемость s . Неопределенность показания нагруженных весов при нулевой нагрузке не учитывается.
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1- 10).
- Погрешность показания получают, используя номинальное значение массы гири в качестве опорного значения, поэтому максимальные допускаемые погрешности испытательных гирь учитываются при определении вклада в неопределенность, обусловленного гирями: $u(\delta m_c)$ вычисляют как $u(\delta m_c) = T_{ol}/\sqrt{3}$, следуя формуле (7.1.2-3).
- Средний дрейф массы гирь, по результатам двух калибровок с интервалом в два года, составил $|D| \leq mpe/2$. Поэтому вклад в неопределенность, обусловленный дрейфом массы гирь, был установлен $u(m_D) = mpe/2/\sqrt{3}$, что соответствует коэффициенту k_D , равному 1,5 (для наихудшего сценария $U = mpe / 3$).
- Гири проходят акклиматизацию до температуры окружающей среды с остаточной разностью температур 2 К.
- Степени свободы для расчета коэффициента охвата k получены согласно приложению В3 и таблице G.2 из [1]. В данном примере влияние неопределенности результатов испытания на повторяемость с 5 измерениями значительно.
- Сведения об относительной неопределенности $U_{rel}(E) = U(E)/m_{ref}$ не обязательны, но помогают продемонстрировать характеристики неопределенностей.

Бюджет неопределенности для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы не юстируются непосредственно перед калибровкой. Применяется процедура по варианту 1, без информации о плотности воздуха. Поэтому для неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5d). В качестве альтернативы в таблице использована формула (7.1.2-5e), предполагается, что изменение температуры во время работы составляет 10 К.

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка m_{ref} (m_N), г	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Показание I , г	0	10 000	19 995	39 990	59 990	
Погрешность показания E , г	0	0	- 5	- 10	- 10	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{rep})$, г	1,095		2,739			7.1.1-5
Разрешение $u(\delta I_{dig0})$, г	0,577					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta I_{digL})$, г	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{ecc})$, г	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, г	1,238	1,545	3,464	4,950	5,909	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_N , г	0	10 000	20 000	20 000 20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Гири $u(\delta m_c)$, г	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, г	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000	0,110	0,217	0,433	0,658	7.1.2-5d / Таблица E2.1
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (существенно только для гирь класса точности F ₁ и более точных).					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000	0,151	0,290	0,581	0,904	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	1,238	1,552	3,476	4,984	5,978	7.1.3-1a
v_{eff} (степени свободы)	6	16	10	43	90	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,52	2,17	2,28	2,06	2,05	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	3,120	3,369	7,926	10,266	12,254	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,0337	0,0396	0,0257	0,0204	
Альтернатива: Неопределенность, обусловленная выталкивающей силой, вычисляется по формуле (7.1.2-5e) вместо (7.1.2-5d), т.е. приближение для наихудшего случая заменяется приближением, полученным на основе оценки изменения температуры в помещении во время работы на величину 10 К.						
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000	0,046	0,089	0,178	0,276	7.1.2-5e
Неопределенность опорного значения массы $u(\delta m_{ref})$, г	0,000	0,113	0,213	0,462	0,678	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	1,238	1,549	3,471	4,968	5,948	7.1.3-1a
v_{eff} (степени свободы)	6	16	10	43	88	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,52	2,17	2,28	2,06	2,05	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	3,120	3,362	7,913	10,234	12,193	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,0336	0,0396	0,0256	0,0203	

Из примера видно, что неопределенность опорного значения массы значительно снижается, если в расчёте неопределенности от выталкивающей силы учтены изменения температуры в помещении во время работы по сравнению с более консервативным подходом, описываемым формулой (7.1.2-5d). Однако поскольку неопределенность опорного значения массы очень мала в сравнении с неопределенностью показания, стандартная неопределенность погрешности почти не меняется.

Будет приемлемо указать в сертификате только наибольшее значение расширенной неопределенности для всех погрешностей, приведённых в отчете: $U(E) = 12,254$ г, исходя из $k = 2,05$ для принятой вероятности охвата не менее 95 %.

В сертификате должно быть приведено уведомление для пользователя о том, что указанная в нем расширенная неопределенность применима только, если учтена погрешность (E).

Бюджет неопределенности для варианта 2 (с внесением поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы не юстируются непосредственно перед калибровкой. Применяется процедура согласно варианту 2, с учетом определения плотности воздуха и поправки на выталкивающую силу воздуха. Поэтому для неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5а).

Следует обратить внимание на то, что плотность воздуха во время юстировки (которая происходит независимо от калибровки) неизвестна, поэтому изменение плотности воздуха с течением времени принимается в качестве оценки для неопределенности. Следовательно, неопределенность плотности воздуха рассчитывается исходя из возможных изменений давления, температуры и влажности, которые могут наблюдаться в месте установки весов.

В приложении А3 приведены рекомендации по оценке неопределенности плотности воздуха. В данном примере используется аппроксимация неопределенности на основе уравнения (А3-2) вместо общего уравнения (А3-1), т.е. с температурой, являющейся переменным параметром.

Для изменения температуры на величину 10 К вычисления по формуле аппроксимации (А3-2) дают относительную неопределенность $u(\rho_a)/\rho_a = 1,55 \times 10^{-2}$, что при плотности воздуха при калибровке $\rho_a = 1,173 \text{ кг/м}^3$ дают неопределенность $u(\rho_a) = 0,018 \text{ кг/м}^3$

Для расчета относительной неопределенности поправки на выталкивающую силу по формуле (7.1.2-5а) взяты следующие числовые значения:

Плотность воздуха ρ_{aCal} :	$(1,173 \pm 0,018) \text{ кг/м}^3$
Плотность гири ρ_{Cal} :	$(7950 \pm 70) \text{ кг/м}^3$

Формула (7.1.2-5а) дает относительную неопределенность поправки на выталкивающую силу $u_{rel}(\delta m_B) = 3,334 \times 10^{-8}$

Относительная неопределенность поправки на выталкивающую силу воздуха пренебрежимо мала по сравнению с другими составляющими неопределенности опорного значения массы.

Этот пример показывает, что вычисленные поправка для погрешности δm_B и относительная неопределенность поправки на выталкивающую силу $u_{rel}(\delta m_B)$ пренебрежимо малы. Это приводит к обновленному бюджету неопределенности измерений:

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка $m_{ref}(m_N)$, г	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Поправка δm_B , г	0	0	0	0	0	4.2.4-4
Показание I , г	0	10000	19 995	39 990	59 990	
Погрешность показания E , г	0	0	- 5	- 10	- 10	7.1-1
Повторяемость $u(\delta_{rep})$, г	1,095		2,739			7.1.1-5
Разрешение $u(\delta_{dig0})$, г	0,577					7.1.1-2а
Разрешение $u(\delta_{digL})$, г	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3а
Нецентральное нагружение $u(\delta_{ecc})$, г	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, г	1,238	1,545	3,464	4,950	5,909	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_N , г	0	10 000	20 000	20 000 20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Гири $u(\delta m_c)$, г	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Дрейфы (δm_D) , г	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	7.1.2-5а
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (существенно только для гирь класса точности F_1 и более точных).					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000	0,103	0,194	0,387	0,620	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	1,238	1,549	3,470	4,965	5,941	7.1.3-1а
ν_{eff} (степени свободы)	6	15	10	43	88	B3-1
$k(95,45\ %)$	2,52	2,17	2,28	2,06	2,05	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	3,120	3,360	7,910	10,228	12,180	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,0360	0,0396	0,0256	0,0203	

Из этого примера видно, что вклад выталкивающей силы в стандартную неопределенность незначителен. Более того, стандартные неопределенности погрешности вариантов 1 и 2 почти одинаковы, так как неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$ очень мала по сравнению с неопределенностью показания $u(I)$. Определение давления и влажности на месте нахождения весов в дополнение к измерениям температуры для поправки на выталкивающую силу и минимизации соответствующего вклада в неопределенность не дает значительного улучшения результатов калибровки.

Н2.4/А Неопределенность результата взвешивания (для варианта 1)

Как сказано в 7.4, следующую информацию можно получить силами калибровочной лаборатории или пользователя весов. Эти результаты не следует представлять в виде части сертификата калибровки, за исключением аппроксимированной погрешности показания и неопределенности аппроксимированной погрешности, которые могут составлять его часть. Обычно информацию о неопределенности результата взвешивания представляют в виде приложения к

сертификату калибровки или иначе, если ее содержание ясно отделено от результатов калибровки.

Нормальные условия применения весов, принимаемые, или же определяемые пользователем, могут включать:

- Встроенное устройство юстировки доступно и работает ($\Delta T \geq 3$ К);
- Изменение температуры в помещении $\Delta T = 10$ К;
- Функция тарирования используется.
- Нагрузки не всегда накладываются точно в центр.

Неопределенность результата взвешивания получают, используя линейную аппроксимацию погрешности показания в соответствии с (C2.2-16).

Неопределенность результата взвешивания представлена только для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показания). Аппроксимированная погрешность показания по (C2.2-16) и неопределенность аппроксимированной погрешности показания согласно (C2.2-16d) у двух вариантов незначительно отличаются, так как исходные весовые коэффициенты $p_j = 1/u^2(E_j)$ отличаются на несколько миллионных долей и погрешности показания одинаковы для обоих вариантов (поправка на выталкивающую силу меньше, чем разрешение весов).

Выталкивающая сила согласно пункту 7.4.3.2 не учитывается, так как оценка неопределенности при калибровке показала, что это влияние пренебрежимо мало.

Обозначения R и W вводятся для того, чтобы отличать показания весов во время взвешиваний от показания /во время калибровки.

R : показание при взвешивании нагрузки на калиброванных весах, получаемое после калибровки.

W : Результат взвешивания

Следует обратить внимание на то, что в следующей таблице показание R и все результаты приведены в граммах.

[В таблице в формулах неопределённостей результата взвешивания « g^{-2} » и « g » - единицы измерения массы « $г^2$ » и « $г$ », соответственно - прим. перев.]

Величина или влияние	Показание, результат взвешивания и погрешность, г Неопределенность в граммах или в виде относительного значения		Формула
Погрешность показания $E_{\text{appr}}(R)$ для показаний брутто и нетто: аппроксимация прямой линией через нуль	$E_{\text{appr}}(R) = -1,717 \times 10^{-4} R$		C2.2-16
Неопределенность аппроксимированной погрешности показания			
Стандартная неопределенность погрешности $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 2,950 \times 10^{-8} u^2(R) + 4,172 \times 10^{-8} R^2$		C2.2-16d
Стандартная неопределенность погрешности, пренебрегая пересечением	$u(E_{\text{appr}}) = 6,459 \times 10^{-5} R$		
Неопределенности, обусловленные влиянием окружающей среды			
Температурный дрейф чувствительности	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,732 \times 10^{-6}$		7.4.3-1
Выталкивающая сила	Не имеет значения в этом случае.		7.4.3-2
Изменение характеристик вследствие дрейфа	Не имеет значения в этом случае (работает встроенное устройство юстировки и дрейф между калибровками пренебрежимо мал).		7.4.3-5
Неопределенности, обусловленные эксплуатацией весов			
Работа устройства тарирования	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{tare}}) = 1,444 \times 10^{-4}$		7.4.4-5
Ползучесть и гистерезис (время под нагрузкой)	Не имеет значения в этом случае (непродолжительное время под нагрузкой)		7.4.4-9a/b
Нецентральное нагружение	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,443 \times 10^{-4}$		7.4.4-10
Неопределенность результата взвешивания для каждого интервала взвешивания (PWI)			
Стандартная неопределенность, поправки для внесения в показания $u(E_{\text{appr}})$	PWI 1	$u(W) = \sqrt{(1,867g + 4,589 \times 10^{-4} R^2)}$	7.4.5-1b
	PWI 2	$u(W) = \sqrt{(9,917g + 4,589 \times 10^{-4} R^2)}$	
	PWI 3	$u(W) = \sqrt{(16,167g + 4,589 \times 10^{-4} R^2)}$	
Расширенная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	PWI 1	$U(W) = 2\sqrt{(1,867g + 4,589 \times 10^{-4} R^2)}$	7.5.1-2b
	PWI 2	$U(W) = 2\sqrt{(9,917g + 4,589 \times 10^{-4} R^2)}$	
	PWI 3	$U(W) = 2\sqrt{(16,167g + 4,589 \times 10^{-4} R^2)}$	
Упрощение до первого порядка	PWI 1	$U(W) \approx 2,733g + 2,574 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3f
	PWI 2	$U(W) \approx 10,190g + 3,434 \times 10^{-4} (R - 12000g)$	
	PWI 3	$U(W) \approx 20,311g + 3,923 \times 10^{-4} (R - 30000g)$	
Общая неопределенность результата взвешивания без коррекции показаний			
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) + E_{\text{appr}}(R) $	PWI 1	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,733g + 4,291 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3a
	PWI 2	$U_{\text{gl}}(W) \approx 10,190g + 5,151 \times 10^{-4} (R - 12000g)$	
	PWI 3	$U_{\text{gl}}(W) \approx 20,311g + 5,641 \times 10^{-4} (R - 30000g)$	

Проверка условия в отношении наблюдаемого значения χ^2 согласно формуле (C2.2-2a) дала положительный результат. Линейная регрессия выполнена с учетом весовых коэффициентов p_j' уравнения (C2.2-18b).

Исходя из общей неопределенности, значение минимальной нагрузки для весов можно определить в соответствии с приложением G.

Пример:

Заданное значение допуска при взвешивании: 1 %

Коэффициент запаса: 2

Минимальная нагрузка согласно формуле (G-9) и вышеприведенному уравнению для общей неопределенности **в *PWI* 1** составляет 598 г; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто большее, чем 598 г, для обеспечения относительной общей неопределенности измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 2 (равноценно допуску 0,5%).

Вторая ситуация: юстировка чувствительности, выполняемая непосредственно перед калибровкой

H2.1/В Условия, специфичные для калибровки

Прибор	Электронные весы неавтоматического действия, описание и идентификация
Максимальные нагрузки M_{ax_i} интервалов взвешивания / цены деления шкалы d_i	12 000 г / 2 г 30 000 г / 5 г 60 000 г / 10 г
Чувствительность весов к изменениям температуры	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (из руководства изготовителя); необходим единственно для расчета неопределенности результата взвешивания.
Встроенное устройство юстировки	Работает автоматически после включения весов и при $\Delta T \geq 3 K$; необходимо единственно для расчета неопределенности результата взвешивания. Состояние: активно.
Юстировка исполнителем калибровки	Юстировка выполняется непосредственно перед калибровкой (встроенные юстировочные гири).
Температура во время калибровки	23 °C в начале калибровки 24 °C в конце калибровки
Атмосферное давление и влажность (необязательные параметры)	990 гПа, RH 50 %.
Условия в помещении	Максимальное изменение температуры при использовании 10 K (лабораторное помещение без окон). Не имеет значения, если работает встроенное устройство юстировки ($\Delta T \geq 3 K$). В этом случае максимальное изменение температуры для оценки неопределенности результата взвешивания равно 3 K.
Испытательные нагрузки/ акклиматизация	Гири, класс точности F_2 , акклиматизированные к температуре помещения.

Н2.2/В Испытания и результаты

Повторяемость	Испытательная нагрузка 10 000 г	Испытательная нагрузка 25 000 г
Требования приведены в главе 5.1	приложена 5 раз (среднее квадратическое отклонение предполагается постоянным в 1-ом интервале взвешивания)	приложена 5 раз (среднее квадратическое отклонение предполагается постоянным во 2-ом и 3-ем интервалах взвешивания)
Показания ненагруженных весов при необходимости устанавливают на нуль. Испытание на повторяемость выполнено в интервалах 1 и 2	10 000 г	25 000 г
	10 000 г	25 000 г
	9 998 г	25000 г
	10 000 г	24995 г
	10 000 г	25 000 г
Среднее квадратическое отклонение	s = 0,894 г	s = 2,236 г

Нецентральное нагружение	Положение нагрузки	Испытательная нагрузка 20 000 г
Требования приведены в главе 5.3 Перед нагружением показание устанавливают на нуль; нагрузку сначала помещают в центр, затем в другие указанные положения	Центр	20 000 г
	Спереди слева	20 000 г
	Сзади слева	20 000 г
	Сзади справа	20 000 г
	Спереди справа	19 995 г
Максимальное отклонение	$ \Delta I_{\text{сcci}} _{\text{max}}$	5 г

Погрешности показаний

Общие предварительные условия:

Требования приведены в главе 5.2, гири распределены в диапазоне взвешивания достаточно равномерно.

Испытательные нагрузки прикладывают однократно; отдельные нагружения выполняют только в сторону увеличения нагрузки, показание ненагруженных весов устанавливают при необходимости на нуль.

Вариант 1: Плотность воздуха неизвестна во время юстировки / калибровки (т.е. без внесения поправки на выталкивающую силу воздуха в значения погрешности показаний)

Требования приведены в главе 5.2 , гири распределенные достаточно равномерно. Каждую из испытательных нагрузок прикладывают однократно; от-	Нагрузка m_{ref} (m_N)	Показание I	Погрешность показания E
	0 г	0 г	0 г
	10 000 г	10 000 г	0 г
	20 000 г	20 000 г	0 г
	40 000 г	40 000 г	0 г

РМГ _____ 20 _____ г

дельные нагрузки выполняют только в сторону увеличения нагрузки, показание ненагруженных весов устанавливают при необходимости на нуль.	60 000 г	60 000 г	0 г
---	----------	----------	-----

Вариант 2: Плотность воздуха ρ_{as} во время юстировки и плотность воздуха ρ_{aCal} во время калибровки одинаковы, так как юстировка выполнена непосредственно перед калибровкой.

Плотность воздуха рассчитывается по упрощенной формуле CIPM (A1.1-1):

Измеренные значения, используемые для расчета:

Атмосферное давление p : 990 гПа

Относительная влажность RH : 50 %

Температура t : 23 °C

Плотность воздуха ρ_{aCal} : 1,165 кг/м³

Вычисляется поправка на выталкивающую силу δm_B по формуле (4.2.4-4):

Числовое значение, использованное для расчета:

Плотность гири ρ_{cal} : (7950 ± 70) кг/м³

Поправка на выталкивающую силу

δm_B : 2,762 × 10⁻⁸ m_N

Рассчитанная по формуле (4.2.4-4) поправка δm_B для m_N нагрузок пренебрежимо мала, так как относительное разрешение весов имеет порядок 10⁻⁴, что намного больше поправки на выталкивающую силу. Поэтому приведенные в таблице выше значения актуальны и для данного варианта.

Н2.3/В Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия, общие для обоих вариантов:

- Неопределенность погрешности при нуле включает только неопределенность показания ненагруженных весов (цена деления шкалы $d_0 = d_1 = 2$ г) и повторяемость s . Неопределенность показания нагруженных весов при нулевой нагрузке не учитывается.
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1- 10).
- Погрешность показания получают, используя номинальное значение массы гири в качестве опорного значения, поэтому максимальные допускаемые погрешности испытательных гирь учитываются при определении вклада в неопределенность, обусловленного гирями: $u(\delta m_c)$ вычисляют как $u(\delta m_c) = T_{ol}/\sqrt{3}$, следуя формуле (7.1.2-3).
- Средний дрейф массы гирь, по результатам двух калибровок с двухгодовичным интервалом, составил $|D| \leq mpe/2$. Поэтому вклад в неопределенность, обусловленный дрейфом массы гирь, был установлен $u(\delta m_D) = mpe/2\sqrt{3}$. Это соответствует коэффициенту k_B , равному 1,5 (для наихудшего сценария $U = mpe / 3$).
- Гири проходят акклиматизацию до разности температур в 2 К с температурой окружающей среды.
- Степени свободы для расчета коэффициента охвата k получены согласно приложению В3 и таблице G.2 из [1]. В данном примере влияние неопределенности результатов испытания на повторяемость с 5 измерениями значительно.
- Сведения об относительной неопределенности $U_{rel}(E) = U(E)/m_{ref}$ не обязательны, но помогают продемонстрировать характеристики неопределенностей.

Бюджет неопределенности для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы юстируют непосредственно перед калибровкой. Процедура, описанная для варианта 1, выполняется, без информации о плотности воздуха. Поэтому для вычисления неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5с).

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка $m_{ref}(m_N)$, г	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Показание I , г	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Погрешность показания E , г	0	0	0	0	0	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{rep})$, г	0,894		2,236			7.1.1-5
Разрешение $u(\delta I_{dig0})$, г	0,577					7.1.1-2а
Разрешение $u(\delta I_{digL})$, г	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3а
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{ecc})$, г	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, г	1,065	1,410	3,082	4,690	5,694	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_N , г	0	10 000	20 000	20 000 20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Гири $u(\delta m_c)$, г	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, г	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000	0,023	0,043	0,087	0,139	7.1.2-5с
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (существенно для гирь класса точности F ₁ и более точных).					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000	0,106	0,198	0,397	0,635	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	1,065	1,414	3,089	4,707	5,739	7.1.3-1а
ν_{eff} (степени свободы)	8	25	14	78	172	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,37	2,11	2,20	2,05	2,025	[1],
$U(E) = ku(E)$, г	2,523	2,983	6,795	9,650	11,601	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,0298	0,0340	0,0241	0,0193	

Допускается указывать в сертификате только наибольшее значение расширенной неопределенности для всех погрешностей, содержащихся в отчете: $U(E) = 11,601$ г, исходя из $k = 2,025$ и вероятности охвата не меньше 95 %.

В сертификате должно быть приведено уведомление для пользователя о том, что указанная в нем расширенная неопределенность применима только, когда учитывается погрешность (E).

Бюджет неопределенности для варианта 2 (с внесением поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Дополнительное условие:

Весы юстируют непосредственно перед калибровкой. Применяется процедура согласно варианту 2, с учетом определения плотности воздуха и поправки на

выталкивающую силу. Поэтому для вычисления неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5а).

Так как юстировка выполняется непосредственно перед калибровкой, то максимальные значения изменений давления, температуры и влажности, которые можно ожидать в месте установки весов, не обязательно учитывать, в отличие от ситуации, когда юстировка выполняется независимо от калибровки. Единственный фактор вклада в стандартную неопределенность плотности воздуха происходит из неопределенности измерений параметров окружающей среды.

Для расчета относительной неопределенности поправки на выталкивающую силу по формуле (7.1.2-5а) взяты следующие числовые значения:

Плотность воздуха ρ_{aCal} :	1,165 кг/м ³
Плотность гирь ρ_{Cal} :	(7950 ± 70) кг/м ³

Кроме этого для расчета относительной неопределенности плотности воздуха согласно (А3-1) взяты следующие неопределенности для температуры, давления и влажности:

$$\begin{aligned} u(T) &= 0,2 \text{ K} \\ u(p) &= 50 \text{ Па} \\ u(RH) &= 1 \% \end{aligned}$$

$$\text{Это приводит к } \frac{u(\rho_a)}{\rho_a} = 9,77 \times 10^{-4}, \text{ и } u(\rho_a) = 0,00114 \text{ кг/м}^3$$

Формула (7.1.2-5а) дает относительную неопределенность поправки на выталкивающую силу $u_{rel}(\delta m_B) = 3,892 \times 10^{-8}$.

Относительная неопределенность поправки на выталкивающую силу воздуха пренебрежимо мала по сравнению с другими вкладами в неопределенность опорного значения массы.

Этот пример показывает, что вычисленные значения поправки для погрешности δm_B и относительной неопределенности поправки на выталкивающую силу $u_{rel}(\delta m_B)$ пренебрежимо малы. Это приводит к обновленному бюджету неопределенности измерений:

Величина или влияние	Нагрузка, показание и погрешность, г Неопределенность, г					Формула
Нагрузка $m_{ref}(m_N)$, г	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Поправка δm_B , г	0	0	0	0	0	4.2.4-4
Показание I , г	0	10 000	20 000	40 000	60 000	
Погрешность показания E , г	0	0	0	0	0	7.1-1
Повторяемость $u(\delta_{rep})$, г	0,894		2,236			7.1.1-5
Разрешение $u(\delta_{dig0})$, г	0,577					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta_{digL})$, г	0,000	0,577	1,443	2,887	2,887	7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta_{ecc})$, г	0,000	0,722	1,443	2,887	4,330	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, г	1,065	1,410	3,082	4,690	5,694	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_N , г	0	10 000	20 000	20 000 20 000	20 000 20 000 20 000	
Гири $u(\delta m_c)$, г	0,000	0,092	0,173	0,346	0,554	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, г	0,000	0,046	0,087	0,173	0,277	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, г	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	7.1.2-5c
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, г	Не имеет значения в этом случае (существенно для гирь класса точности F_1 и более точных).					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, г	0,000	0,103	0,194	0,387	0,620	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, г	1,065	1,414	3,089	4,706	5,727	7.1.3-1a
ν_{eff} (степени свободы)	8	25	14	78	172	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,37	2,11	2,20	2,05	2,025	[1]
$U(E) = ku(E)$, г	2,523	2,983	6,794	9,648	11,598	7.3-1
$U_{rel}(E)/\%$	----	0,0301	0,0340	0,0241	0,0193	

Расширенные неопределенности погрешности для стандартной процедуры и для данного варианта почти одинаковы, так как неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$ очень мала по сравнению с неопределенностью показания $u(I)$. Из данного примера видно, что измерение давления и влажности на месте нахождения весов с целью определения поправки на выталкивающую силу и минимизации вклада в неопределенность, обусловленного выталкивающей силой, не дает значительного улучшения результатов калибровки.

Н2.4/В Неопределенность результата взвешивания (для варианта 1)

Как сказано в 7.4, следующую информацию можно получить силами калибровочной лаборатории или пользователя весов. Эти результаты не следует представлять в виде части сертификата калибровки, за исключением аппроксимированной погрешности показания и неопределенности аппроксимированной погрешности, которые могут составлять его часть. Обычно информацию о неопределенности результата взвешивания представляют в виде приложения к сертификату калибровки или иначе, если ее содержание четко отделено от результатов калибровки.

Обычные условия использования весов, как принято, или как указано пользователем, могут включать:

- Встроенное устройство юстировки доступно и работает ($\Delta T \geq 3 \text{ K}$)
- Изменение температуры в помещении $\Delta T = 10 \text{ K}$
- Функция тарирования используется.
- Нагрузки не всегда накладываются точно в центр.

Неопределенность результата взвешивания получают, используя линейную аппроксимацию погрешности показания в соответствии с (C2.2-16).

Неопределенность результата взвешивания представлена только для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показания). Аппроксимированная погрешность показания по (C2.2-16) и неопределенность аппроксимированной погрешности показания согласно (C2.2-16d) у двух вариантов незначительно отличаются, так как исходные весовые коэффициенты $p_j = 1/\partial(E_j)$ отличаются на несколько миллионных долей и погрешности показания одинаковы для обоих вариантов (поправка на выталкивающую силу меньше, чем разрешение весов).

Обозначения R и W вводятся для того, чтобы отличать показания весов во время взвешиваний от показания I во время калибровки.

R : показание при взвешивании нагрузки на калиброванных весах, получаемое после калибровки.

W : Результат взвешивания

Следует обратить внимание на то, что в следующей таблице показание R и все результаты приведены в граммах.

[В таблице в формулах неопределённостей результата взвешивания « g^{-2} » и « g » - единицы измерения массы « g^2 » и « g », соответственно - прим. перев.]

Величина или влияние	Показание, результат взвешивания и погрешность, кг Неопределенность в граммах (г) или в виде относительного значения		Формула
Погрешность показания $E_{\text{appr}}(R)$ для показаний брутто и нетто: Аппроксимация прямой линией через нуль	$E_{\text{appr}}(R) = 0$		C2.2-16
Неопределенность аппроксимированной погрешности показания			
Стандартная неопределенность погрешности $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 0 \times u^2(R) + 3,651 \times 10^{-6} R^2$		C2.2-16d
Стандартная неопределенность погрешности, пренебрегая смещением	$u(E_{\text{appr}}) = 6,043 \times 10^{-3} R$		
Неопределенности, обусловленные влиянием окружающей среды			
Температурный дрейф чувствительности	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = 1,732 \times 10^{-6}$		7.4.3-1
Выталкивающая сила	Не имеет значения в этом случае.		7.4.3-2
Изменение характеристик (юстировки) вследствие дрейфа	Не имеет значения в этом случае (работает встроенное устройство юстировки и дрейф между калибровками пренебрежимо мал).		7.4.3-5
Неопределенности, обусловленные функционирование весов			
Работа устройства тарирования	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{tare}}) = 0$		7.4.4-5
Ползучесть и гистерезис (время под нагрузкой)	Не имеет значения в этом случае (непродолжительное время под нагрузкой).		7.4.4-9a/b
Нецентральное нагружение	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 1,443 \times 10^{-4}$		7.4.4-10
Неопределенность результата взвешивания для каждого интервала взвешивания (PWI)			
Стандартная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	PWI 1	$u(W) = \sqrt{(1,467g + 2,449 \times 10^{-6} R^2)}$	7.4.5-1b
	PWI 2	$u(W) = \sqrt{(7,417g + 2,449 \times 10^{-6} R^2)}$	
	PWI 3	$u(W) = \sqrt{(13,667g + 2,449 \times 10^{-6} R^2)}$	
Расширенная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	PWI 1	$U(W) = 2\sqrt{(1,467g + 2,449 \times 10^{-6} R^2)}$	7.5.1-2b
	PWI 2	$U(W) = 2\sqrt{(7,417g + 2,449 \times 10^{-6} R^2)}$	
	PWI 3	$U(W) = 2\sqrt{(13,667g + 2,449 \times 10^{-6} R^2)}$	
Упрощение до первого порядка	PWI 1	$U(W) \approx 2,422g + 1,706 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3f
	PWI 2	$U(W) \approx 6,616g + 2,355 \times 10^{-3} (R - 12000g)$	
	PWI 3	$U(W) \approx 11,951g + 2,744 \times 10^{-3} (R - 30000g)$	
Общая неопределенность результата взвешивания без коррекции показаний			
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) + E_{\text{appr}}(R) $	PWI 1	$U_{\text{gl}}(W) \approx 2,422g + 1,706 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3a
	PWI 2	$U_{\text{gl}}(W) \approx 6,616g + 2,355 \times 10^{-3} (R - 12000g)$	
	PWI 3	$U_{\text{gl}}(W) \approx 11,951g + 2,744 \times 10^{-3} (R - 30000g)$	

Проверка условия в отношении наблюдаемого значения χ^2 следуя (C2.2-2a) дала положительный результат. Линейная регрессия выполнена с учетом весовых коэффициентов p_j уравнения (C2.2-18b).

Исходя из общей неопределенности, значение минимальной нагрузки для весов можно получить согласно приложению G.

Пример:

Заданное значение допуска при взвешивании: 1%

Коэффициент запаса: 2

Минимальная нагрузка согласно формуле G-9 с использованием вышеприведенного уравнения для общей неопределенности в интервале взвешивания **PWI 1** составляет 502 г; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто большее, чем 502 г, для обеспечения относительной общей неопределенности измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 2 (равноценно допуску 0,5%).

НЗ Весы на нагрузку 30 000 кг, цена деления шкалы 10 кг

Предварительное замечание:

Приведена калибровка платформенных весов для взвешивания дорожных транспортных средств. Данный пример показывает завершённую стандартную процедуру для представления результатов измерений и соответствующих неопределенностей, выполняемую большинством лабораторий.

Испытательные нагрузки предпочтительно должны состоять только из гирь, прослеживаемых до единицы массы СИ.

В данном примере показано использование гирь и замещающих грузов. Калибруемые весы используется в качестве компаратора для подбора замещающих грузов таким образом, чтобы они давали приблизительно такое же показание, как соответствующая нагрузка, составленная из гирь.

Первая ситуация: юстировка чувствительности выполняется независимо от калибровки

(статус весов: на месте эксплуатации весов)

НЗ.1/А Условия, при которых выполняется калибровка

Прибор	Электронные весы неавтоматического действия, описание и идентификация, с сертификатом соответствия OIMLR76 или утверждения типа по EN 45501, но не поверенные
Максимальная нагрузка <i>Max</i> / цена деления шкалы <i>d</i>	30 000 кг / 10 кг
Грузоприёмное устройство	Ширина 3 м, длина 10 м, 4 точки опоры
Установка	Вне помещения, на открытом воздухе, под укрытием (в тени)
Температурный коэффициент	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (из руководства изготовителя); необходим единственно для расчета неопределенности результата взвешивания.
Встроенное устройство юстировки	Не предусмотрено.
Юстировка исполнителем калибровки	Без юстировки непосредственно перед калибровкой.
Цена деления шкалы при калибровке (фактическая цена деления)	Повышенное разрешение (сервисный режим), $d = 1$ кг
Продолжительность испытаний	От 9 до 13 ч (эта информация может быть полезной в связи с возможными эффектами ползучести и гистерезиса)
Температура во время калибровки	17 °C в начале калибровки 20 °C в конце калибровки
Атмосферное давление и условия окружающей среды во время калибровки (необязательные параметры)	1 010 гПа $\pm$ 5 гПа; без дождя, без ветра

Испытательные нагрузки	Гири: 10 параллелепипедных гирь, чугунных, массой 1000 кг каждая, класса точности М, с пределами допускаемой погрешности $m_{pe} = 50$ г (ГОСТ ОИМ LR 111- 1- 2 00 9 [4]) Замещающие грузы из чугуна: 2 стальных контейнера, заполненных стальными и чугунными обрезками россыпью, каждый массой примерно 2 000 кг; 2 стальных контейнера, заполненных стальными и чугунными обрезками россыпью, каждый массой примерно 3 000 кг; - Трейлер (автомобиль) для того чтобы разместить на нём гири или стальные контейнеры, масса которого подогнана примерно к 10 000 кг; - небольшие металлические детали, используемые для подгонки массы замещающих грузов. Средства подъёма и перемещения гирь и замещающих грузов: - вилочный погрузчик массой примерно 4500 кг, грузоподъёмностью 6000 кг – для перемещения гирь и замещающих грузов; - автомобиль с прицепом и краном, грузоподъёмностью 10 000 кг, для перевозки и перемещения гирь и замещающих грузов.
------------------------	---

Н3.2/А Испытания и результаты

Повторяемость	Испытательная нагрузка $\approx$ 10 420 кг:	Испытательная нагрузка $\approx$ 24 160 кг:
Требования приведены в главе 5.1	Вилочный погрузчик с 2 стальными контейнерами заезжает поочерёдно с каждого длинного конца грузоприёмного устройства, нагрузку центрируют на глаз	<i>Нагруженный автомобиль заезжает поочерёдно с каждого длинного конца грузоприёмного устройства, нагрузку центрируют на глаз (выполняется альтернативно или дополнительно)</i>
Показание ненагруженных весов при необходимости обнуляют		
После разгрузки показания ненагруженных весов были между 0 и 2 кг	10 405 кг	24 145 кг
	10 414 кг	24 160 кг
	10 418 кг	24 172 кг
	10 412 кг	24 152 кг
	10 418 кг	24 156 кг
	10 425 кг	24 159 кг
Среднее квадратическое отклонение	$s = 6,74$ кг	$s = 9,03$ кг

Нецентральное нагружение Требования приведены в главе 5.3 Показание обнуляют перед испытанием; нагрузку сначала устанавливают в центр грузоприёмного устройства, затем перемещают в другие положения	Положение нагрузки на грузоприёмном устройстве	Испытательная нагрузка ≈ 10 420 кг: Вилочный погрузчик с 2 стальными контейнерами
	Центр	10 420 кг
	Спереди слева	10 407 кг
	Сзади слева	10 435 кг
	Сзади справа	10 433 кг
	Спереди справа	10 413 кг
Максимальная разность между показанием при центральном нагружении и показаниями при нецентральных нагружениях (по четырём углам грузоприёмного устройства)	$ \Delta I_{\text{сци}} _{\text{max}}$	15 кг

Нецентральное нагружение (с прокатывающимися по грузоприёмному устройству нагрузками выполняется альтернативно или дополнительно) Требования приведены в главе 5.3 Показание обнуляют перед испытанием и перед изменением направления движения нагрузки через грузоприёмное устройство;	Положение нагрузки на грузоприёмном устройстве	Испытательная нагрузка ≈ 24 160 кг: самое тяжелое и концентрированное доступное транспортное средство
	Слева	24 160 кг
	Центр	24 157 кг
	Справа	24 181 кг
	(изменение направления) Справа	24 177 кг
	Центр	24 157 кг
	Слева	24 162 кг
Максимальная разность между показанием при центральном нагружении и двумя показаниями при нецентральных нагружениях (по продольной оси)	$ \Delta I_{\text{сци}} _{\text{max}}$	24 кг

Погрешности показания

Стандартная процедура: Требования приведены в главе 5.2, гири распределены достаточно равномерно по всему диапазону взвешивания.

Испытательные нагрузки воспроизводят методом замещения (с помощью замещающих грузов) с применением гирь массой 10 000 кг (10 гирь, каждая массой 1000 кг) и двух замещающих грузов L_{sub1} и L_{sub2} примерно по 10 000 кг каждый (автомобиль и суммарная масса четырёх контейнеров). Испытательные нагрузки прикладываются однократно и только в сторону увеличения. Такой способ нагружения может привести к тому, что на результат окажут влияние эффекты ползучести и гистерезиса, но при этом уменьшается количество нагружений и разгружений.

Показания после снятия гирь регистрируют, коррекцию показаний не производят; все грузы устанавливают ближе к центру грузоприёмного устройства, соблюдая принцип симметрии.

Зарегистрированные показания:

НАГРУЗКА				
Гири m_N	Замещающие грузы L_{sub}	Суммарная испытательная нагрузка $L_T = m_N + L_{sub}$	Показание I	Погрешность показания E
0 кг	0 кг	0 кг	0 кг	0 кг
5 000 кг $\frac{1}{2} m_{ref}$	0 кг	5 000 кг	5 002 кг $I(\frac{1}{2} m_{ref})$	2 кг
10 000 кг m_{ref}	0 кг	10 000 кг	10 010 кг $I(m_{ref})$	10 кг
0 кг	10 000 кг L_{sub1}	10 000 кг	10 010 кг $I(L_{sub1})$	10 кг
5 000 кг $\frac{1}{2} m_{ref}$	10 000 кг L_{sub1}	15 000 кг	15 015 кг $I(\frac{1}{2} m_{ref} + L_{sub1})$	15 кг
10 000 кг m_{ref}	10 000 кг L_{sub1}	20 000 кг	20 018 кг $I(m_{ref} + L_{sub1})$	18 кг
0 кг	20 010 кг $L_{sub1} + L_{sub2}$	20 010 кг	20 028 кг $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	18 кг
5 000 кг $\frac{1}{2} m_{ref}$	20 010 кг $L_{sub1} + L_{sub2}$	25 010 кг	25 035 кг $I(\frac{1}{2} m_{ref} + L_{sub1} + L_{sub2})$	25 кг
10 000 кг m_{ref}	20 010 кг $L_{sub1} + L_{sub2}$	30 010 кг	30 040 кг $I(m_{ref} + L_{sub1} + L_{sub2})$	30 кг
0 кг	0 кг	0 кг	4 кг	4 кг E_0

Плотность воздуха ρ_{as} во время юстировки и плотность воздуха ρ_{aCal} во время калибровки неизвестны.

Значения погрешностей показаний не корректируют на выталкивающую силу воздуха. При использовании гирь класса М относительная неопределенность эффекта выталкивающей силы, вычисленная согласно (7.1.2-5d), равна $1,6 \times 10^{-5}$ (так как весы не юстировались непосредственно перед калибровкой). Неопределенность достаточно мала, поэтому более тщательный расчет этой составляющей неопределенности исходя из фактически данных для плотности воздуха является излишним (неопределенность

выталкивающей силы меньше цены деления шкалы в режиме высокого разрешения d_T и пренебрежимо мала).

Предел плотности материала гирь класса точности M_1 устанавливается равным $\rho \geq 4\,400 \text{ кг м}^{-3}$ [4]. Этот же предел плотности материала может также рассматриваться для замещающих грузов. В таком случае относительная неопределенность, оцененная для влияния выталкивающей силы на замещающие грузы одинакова с указанной выше (для гирь) и достаточно мала; более тщательный расчет этой составляющей неопределенности исходя из фактически данных является излишним.

Примечание - При оценке плотности замещающих грузов необходимо учитывать любые внутренние полости, не открытые для атмосферы (например, как в баках, резервуарах). Необходимо оценивать плотность такого груза как единого целого, понимая, что эта плотность не может быть такой же, как плотность материала, из которого изготовлен груз.

НЗ.3/А Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия:

- Неопределенность погрешности при нуле включает только неопределенность показания ненагруженных весов (цена деления шкалы $d = 1 \text{ кг}$) и повторяемость s . Неопределенность показания нагруженных весов при нулевой нагрузке не учитывается.
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1-10), потому что его нельзя исключить во время испытания по определению погрешности показания. Если оба испытания на нецентральное нагружение были проведены, следует использовать результат с большим относительным значением.
- Погрешность показания получают, используя номинальное значение массы гири в качестве опорного значения, поэтому максимальные допускаемые погрешности испытательных гирь учитываются при определении вклада в неопределенность, обусловленного гирями: $u(\delta m_c)$ вычисляют как $u(\delta m_c) = T_{ol}/\sqrt{3}$, следуя формуле (7.1.2-3). Для каждой гири 1000 кг $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29 \text{ г}$.
- При отсутствии информации об изменении массы гирь (дрейфе) значение D выбирают равным m_{pe} . Для каждой гири 1000 кг $m_{pe} = \pm 50 \text{ г}$ и $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29 \text{ г}$, следуя формуле (7.1.2-11).
- Весы не юстируются непосредственно перед калибровкой. Применяется стандартная процедура согласно варианту 1, без информации о плотности воздуха. Поэтому для вычисления неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5d).
- Во время калибровки нагрузка остается на грузоприёмной площадке в течение значительного периода времени. На основании утверждения в главе 7.1.1 о возможной необходимости учитывать добавочные вклады в неопределенность, влияния эффектов ползучести и гистерезиса на результаты рассчитываются по формуле (7.4.4-7) и включаются в неопределенность показания.
- Гирь акклиматизируются до температуры окружающей среды с остаточной разностью температур 5 К. Эффекты конвекции не оказывают влияния (обычно их учитывают для гирь класса точности F_1 и более точных).
- Степени свободы для расчета коэффициента охвата k получены согласно приложению В3 и таблице G.2 из [1]. В рассматриваемом примере влияние неопределенности результатов испытания на повторяемость s 6 измерениями значительное.

РМГ _____ 20 _____ г

- Сведения об относительной неопределенности $U_{\text{rel}}(E)=U(E)/m_{\text{ref}}$ не обязательны, но помогают продемонстрировать характеристики неопределенностей.

Бюджет неопределенности для варианта 1 (без внесения поправки на выталкивающую силу в значения погрешности показаний)

Величина или влияние	Нагрузка, показание, погрешность и неопределенность, кг					Формула
Суммарная испытательная нагрузка $L_T = m_N + L_{\text{subj}}$, кг	0	5 000	10 000 m_{ref}	10 000*) L_{sub1}	15 000	
Показание I, кг	0	5 002	10 010 $I (m_{\text{ref}})$	10 010 $I (L_{\text{sub1}})$	15 015	
Погрешность показания E, кг	0	2	10	10 $\Delta I_1 = 0$	15	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{\text{rep}})$, кг	6,74					7.1.1-5
Разрешение $u(\delta I_{\text{dig0}})$, кг	0,29					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta I_{\text{digL}})$, кг	0,00	0,29				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{\text{ecc}})$, кг	0,00	2,08	4,16	4,16	6,24	7.1.1-10
Ползучесть / гистерезис $u_{\text{rel}}(\delta I_{\text{time}})$, кг	0,00	0,38	0,77	0,77	1,16	7.4.4-7
Неопределенность показания $u(I)$, кг	6,75	7,08	7,97	7,97	9,27	7.1.1-12
Гири m_N, кг	0	5 000	10 000	0	5 000	
Неопределенность $u(\delta m_c)$, кг	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, кг	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,00	0,08	0,16	0,00	0,08	7.1.2-5d
Конвекция $u(\delta m_{\text{conv}})$, кг	Не имеет значения в этом случае					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{\text{ref}})$, кг	0,00	0,22	0,44	0,00	0,22	7.1.2-14
Замещающие грузы L_{subj}, кг	0	0	0	10 000 $L_{\text{sub1}} = m_{\text{ref}} + \Delta I_1$	10 000 L_{sub1}	
Неопределенность $u(L_{\text{subj}})$, кг	0,00	0,00	0,00	11,28	11,28	7.1.2-15b
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,00	0,00	0,00	0,16	0,16	7.1.2-5d
Конвекция $u(\delta m_{\text{conv}})$, кг	Не имеет значения в этом случае					
Неопределенность замещающих грузов $u(L_{\text{subj}})$, кг	0,00	0,00	0,00	11,28	11,28	7.1.2-15b 7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, кг	6,75	7,08	7,98	-----	14,60	7.1.3-1c
v_{eff} (степени свободы)	5	6	9	-----	109	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,65	2,52	2,32	-----	2,02	[1]
$U(E) = k u(E)$, кг	18	18	19	-----	29	7.3-1
$U_{\text{rel}}(E) \%$	----	0,36	0,19	-----	0,20	

(продолжение)

Величина или влияние	Нагрузка, показание, погрешность и неопределенность, кг				Формула
Суммарная испытательная нагрузка $L_T = m_N + L_{subj}$, кг	20 000 $m_{ref2} + L_{sub2}$	20 010*)	25 010	30 010	
Показание I, кг	20 018 $I(m_{ref2} + L_{sub2})$	20 028 $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	25 035	30 040	
Погрешность показания E, кг	18	18 $\Delta/2=10$	25	30	7.1-1
Повторяемость $u(\delta_{rep})$, кг	6,74				7.1.1-5
Разрешение $u(\delta_{dig0})$, кг	0,29				7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta_{digL})$, кг	0,29				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta_{ecc})$, кг	8,32	8,32	10,40	12,48	7.1.1-10
Ползучесть/ гистерезис $u_{rel}(\delta_{time})$, /кг	1,54	1,54	1,93	2,31	7.4.4-7
Неопределенность показания $u(I)$, кг	10,82	10,82	12,54	14,38	7.1.1-12
Гири m_N, кг	10 000	0	5 000	10 000	
Неопределенность $u(\delta m_c)$, кг	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, кг	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,16	0,00	0,08	0,16	7.1.2-5d
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, кг	Не имеет значения в этом случае				7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, кг	0,44	0,00	0,22	0,44	7.1.2-14
Замещающие грузы L_{subj}, кг	10 000 L_{sub1}	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2} = 2m_{ref1} + \Delta/2$	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2}$	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2}$	
Неопределенность $u(L_{subj})$, кг	11,28	19,02	19,02	19,02	7.1.2-15b
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,16	0,32	0,32	0,32	7.1.2-5d
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, кг	Не имеет значения в этом случае				
Неопределенность замещающих грузов $u(L_{subj})$, кг	11,28	19,02	19,02	19,02	7.1.2-15b 7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, кг	15,64	-----	22,79	23,85	7.1.3-1c
v_{eff} (степени свободы)	144	-----	653	783	B3-1
$k(95,45\%)$	2,02	-----	2,00	2,00	[1]
$U(E) = ku(E)$, кг	32	-----	46	48	7.3-1
$U_{rel}(E) \%$	0,16	-----	0,18	0,16	

*) Значения, записанные в этой колонке (для того же значения суммарной испытательной нагрузки, как в предыдущей колонке, но после замены гирь замещающими грузами) не приводятся в калибровочном сертификате, но используются в следующих колонках. Как

напоминание об этом, в этой колонке не используется жирный шрифт и последние 5 ячеек пустые.

Допускается указывать в сертификате только наибольшее значение расширенной неопределенности для всех погрешностей, содержащихся в отчете: $U(E) = 48$ кг, исходя из $k = 2$ и вероятности охвата не меньше 95 %.

В сертификате должно быть приведено уведомление для пользователя о том, что указанная в нем расширенная неопределенность применима только когда учитывается погрешность (E).

Н3.4/А Неопределенность результата взвешивания

Как сказано в 7.4, следующую информацию можно получить силами калибровочной лаборатории или пользователя весов. Эти результаты не следует представлять в виде части сертификата калибровки, за исключением аппроксимированной погрешности показания и неопределенности аппроксимированной погрешности, которые могут составлять его часть. Обычно информацию о неопределенности результата взвешивания представляют в виде приложения к сертификату калибровки или иначе, если ее содержание ясно отделено от результатов калибровки.

Обычные условия использования весов, как принято, или как указано пользователем, могут включать:

- Изменение температуры $\Delta T = 40$ К.
- Нагрузки не всегда накладываются точно в центр.
- Функция тарирования используется.
- Время нагружения: нормальное, т.е. меньше, чем при калибровке.
- Показания снимаются при нормальном разрешении, $d = 10$ кг.

Погрешность показания при нагрузке 30 000 кг равна 30 кг, и это значение принимается за изменение юстировки вследствие дрейфа.

Обозначения R и W вводятся для того, чтобы отличать показания весов во время взвешиваний от показания /во время калибровки.

- R : показание при взвешивании нагрузки на калиброванных весах, получаемое после калибровки.
- W : Результат взвешивания

Следует обратить внимание на то, что в следующей таблице показание R и все результаты приведены в килограммах.

[В таблице в формулах неопределённости результата взвешивания «kg²» и «kg» - единицы измерения массы «кг²» и «кг», соответственно - прим. перев.]

Величина или влияние	Показание, результат взвешивания и погрешность, кг Неопределенность в килограммах или в виде относительного значения	Формула
Погрешность показания $E_{\text{appr}}(R)$ для показаний брутто и нетто: Аппроксимация прямой линией через нуль	$E_{\text{appr}}(R) = 9,379 \times 10^{-4} R$	C2.2-16
Неопределенность аппроксимированной погрешности показания		
Стандартная неопределенность погрешности $u(E_{\text{appr}})$	$u(E_{\text{appr}}) = \sqrt{8,797 \times 10^{-7} u^2(R) + 1,316 \times 10^{-9} R^2}$	C2.2-16d
Стандартная неопределенность погрешности, пренебрегая смещением	$u(E_{\text{appr}}) = 3,627 \times 10^{-4} R$	
Неопределенности, обусловленные воздействием окружающей среды		
Температурный дрейф чувствительности	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = \frac{2 \times 10^{-6} \times 40}{\sqrt{12}} = 2,309 \times 10^{-5}$	7.4.3-1
Выталкивающая сила	Не имеет значения в этом случае.	7.4.3-3
Изменение юстировки вследствие дрейфа (изменение $E(\text{Max})$ за 1 год равно 30 кг)	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{adj}}) = 30 / (30000 \sqrt{3}) = 5,774 \times 10^{-4}$	7.4.3-6
Неопределенности, обусловленные функционированием весов		
Работа устройства тарирования	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{tare}}) = 3,457 \times 10^{-4}$	7.4.4-5
Ползучесть и гистерезис (время под нагрузкой)	Не имеет значения в этом случае (непродолжительное время нагружения).	7.4.4-7
Нецентральное нагружение	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 8,311 \times 10^{-4}$	7.4.4-10
Неопределенность результата взвешивания		
Стандартная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	$u(W) = \sqrt{(62,133 \text{ kg} + 1,276 \times 10^{-4} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Расширенная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	$U(W) = 2\sqrt{(62,133 \text{ kg} + 1,276 \times 10^{-4} R^2)}$	7.5.1-2b
Упрощение до первого порядка	$U(W) \approx 16 \text{ kg} + 1,79 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3d
Общая неопределенность результата взвешивания без коррекции показаний		
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) + E_{\text{appr}}(R) $	$U_{\text{gl}}(W) \approx 16 \text{ kg} + 2,73 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3a

Проверка условия в отношении наблюдаемого значения χ^2 следуя (C2.2-2a) дала положительный результат. Первая линейная регрессия с учетом весовых коэффициентов p'_j , уравнение (C2.2-18b).

Исходя из общей неопределенности минимальное значение нагрузки для весов можно получить согласно приложению G.

Пример:

Заданное значение допуска при взвешивании: 1 %

Коэффициент запаса: 1

Минимальная нагрузка согласно формуле G-9 с использованием вышеприведенного уравнения для общей неопределённости составляет 2169 кг; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто большее, чем 2169 кг, для обеспечения относительной общей неопределенности измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 1 (равноценно допуску 1 %).

Если учитывается коэффициент запаса, его можно выбрать равным 2. Из-за большого значения общей неопределенности более высокий коэффициент запаса не может быть реализован.

Минимальная нагрузка согласно формуле (G-9) с использованием вышеприведённого уравнения для общей неопределённости составляет 6950 кг; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто, которое превышает 6950 кг для обеспечения относительной общей неопределенности измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 2 (равноценно допуску 0,5 %).

Вторая ситуация: юстировка чувствительности выполняется непосредственно перед калибровкой

(Предварительно на весах были выполнены операции ремонта и технического обслуживания)

НЗ.1/В Условия, при которых выполняется калибровка

Прибор	Электронные весы неавтоматического действия, описание и идентификация, с сертификатом соответствия OIMLR76 или утверждения типа по EN 45501, но не поверенные
Максимальная нагрузка Max / цена деления шкалы d	30 000 кг / 10 кг
Грузоприёмное устройство	Ширина 3 м, длина 10 м, 4 точки опоры
Установка	Вне помещения, на открытом воздухе, под укрытием
Температурный коэффициент	$K_T = 2 \times 10^{-6}/K$ (из руководства изготовителя); необходим единственно для расчета неопределенности результата взвешивания.
Встроенное устройство юстировки	Не предусмотрено.
Юстировка исполнителем калибровки	Юстировка выполняется непосредственно перед калибровкой.
Цена деления шкалы при калибровке	Повышенное разрешение (сервисный режим), $d = 1$ кг
Продолжительность испытаний	От 14 до 18 ч
Температура во время калибровки	22 °С в начале калибровки 18 °С в конце калибровки
Атмосферное давление во время калибровки	1 010 гПа $\pm$ 5 гПа; без дождя, без ветра
Испытательные нагрузки	Гири: 10 параллелепипедных гирь, чугунных, массой 1000 кг каждая, класса точности M₁, с пределами допускаемой погрешности $m_{pe} = 50$ г (OIMLR111 [4]) Замещающие грузы из чугуна: 2 стальных контейнера, заполненных стальными и чугунными обрезками россыпью, каждый массой примерно 2 000 кг; 2 стальных контейнера, заполненных стальными и чугунными обрезками россыпью, каждый массой примерно 3 000 кг; - Трейлер (автомобиль) для того чтобы разместить на нём гири или стальные контейнеры, масса которого подогнана примерно к 10 000 кг; - небольшие металлические детали, используемые для подгонки массы замещающих грузов. Средства подъёма и перемещения гирь и замещающих грузов: - вилочный погрузчик массой примерно 4500 кг, грузоподъёмностью 6000 кг – для перемещения гирь и замещающих грузов; - автомобиль с прицепом и краном, грузоподъёмностью 10 000 кг, для перевозки и перемещения гирь и замещающих грузов.

НЗ.2/В Испытания и результаты

Повторяемость Требования приведены в главе 5.1 Показание ненагруженных весов при необходимости обнуляют После разгрузки показания ненагруженных весов были между 0 и 2 кг	Испытательная нагрузка ≈ 10 420 кг: Вилочный погрузчик с 2 стальными контейнерами заезжает поочерёдно с каждого длинного конца грузоприёмного устройства, нагрузку центрируют на глаз	Испытательная нагрузка ≈ 24 160 кг: Нагруженный автомобиль заезжает поочерёдно с каждого длинного конца грузоприёмного устройства, нагрузку центрируют на глаз (выполняется альтернативно или дополнительно)
	10 415 кг	24 155 кг
	10 418 кг	24 160 кг
	10 422 кг	24 162 кг
	10 416 кг	24 152 кг
	10 422 кг	24 156 кг
	10 419 кг	24 159 кг
Среднее квадратическое отклонение	s = 2,94 кг	s = 3,67 кг

Нецентральное нагружение Требования приведены в главе 5.3 Показание обнуляют перед испытанием; нагрузку сначала устанавливают в центр грузоприёмного устройства, затем перемещают в другие положения	Положение нагрузки на грузоприёмном устройстве	Испытательная нагрузка ≈ 10 420 кг: Вилочный погрузчик с 2 стальными контейнерами
	Центр	10 420 кг
	Спереди слева	10 417 кг
	Сзади слева	10 423 кг
	Сзади справа	10 425 кг
	Спереди справа	10 425 кг
Максимальная разность между показанием при центральном нагружении и показаниями при нецентральных нагружениях (по четырём углам грузоприёмного устройства)	$ \Delta I_{\text{сcci}} _{\text{max}}$	5 кг

Нецентральное нагружение (с прокатывающимися по грузоприёмному устройству нагрузками выполняется альтернативно или дополнительно) Требования приведены в главе 5.3 Показание обнуляют перед испытанием и перед изменением направления движения нагрузки через грузоприёмное устройство;	Положение нагрузки на грузоприёмном устройстве	Испытательная нагрузка ≈ 24 160 кг: самое тяжелое и концентрированное доступное транспортное средство
	Слева	24 151 кг
	Центр	24 160 кг
	Справа	24 169 кг
	(изменение направления) Справа	24 167 кг
	Центр	24 160 кг
	Слева	24 150 кг

РМГ _____ 20 _____ г

Максимальная разность между показанием при центральном нагружении и двумя показаниями при нецентральных нагружениях (по продольной оси)	$\Delta I_{\text{сст}} _{\text{max}}$	10 кг
---	--	---------------------

Погрешности показания

Стандартная процедура: Требования приведены в главе 5.2, гири распределены достаточно равномерно по диапазону взвешивания.

Испытательные нагрузки воспроизводят методом замещения (с помощью замещающих грузов) с применением гирь массой 10 000 кг (10 гирь, каждая массой 1000 кг) и двух замещающих грузов L_{sub1} и L_{sub2} примерно по 10 000 кг каждый (автомобиль и суммарная масса четырёх контейнеров). Испытательные нагрузки прикладываются однократно и только в сторону увеличения. Такой способ нагружения может привести к тому, что на результат окажут влияние эффекты ползучести и гистерезиса, но при этом уменьшается количество нагружений и разгружений.

Показания после снятия гирь регистрируют, коррекцию показаний не производят; все грузы устанавливают ближе к центру грузоприёмного устройства, соблюдая принцип симметрии.

Зарегистрированные показания:

НАГРУЗКА				
Гири m_N	Замещающие грузы L_{sub}	Суммарная испытательная нагрузка $L_T = m_N + L_{sub}$	Показание I	Погрешность показания E
0 кг	0 кг	0 кг	0 кг	0 кг
5 000 кг $\frac{1}{2} m_{ref}$	0 кг	5 000 кг	5 002 кг $I(\frac{1}{2} m_{ref})$	2 кг
10 000 кг m_{ref}	0 кг	10 000 кг	10 005 кг $I(m_{ref})$	5 кг
0 кг	10 000 кг L_{sub1}	10 000 кг	10 005 кг $I(L_{sub1})$	5 кг
5 000 кг $\frac{1}{2} m_{ref}$	10 000 кг L_{sub1}	15 000 кг	15 007 кг $I(\frac{1}{2} m_{ref} + L_{sub1})$	7 кг
10 000 кг m_{ref}	10 000 кг L_{sub1}	20 000 кг	20 008 кг $I(m_{ref} + L_{sub1})$	8 кг
0 кг	20 010 кг $L_{sub1} + L_{sub2}$	20 010 кг	20 018 кг $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	8 кг
5 000 кг $\frac{1}{2} m_{ref}$	20 010 кг $L_{sub1} + L_{sub2}$	25 010 кг	25 020 кг $I(\frac{1}{2} m_{ref} + L_{sub1} + L_{sub2})$	10 кг
10 000 кг m_{ref}	20 010 кг $L_{sub1} + L_{sub2}$	30 010 кг	30 022 кг $I(m_{ref} + L_{sub1} + L_{sub2})$	12 кг
0 кг	0 кг	0 кг	4 кг	4 кг E_0

Плотность воздуха ρ_{as} во время юстировки и плотность воздуха ρ_{aCal} во время калибровки неизвестны.

Значения погрешности показаний не корректируются на выталкивающую силу воздуха. Используя гири класса точности M_1 , относительную неопределенность выталкивающей силы вычисляют согласно (7.1.2-5с), и она равна $7,2 \times 10^{-6}$ (так как весы юстируют непосредственно перед калибровкой). Неопределенность достаточно мала; более тщательный расчет этой составляющей неопределенности, исходя из фактических данных для плотности воздуха, является излишним (неопределенность выталкивающей силы меньше цены деления шкалы в режиме высокого разрешения d_T и пренебрежимо мала).

Предел плотности материала гирь класса точности M_1 устанавливается равным $\rho \geq 4\,400 \text{ кг м}^{-3}$ [4]. Этот предел можно рассматривать также для замещающих грузов. В этом случае относительная неопределенность выталкивающей силы, действующей на замещающие грузы, одинакова с указанной выше (для гирь) и достаточно мала; более тщательный расчет этой составляющей неопределенности исходя из фактических данных является излишним.

Примечание - При оценке плотности замещающих грузов необходимо учитывать любые внутренние полости, не открытые для атмосферы (например, как в баках, резервуарах). Необходимо оценивать плотность такого груза как единого целого, понимая, что эта плотность не может быть такой же, как плотность материала, из которого изготовлен груз.

Н3.3/В Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия:

- Неопределенность погрешности при нуле включает только неопределенность показания ненагруженных весов (цена деления шкалы $d = 1 \text{ кг}$) и повторяемость s . Неопределенность показания нагруженных весов при нулевой нагрузке не учитывается.
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1-10), потому что его нельзя исключить во время испытания по определению погрешности показания. Если оба испытания на нецентральное нагружение были проведены, следует использовать результат с большим относительным значением.
- Погрешность показания получают, используя номинальное значение массы гири в качестве опорного значения, поэтому максимальные допускаемые погрешности испытательных гирь учитываются при определении вклада в неопределенность, обусловленного гирями: $u(\delta m_c)$ вычисляют как $u(\delta m_c) = \text{ToI}/\sqrt{3}$, следуя формуле (7.1.2-3). Для каждой гири 1000 кг $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29 \text{ г}$.
- При отсутствии информации об изменении массы гирь (дрейфе) значение D выбирают равным m_{re} . Для каждой гири 1000 кг $m_{re} = \pm 50 \text{ г}$ и $u(\delta m_c) = 50/\sqrt{3} \approx 29 \text{ г}$, следуя формуле (7.1.2-11).
- Весы юстируются непосредственно перед калибровкой. Применяется стандартная процедура, информация о плотности воздуха отсутствует. Поэтому для вычисления неопределенности, обусловленной выталкивающей силой воздуха, применяется формула (7.1.2-5с).
- Во время калибровки нагрузка остается на грузоприёмной площадке в течение значительного периода времени. На основании утверждения в главе 7.1.1 о возможной необходимости учитывать добавочные вклады в неопределенность, влияния ползучести и гистерезиса на результаты рассчитываются по формуле (7.4.4-7) и включаются в неопределенность показания.
- Гирь акклиматизируются до температуры окружающей среды с остаточной разностью температур 5 К. Эффекты конвекции не оказывают влияния (обычно их учитывают для гирь класса точности F_1 и более точных).
- Степени свободы для расчета коэффициента охвата k получены согласно приложению В3 и таблице G.2 из [1]. В рассматриваемом примере влияние неопределенности результатов испытания на повторяемость с 6 измерениями значительное.
- Сведения об относительной неопределенности $U_{rel}(E) = U(E)/m_{ref}$ не обязательны, но помогают продемонстрировать характеристики неопределенностей.

Величина или влияние	Нагрузка, показание, погрешность и неопределенность, кг					Формула
Суммарная испытательная нагрузка $L_T = m_N + L_{\text{subj}}$, кг	0	5 000	10 000 m_{ref}	10 000*) L_{sub1}	15 000	
Показание I, кг	0	5 002	10 005 $I(m_{\text{ref}})$	10 005 $I(L_{\text{sub1}})$	15 007	
Погрешность показания E, кг	0	2	5	5 $\Delta I_1 = 0$	7	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{\text{rep}})$, кг	2,94					7.1.1-5
Разрешение $u(\delta I_{\text{dig0}})$, кг	0,29					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta I_{\text{digL}})$, кг	0,00	0,29				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{\text{ecc}})$, кг	0,00	0,69	1,39	1,39	2,08	7.1.1-10
Ползучесть / гистерезис $u_{\text{rel}}(\delta I_{\text{time}})$, кг	0,00	0,39	0,77	0,77	1,16	7.4.4-7
Неопределенность показания $u(I)$, кг	2,96	3,08	3,37	3,37	3,81	7.1.1-12
Гири m_N, кг	0	5 000	10 000	0	5 000	
Неопределенность $u(\delta m_c)$, кг	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, кг	0,00	0,14	0,29	0,00	0,14	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,00	0,04	0,07	0,00	0,04	7.1.2-5c
Конвекция $u(\delta m_{\text{conv}})$, кг	Не имеет значения в этом случае					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{\text{ref}})$, кг	0,00	0,21	0,42	0,00	0,21	7.1.2-14
Замещающие грузы L_{subj}, кг	0	0	0	10 000 $L_{\text{sub1}} = m_{\text{ref}} + \Delta I_1$	10 000 L_{sub1}	
Неопределенность $u(L_{\text{subj}})$, кг	0,00	0,00	0,00	4,78	4,78	7.1.2-15b
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07	7.1.2-4
Конвекция $u(\delta m_{\text{conv}})$, кг	Не имеет значения в этом случае					
Неопределенность замещающих нагрузок $u(L_{\text{subj}})$, кг	0,00	0,00	0,00	4,78	4,78	7.1.2-15b 7.1.2-4
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, кг	2,96	3,08	3,39	-----	6,12	7.1.3-1c
v_{eff} (степени свободы)	5	6	8	-----	93	B3-1
$k(95,45 \%)$	2,65	2,52	2,32	-----	2,03	[1]
$U(E) = ku(E)$, кг	8	8	8	-----	12	7.3-1
$U_{\text{rel}}(E) \%$	----	0,16	0,08	-----	0,08	

(продолжение)

Величина или влияние	Нагрузка, показание, погрешность и неопределенность, кг				Формула
Суммарная испытательная нагрузка $L_T = m_N + L_{subj}$, кг	20 000 $m_{ref2} + L_{sub2}$	20 010 [*]	25 010	30 010	
Показание I, кг	20 008 $I(m_{ref2} + L_{sub2})$	20 018 $I(L_{sub1} + L_{sub2})$	25 020	30 022	
Погрешность показания E, кг	8	8 $\Delta I_2 = 10$	10	12	7.1-1
Повторяемость $u(\delta I_{rep})$, кг	2,94				7.1.1-5
Разрешение $u(\delta I_{dig0})$, кг	0,29				7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta I_{digL})$, кг	0,29				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta I_{ecc})$, кг	2,77	2,77	3,47	4,16	7.1.1-10
Ползучесть/ гистерезис $u_{rel}(\delta I_{time})$, /кг	1,54	1,54	1,93	2,31	7.4.4-7
Неопределенность показания $u(I)$, кг	4,34	4,34	4,95	5,61	7.1.1-12
Гири m_N, кг	10 000	0	5 000	10 000	
Неопределенность $u(\delta m_c)$, кг	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, кг	0,29	0,00	0,14	0,29	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,07	0,00	0,04	0,07	7.1.2-5c
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, кг	Не имеет значения в этом случае				7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, кг	0,42	0,00	0,21	0,42	7.1.2-14
Замещающие грузы L_{subj}, кг	10 000 L_{sub1}	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2} = 2$ $m_{ref1} + \Delta I_2$	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2}$	20 010 $L_{sub1} + L_{sub2}$	
Неопределенность $u(L_{subj})$, кг	4,78	7,80	7,80	7,80	7.1.2-15a
Выталкивающая сила $u(\delta m_B)$, кг	0,07	0,14	0,14	0,14	7.1.2-5c
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, кг	Не имеет значения в этом случае				7.1.2-13
Неопределенность замещающих нагрузок $u(L_{subj})$, кг	4,78	7,80	7,80	7,80	7.1.2-15a 7.1.2-4
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, кг	6,47	-----	9,24	9,62	7.1.3-1a
v_{eff} (степени свободы)	117	-----	486	569	B3-1
$k(95,45\%)$	2,02	-----	2,01	2,00	[1]
$U(E) = ku(E)$, кг	13	-----	19	19	7.3-1
$U_{rel}(E) \%$	0,06	-----	0,07	0,06	

^{*}) Значения, записанные в этой колонке (для того же значения суммарной испытательной нагрузки, как в предыдущей колонке, но после замены гирь замещающими грузами), не приводятся в калибровочном сертификате, но используются в следующих колонках. Как

напоминание об этом, в этой колонке не используется жирный шрифт и последние 5 ячеек пустые.

Допускается указывать в сертификате только наибольшее значение расширенной неопределенности для всех погрешностей, содержащихся в отчете: $U(E) = 19$ кг, исходя из $k = 2$ и вероятности охвата не меньше 95 %.

В сертификате должно быть приведено уведомление для пользователя о том, что указанная в нем расширенная неопределенность применима только, когда учитывается погрешность (E).

Н3.4/В Неопределенность результата взвешивания

Как сказано в 7.4, следующую информацию можно получить силами калибровочной лаборатории или пользователя весов. Эти результаты не следует представлять в виде части сертификата калибровки, за исключением аппроксимированной погрешности показания и неопределенности аппроксимированной погрешности, которые могут составлять его часть. Обычно информацию о неопределенности результата взвешивания представляют в виде приложения к сертификату калибровки или иначе, если ее содержание ясно отделено от результатов калибровки.

Обычные условия использования весов, как принято, или как указано пользователем, могут включать:

- Изменение температуры $\Delta T = 40$ К.
- Нагрузки не всегда накладываются точно в центр.
- Функция тарирования используется.
- Время нагружения: нормальное, т.е. меньше, чем при калибровке.
- Показания снимаются при нормальном разрешении, $d = 10$ кг.

За изменение юстировки вследствие дрейфа принимается погрешность показания 15 кг на нагрузке 30 000 кг. Это предел допускаемой погрешности *тре* при первичной поверке, что подтверждает, что весы находятся в удовлетворительном состоянии после ремонта и технического обслуживания.

Обозначения R и W вводятся для того, чтобы различать показания весов во время взвешиваний и во время калибровки.

- R : показание при взвешивании нагрузки на калиброванных весах, получаемое после калибровки.
- W : Результат взвешивания

Следует обратить внимание на то, что в следующей таблице показание R и все результаты приведены в килограммах.

[В таблице в формулах неопределённости результата взвешивания « kg^2 » и « kg » - единицы измерения массы « kg^2 » и « kg », соответственно - прим. перев.]

Величина или влияние	Показание, результат взвешивания и погрешность, кг Неопределенность в килограммах или в виде относительного значения	Формула
Погрешность показания $E_{\text{appr}}(R)$ для показаний брутто и нетто: Аппроксимация прямой линией через нуль	$E_{\text{appr}}(R) = 4,280 \times 10^{-4} R$	C2.2-16
Неопределенность аппроксимированной погрешности показания		
Стандартная неопределенность погрешности $u(E_{\text{appr}})$	$u^2(E_{\text{appr}}) = 1,832 \times 10^{-8} u^2(R) + 2,204 \times 10^{-8} R^2$	C2.2-16d
Стандартная неопределенность погрешности, пренебрегая смещением	$u(E_{\text{appr}}) = 1,485 \times 10^{-4} R$	
Неопределенности, обусловленные воздействием окружающей среды		
Температурный дрейф чувствительности	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{temp}}) = \frac{2 \times 10^{-6} \times 40}{\sqrt{12}} = 2,309 \times 10^{-5}$	7.4.3-1
Выталкивающая сила	Не имеет значения в этом случае.	7.4.3-2
Изменение юстировки вследствие дрейфа (изменение $E(\text{Max})$ через 1 год равно 15 кг)	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{adj}}) = 15 / (30000 \sqrt{3}) = 2,887 \times 10^{-4}$	7.4.3-6
Неопределенности, обусловленные функционированием весов		
Работа устройства тарирования	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{tare}}) = 1,154 \times 10^{-4}$	7.4.4-5
Ползучесть и гистерезис (время под нагрузкой)	Не имеет значения в этом случае (непродолжительное время под нагрузкой).	7.4.4-7
Нецентральное нагружение	$u_{\text{rel}}(\delta R_{\text{ecc}}) = 2,770 \times 10^{-4}$	7.4.4-10
Неопределенность результата взвешивания		
Стандартная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	$u(W) = \sqrt{(25,333 \text{ kg} + 1,960 \times 10^{-4} R^2)}$	7.4.5-1a 7.4.5-1b
Расширенная неопределенность, поправки для внесения в показания E_{appr}	$U(W) = 2\sqrt{(25,333 \text{ kg} + 1,960 \times 10^{-4} R^2)}$	7.5.1-2b
Упрощение до первого порядка	$U(W) \approx 10,067 \text{ kg} + 6,113 \times 10^{-4} R$	7.5.2-3d
Общая неопределенность результата взвешивания без коррекции показаний		
$U_{\text{gl}}(W) = U(W) + E_{\text{appr}}(R) $	$U_{\text{gl}}(W) \approx 10 \text{ kg} + 1,04 \times 10^{-3} R$	7.5.2-3a

Проверка условия в отношении наблюдаемого значения χ^2 , следуя (C2.2-2a), дала положительный результат. Первая линейная регрессия с учетом весовых коэффициентов p'_j , уравнение (C2.2-18b).

Исходя из общей неопределенности минимальное значение нагрузки для весов можно получить согласно приложению G.

Пример:

Заданное значение допуска при взвешивании: 1 %

Коэффициент запаса: 1

Минимальная нагрузка согласно формуле G-9 с использованием вышеприведенного уравнения для общей неопределённости составляет 1123 кг; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто большее, чем 1123 кг для обеспечения относительной общей неопределённости измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 1 (равноценно допуску 1%).

Если учитывается коэффициент запаса, его можно выбрать равным 2. Из-за большого значения общей неопределённости более высокий коэффициент запаса не может быть реализован.

Минимальная нагрузка согласно формуле (G-9) с использованием вышеприведённого уравнения для общей неопределённости составляет 2542 кг; т.е. пользователю необходимо взвешивать количество материала нетто, которое превышает 2542 кг для обеспечения относительной общей неопределённости измерений при заданном относительном допуске 1 % и коэффициенте запаса 2 (равноценно допуску 0,5%).

Н3.5 Дополнительные сведения к примеру: Подробные сведения о процедуре замещения (4.3.3)

Настоятельно рекомендуется, чтобы показание при замещающей нагрузке – насколько это возможно – совпадало с показанием весов при нагружении гири (как демонстрировалось для показания 10 005 кг для второй ситуации).

Для получения такого же показания (10 005 кг) масса замещающих грузов может быть изменена добавлением или снятием с грузоприёмного устройства мелких металлических деталей. Значение массы для первого замещающего груза равно $L_{\text{sub1}} = m_N = 10\,000$ кг.

Примечание: Можно использовать оба обозначения: как m_N так и m_{ref} ($m_{\text{ref}} = m_N$).

В той же таблице представлена ситуация, когда не удалось подогнать массу замещающего груза для получения показания 20 008 кг. Значение массы замещающих грузов при втором замещении равно: $L_{\text{sub2}} = m_N + I(L_{\text{sub2}}) - I(m_N) =$

10 000 кг + 20 018 кг – 20 008 кг = 10 010 кг, а суммарная масса замещающих грузов L_{sub} равна: $L_{\text{sub}} = L_{\text{sub1}} + L_{\text{sub2}} = 20\,010$ кг.

Н4 Определение функции аппроксимации погрешности

Предварительное замечание:

В этом примере показана основная процедура определения коэффициентов калибровочной функции и оценки соответствующих неопределённостей согласно описанию в приложении С.

Н4.1 Условия, при которых выполняется калибровка

Прибор	Электронные весы
Максимальная нагрузка $M_{\max}$ / Цена деления шкалы d	400 г / 0,000 1 г
Юстировка исполнителем калибровки	Юстировка непосредственно перед калибровкой (встроенные юстировочные гири).
Условия в помещении	Температура 23 °С Плотность воздуха $\rho_{\text{aCal}}=1,090 \text{ кг/м}^3$, $u(\rho_{\text{aCal}})=0,004 \text{ кг/м}^3$
Испытательные нагрузки/ акклиматизация	Гири, класс точности E_2 , акклиматизированы к температуре помещения: $\delta m_{\text{conv}}=0$; $u(\delta m_{\text{conv}})=0$.

Н4.2 Результаты испытаний и калибровки

Испытание на повторяемость выполнено с нагрузкой 200 г	$s(l) = 0,052 \text{ мг}$	7.1.1-5
Испытание на нецентральное нагружение выполнено с нагрузкой 200 г	$ \Delta I_{\text{ecc}i} _{\max} = 0,10 \text{ мг}$ $u_{\text{rel}}(I_{\text{ecc}}) = 0,000 144$	7.1.1-11
Методика калибровки	Испытательные нагрузки прикладывают пошагово с увеличением нагрузки и разгрузением перед каждым шагом. Число точек нагружения $n = 9$. Число циклов $N = 3$.	
Неопределенность, обусловленная повторяемостью	$u(\delta I_{\text{ep}}) = s(l) / \sqrt{N} = 0,030 \text{ мг}$	7.1.1-6

Н4.3 Погрешности и соответствующие неопределенности (бюджет соответствующих неопределенностей)

Условия:

- Неопределенность погрешности при нуле включает только неопределенность показания ненагруженных весов и повторяемость s .
- Нецентральное нагружение учитывается при калибровке в соответствии с (7.1.1- 10).
- Погрешность показания получают, используя калибровочное значение в качестве опорного значения, вклад в неопределенность, обусловленный опорным значением массы, приводят в сертификате калибровки $u(\delta m_c) = U/2$.
- Кроме того, также известна плотность воздуха во время калибровки ρ_{a1} .
- Дрейф массы гирь оценивают по результатам проведенных калибровок гирь.

Результаты:

m_N	m_c , г	$U(\delta m_c)$, мг	$u(\delta m_D)$, мг
50 г	50,000 006	0,030	0,005
100 г	99,999 987	0,050	0,010

РМГ _____ 20 _____ г

200 г	200,000 013	0,090	0,015
200 г*	199,999 997	0,090	0,015

$$\rho_{\text{Cal}}=8000 \text{ кг/м}^3, u(\rho_{\text{Cal}})=60 \text{ кг/м}^3$$

Калибровку выполняют при плотности воздуха $\rho_{\text{a1}}=1,045 \text{ кг/м}^3$.

Из уравнения (4.2.4-4): $\delta m_{\text{В}} = 0$, поэтому $m_{\text{ref}} = m_{\text{с}}$.

- Гири акклиматизированы до температуры окружающей среды, изменение температуры во время калибровки весов незначительно.
- Весы юстируют непосредственно перед калибровкой, и во время калибровки определяют плотность воздуха.
- Неопределенность выталкивающей силы воздуха определяют как:

$$u^2(\delta m_{\text{В}}) = m_{\text{N}}^2 u_{\text{rel}}^2(\delta m_{\text{В}})$$

по (7.1.2-5b).

Следует обратить внимание на то, что в данном примере такой вклад отрицателен, по этой причине приведен вклад дисперсии вместо неопределенности.

Нагрузки от 0 до 200 г

Величина или влияние	Нагрузка и показание, г Погрешность и неопределенность, мг					Формула
Нагрузка m_{ref} , г	0	50,000 006	99,999 987	149,999 993	200,000 013	
Показание I , г (среднее значение)	0,000 000	50,000 067	100,000 100	150,000 233	200,000 267	
Погрешность показания E , мг	0,000	0,061	0,113	0,240	0,254	7.1.1-1
Повторяемость s , мг	0,030					7.1.1-6
Разрешение $u(\delta_{dig0})$, мг	0,029					7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta_{digL})$, мг	0,000	0,029				7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta_{ecc})$, мг	0,000	0,007	0,014	0,022	0,029	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, мг	0,042	0,051	0,053	0,055	0,058	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_N , г	0	50	100	100 50	200	
Гири $u(\delta m_c)$, мг	0,000	0,015	0,025	0,040	0,045	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$ /мг	0,000	0,005	0,010	0,015	0,015	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u^2(\delta m_B)$, мг ²	0,000	$4,83 \times 10^{-5}$	$1,93 \times 10^{-4}$	$4,35 \times 10^{-4}$	$7,73 \times 10^{-4}$	7.1.2-5b
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, мг	Не имеет значения в этом случае.					7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, мг	0,000	0,014	0,023	0,037	0,038	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, мг	0,042	0,053	0,058	0,067	0,070	7.1.3-1a

РМГ _____ 20 _____ г

Нагрузки от 250 до 400 г

Величина или влияние	Нагрузка и показание, г Погрешность и неопределенность, мг				Формула
Нагрузка m_{ref} , г	250,000 019	300,000 000	350,000 006	400,000 010	
Показание I , г (среднее значение)	250,000 100	300,000 200	350,000 267	400,000 400	
Погрешность показания E , мг	0,081	0,200	0,261	0,390	7.1-1
Повторяемость s , мг	0,030				7.1.1-6
Разрешение $u(\delta_{dig0})$, мг	0,029				7.1.1-2a
Разрешение $u(\delta_{digL})$, мг	0,000	0,029			7.1.1-3a
Нецентральное нагружение $u(\delta_{ecc})$, мг	0,036	0,043	0,051	0,058	7.1.1-10
Неопределенность показания $u(I)$, мг	0,062	0,067	0,072	0,077	7.1.1-12
Испытательные нагрузки m_N , г	50 200	100 200	50 100 200	200 200 *	
Гири $u(\delta m_c)$, мг	0,060	0,070	0,085	0,090	7.1.2-3
Дрейф $u(\delta m_D)$, мг	0,020	0,025	0,030	0,030	7.1.2-11
Выталкивающая сила $u^2(\delta m_B)$, мг ²	1,21×10 ⁻³	1,74×10 ⁻³	2,37×10 ⁻³	3,09×10 ⁻³	7.1.2-5b
Конвекция $u(\delta m_{conv})$, мг	Не имеет значения в этом случае.				7.1.2-13
Неопределенность опорного значения массы $u(m_{ref})$, мг	0,053	0,062	0,076	0,077	7.1.2-14
Стандартная неопределенность погрешности $u(E)$, мг	0,082	0,091	0,104	0,109	7.1.3-1a

По результатам калибровки определяется калибровочная функция $E = f(I)$.

В качестве примера рассматривается модель линейной регрессии $E = a_1 I$.

Коэффициенты a_1 определяются уравнением C2.2-6.

В таблице N4.1 показаны матрица X и вектор e . Соответствующая ковариационная матрица $U(e)$ представлена в таблице N4.4, которая получена с использованием (C2.2-3a).

В таблице N4.2 показаны ковариационные матрицы $U(m_{ref})$, которые определяются выражением (C2.2-3b),

где вектор-столбец $s_{m_{ref}}$ задается неопределенностями опорного значения массы $u(m_{ref})$.

В таблице N4.3 показана ковариационная диагональная матрица $U(I_{cal})$, значения в ее диагонали представляют квадраты $U(I_{cal})$.

На первом шаге вклад в $U(mod)$ не учитывается ($s_m = 0$).

Поскольку число точек нагружения $n = 9$ и число параметров $n_{par} = 1$, степени свободы равны $v = n - n_{par} = 8$.

Таблица Н4.1: Матрица X и вектор e

X, г	e/mg
0	0,000
50,000 067	0,061
100,000 100	0,213
150,000 233	0,274
200,000 267	0,254
250,000 100	0,181
300,000 200	0,200
350,000 267	0,261
400,000 400	0,390

Таблица Н4.2: Ковариационная матрица $U(m_{\text{ref}})$

0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$2,017 \times 10^{-4}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,316 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$1,390 \times 10^{-3}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,477 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,792 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$3,785 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-4}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$5,756 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-4}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$5,906 \times 10^{-3}$

Таблица Н4.3: Ковариационная матрица $U(l_{\text{cal}})$

$1,735 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$2,620 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	$2,776 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	$3,037 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	$3,401 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$3,870 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$4,443 \times 10^{-3}$	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$5,120 \times 10^{-3}$	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$5,901 \times 10^{-3}$

Таблица Н4.4: Ковариационная матрица $U(e)$ с $s_m = 0$

$1,735 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$2,822 \times 10^{-3}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	$3,308 \times 10^{-3}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$4,427 \times 10^{-3}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$4,878 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$6,662 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$8,228 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$1,088 \times 10^{-2}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$1,181 \times 10^{-2}$

Н4.4 Результаты

Применяя (С2.2-6) и (С2.2-9), получаем

$$a_1 = 0,00083 \text{ мг/г}$$

Ковариационная матрица $U(\hat{a})$ равна

$$5,109 \times 10^{-8} (\text{мг/г})^2$$

откуда

$$u(a_1) = 0,00023 \text{ мг/г}$$

Из (С2.2-8)

$$\chi^2_{\text{obs}} = 12,5$$

Поскольку в этом случае испытание χ^2 (С2.2-2а) дает отрицательный результат, в неопределенность добавляется вклад s_m .

Учитывая $s_m = 0,05$ мг, соответствующая ковариационная матрица $U(mod)$ задается диагональной матрицей 9×9 с $s_m^2 = 0,05^2$ в ее диагонали. В таблице Н4.5 показана соответствующая ковариационная матрица $U(e)$.

Таблица Н4.5: Ковариационная матрица $U(e)$, оцененная с $s_m = 0,05$ мг

$4,235 \times 10^{-3}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$5,322 \times 10^{-3}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	5,808E-03	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$6,927 \times 10^{-3}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$7,378 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$9,162 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$1,073 \times 10^{-2}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$1,338 \times 10^{-2}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$1,431 \times 10^{-2}$

РМГ _____ 20 _____ г

Новые результаты

$$a_1 = 0,00084 \text{ мг/г}$$

Ковариационная матрица равна

$$5,637 \times 10^{-8} (\text{мг/г})^2$$

откуда

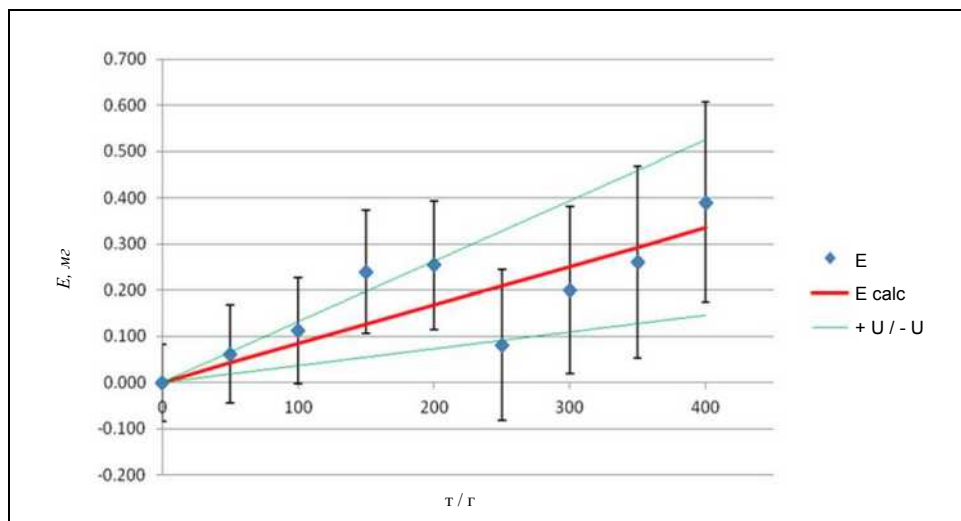
$$u(a_1) = 0,00024 \text{ мг/г}$$

и

$$\chi^2_{\text{obs}} = 7,3$$

В таком случае χ^2 испытание (С2.2-2а) дает положительный результат. График результатов показан на рисунке Н4-1.

Рисунок Н4-1: Измеренные погрешности показания E и функции линейной подгонки с соответствующими полосами неопределенности



Соответствующие точкам калибровки остатки и неопределенности рассчитаны по (С2.2-7) и (С2.2-11) и показаны в таблице Н4.6.

Таблица Н4.6: Рассчитанные погрешность, остатки и неопределенности, соответствующие точкам калибровки

I, e	$E, \text{мг}$	$E_{\text{appr}}, \text{мг}$	Остаток $v, \text{мг}$	$u(E_{\text{appr}}), \text{мг}$	$U(E_{\text{appr}}), \text{мг}$	Проверка остатка (C2.2-2b)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	ДА
50,000 067	0,061	0,042	-0,019	0,012	0,024	ДА
100,000 200	0,113	0,084	-0,029	0,024	0,047	ДА
150,000 267	0,240	0,126	-0,114	0,036	0,071	НЕТ
200,000 267	0,254	0,168	-0,086	0,047	0,095	ДА
250,000 200	0,081	0,210	0,129	0,059	0,119	НЕТ
300,000 200	0,200	0,252	0,052	0,071	0,142	ДА
350,000 267	0,261	0,293	0,032	0,083	0,166	ДА
400,000 400	0,390	0,335	-0,055	0,095	0,190	ДА

Если используется приведенный в (C2.2-2b) альтернативный метод, который имеет больше ограничений, проверка остатка дает неудовлетворительные результаты в двух точках, как показано в таблице Н4.6.

Для того, чтобы получить лучшее соответствие условию (C2.2-2b), необходимо учесть вклад $s_m = 0,25 \text{ мг}$, и поэтому вычисляется новая матрица $U(e)$, приведенная в таблице Н4.7.

Таблица Н4.7: Ковариационная матрица $U(e)$ оцененная с $s_m = 0,25 \text{ мг}$

$6,423 \times 10^{-2}$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	$6,532 \times 10^{-2}$	$3,274 \times 10^{-4}$	$5,294 \times 10^{-4}$	$5,457 \times 10^{-4}$	$7,503 \times 10^{-4}$	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,091 \times 10^{-3}$
0,000	$3,274 \times 10^{-4}$	$6,581 \times 10^{-2}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$
0,000	$5,294 \times 10^{-4}$	$8,596 \times 10^{-4}$	$6,693 \times 10^{-2}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$
0,000	$5,457 \times 10^{-4}$	$8,860 \times 10^{-4}$	$1,433 \times 10^{-3}$	$6,738 \times 10^{-2}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$
0,000	$7,503 \times 10^{-4}$	$1,218 \times 10^{-3}$	$1,970 \times 10^{-3}$	$2,030 \times 10^{-3}$	$6,916 \times 10^{-2}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$
0,000	$8,736 \times 10^{-4}$	$1,418 \times 10^{-3}$	$2,294 \times 10^{-3}$	$2,364 \times 10^{-3}$	$3,250 \times 10^{-3}$	$7,073 \times 10^{-2}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$
0,000	$1,077 \times 10^{-3}$	$1,749 \times 10^{-3}$	$2,829 \times 10^{-3}$	$2,915 \times 10^{-3}$	$4,009 \times 10^{-3}$	$4,668 \times 10^{-3}$	$7,338 \times 10^{-2}$	$5,831 \times 10^{-3}$
0,000	$1,091 \times 10^{-3}$	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,865 \times 10^{-3}$	$2,953 \times 10^{-3}$	$4,060 \times 10^{-3}$	$4,728 \times 10^{-3}$	$5,831 \times 10^{-3}$	$7,431 \times 10^{-2}$

С таким приближением результатом является

$$a_1 = 0,00084 \text{ мг/г}$$

Ковариационная матрица

$$1,745 \times 10^{-7} (\text{мг/г})^2$$

Следовательно

$$u(a_1) = 0,00042 \text{ мг/г}$$

График результатов показан на рисунке Н4-2. Рассчитанные остатки и неопределенности, соответствующие точкам калибровки, показаны в таблице Н4.8.

Рисунок Н4-2: Измеренные погрешности показания E и функции линейной подгонки с соответствующими полосами неопределенности

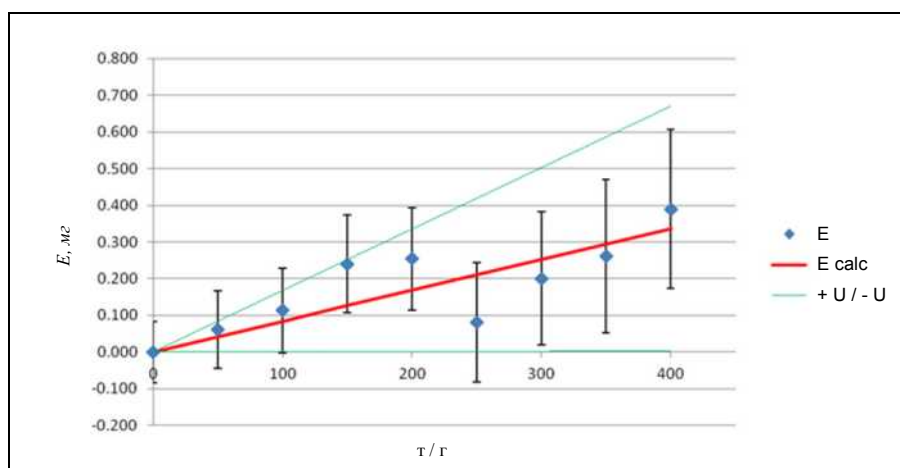


Таблица Н4.8: Рассчитанные погрешность, остатки и неопределенности, соответствующие точкам калибровки

$l, \text{г}$	$E, \text{мг}$	$E_{\text{appr}}, \text{мг}$	Остаток $v, \text{мг}$	$u(E_{\text{appr}}), \text{мг}$	$U(E_{\text{appr}}), \text{мг}$	Проверка остатка (С2.2-2b)
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	ДА
50,000 067	0,061	0,042	-0,019	0,021	0,042	ДА
100,000 200	0,213	0,084	-0,029	0,042	0,084	ДА
150,000 267	0,274	0,126	-0,114	0,063	0,125	ДА
200,000 267	0,254	0,168	-0,086	0,084	0,167	ДА
250,000 200	0,181	0,210	0,129	0,104	0,209	ДА
300,000 200	0,200	0,252	0,052	0,125	0,251	ДА
350,000 267	0,261	0,294	0,033	0,146	0,292	ДА
400,000 400	0,390	0,336	-0,054	0,167	0,334	ДА

PMГ _____ 20 _____ г