

Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н.
Метрология. Шкалы, эталоны, практика

– М.: ВНИИФТРИ.– 2004 г.– 222 с. (ил. 22, табл. 31, библиогр. 169)



Изложены результаты развития теории шкал измерений до уровня прикладной метрологии. Классифицированы применяемые шкалы измерений всевозможных количественных свойств (величин) и качественных свойств. На примерах показаны особенности применения стандартизованных метрических и неметрических шкал измерений. Рассмотрены единицы измерений и их системы, включая достоинства и недостатки SI. Особое внимание уделено внесистемным и безразмерным единицам и средствам измерительной техники, в первую очередь мерам и эталонам, особенностям представления результатов измерений в шкалах различных типов. Рассмотрена возможность непротиворечивого использования понятий «погрешность» и «неопределенность» результата измерений в метрологической практике.

Книга адресована метрологам и специалистам, занимающимся практическими аспектами измерений. Может быть рекомендована в качестве пособия для студентов и аспирантов.

***Измеряй все доступное измерению
и делай доступным все недоступное ему.
Г.Галилей***

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга появилась в результате систематических исследований, выполненных отделом общих и теоретических проблем метрологии ВНИИФТРИ. Авторы много лет работали в таком тесном творческом контакте, что четко указать авторство разделов книги невозможно. Можно только указать доминирующие направления работы авторов. Л.Н. Брянский в основном специализировался в подготовке материалов по системам единиц, эталонам, классификации средств измерений, ряду конкретных шкал измерений. А.С. Дойников – по теоретическим вопросам классификации измеряемых свойств, основам теории шкал измерений, показателям точности, особенностям представления результатов измерений в разных шкалах и классификации конкретных шкал. При этом использованы материалы совместных с А.А. Дойниковым публикаций. Б.Н. Крупин – по вопросам законодательной метрологии и стандартизации, теории логарифмических шкал, акустическим шкалам, поиску исходных сведений и материалов по конкретным шкалам, созданию компьютерной версии рукописи книги.

Авторы признательны Ю.И. Брегадзе за устойчивую поддержку направления работ по прикладному развитию теории шкал измерений. Благодарим также сотрудников Г.П. Афанасьеву, А.С. Рудниченко и И.Ю. Морозовскую за исключительно внимательную помощь в оформлении рукописи книги.

© Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н., 2004
© ВНИИФТРИ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Общая характеристика метрологии	4
1.1. Научные и правовые основы метрологии	4
1.2. Организационно-практическая деятельность по обеспечению единства измерений в РФ	6
1.3. Государственная система обеспечения единства измерений	8
Литература к главе 1	9
Глава 2. Шкалы измерений	9
2.1. Соотношения понятий мера, единица и шкала измерений	9
2.2. Классификация измеряемых свойств	11
2.3. Общие принципы измерения свойств	17
2.4. Основы теории шкал измерений	19
Литература к главе 2	23
Глава 3. Единицы измерений и их системы	23
3.1. История развития систем единиц	23
3.2. Принципы построения систем единиц измерений	24
3.3. Размерность измеряемых величин и единиц измерений	24
3.4. Международная система единиц – SI	25
3.5. Другие системы единиц измерений	32
3.6. Внесистемные и безразмерные единицы	32
3.7. Системы единиц измерений и ФФК	35
Литература к главе 3	36
Глава 4. Показатели точности измерений	37
4.1. Регламентированные показатели точности измерений	37
4.2. Международное Руководство по выражению неопределенности в измерениях	38
4.2.1. История появления Руководства	38
4.2.2. Структура Руководства	39
4.2.3. Сравнительный анализ Руководства и нормативных документов отечественной Государственной системы измерений (ГСИ)	40
4.2.4. Проблемы, не нашедшие отражения в Руководстве	45
4.2.5. Заключение	46
4.3. Принципы правильного применения понятий "неопределённость измерений" и "погрешность измерений"	46
4.3.1. Описание ситуации	46
4.3.2. Различие смысла понятий «неопределенность измерений» и «погрешность измерений»	47
4.3.3. Разъяснение определений неопределенности и погрешности	47
4.3.4. Варианты применения понятий: неопределенность и погрешность	48
4.4. Особенности представления результатов измерений в шкалах различных типов. .	50
4.4.1. Общие закономерности	50
4.4.2. Конкретные рекомендации по шкалам различных типов	51
4.4.3. Выводы и рекомендации	53
Литература к главе 4	55
Глава 5. Средства измерительной техники	57
5.1. Средства измерений, испытаний и вспомогательные принадлежности	57
5.2. Меры количественных и качественных свойств	59
5.3. Измерительные преобразователи	61
5.4. Средства сравнения, компараторы	62
5.5. Характеристики средств измерений	64
5.6. Выбор методов измерений	64
Литература к главе 5	66

Глава 6. Эталоны	67
6.1. Общая характеристика эталонов.	67
6.2. Метрологические исследования, сличения и поверки эталонов	70
6.3. Пути оптимизации национальной эталонной базы	73
Литература к главе 6	76
Глава 7. Шкалы измерений в прикладной метрологии	76
7.1. Общие вопросы реализации шкал измерений	76
7.2. Шкалы времени, частоты и больших длин	83
7.3. Шкалы пространственных свойств	86
7.4. Шкалы механических величин	89
7.5. Шкалы температуры и теплофизических величин	94
7.6. Шкалы электрических, магнитных и электромагнитных величин	96
7.7. Фотометрические, колориметрические, сенситометрические и оптические шкалы . . .	97
7.8. Акустические шкалы	105
7.9. Шкалы величин, характеризующих ионизирующие излучения	114
7.10. Шкалы физико-химического состава и свойств веществ	115
7.11. Некоторые специальные шкалы, используемые в науке, технике и производстве .	122
7.12. Шкалы, используемые в информационных технологиях	125
Литература к главе 7.	129
Глава 8. Некоторые проблемы прикладной метрологии	131
8.1. Общие замечания о методиках выполнения измерений	131
8.2. Метрологическая экспертиза технологий на основе теории шкал измерений	136
8.3. Поверка и калибровка средств измерений	137
Литература к главе 8	141
Приложение. Основные метрологические термины и определения применительно к теории шкал измерений	142.

ВВЕДЕНИЕ

Побудительными причинами для написания предлагаемого читателям руководства по общим вопросам метрологии явились процессы, происходящие в ней на рубеже третьего тысячелетия. К ним относятся: появление первого в истории России закона об обеспечении единства измерений, по-новому трактующего практику законодательной и прикладной метрологии; происходящий (и еще не закончившийся) процесс разработки подзаконных актов, установление сфер государственного метрологического контроля и надзора и осмысление, в этой связи, роли и границ применимости международной системы единиц – SI; необходимость использования наиболее общей методологии, пригодной для получения результатов измерений не только количественных, но и качественных свойств объектов; необходимость применения оценок не только погрешностей, но и неопределенностей результатов измерений.

Анализ создавшейся ситуации привел авторов к выводу, что наиболее подходящей основой для адекватности трактовки всех перечисленных процессов является теория шкал измерений. Теория шкал измерений является более общей понятийной системой (метасистемой) по отношению к системе метрологических понятий, соответствующих измерениям только пропорциональных и аддитивных величин. Поэтому используемые в книге определения известных терминов не противоречат общепринятым, но являются более общими для получения возможности использования их применительно к шкалам любого типа. Изложение основ метрологии с позиции этой теории и является основным отличием данной книги от других трудов по общим вопросам метрологии. Написание книги стало возможным после развития теории шкал до прикладного уровня. В то же время, чтобы облегчить усвоение материала книги, авторы, по возможности, старались сохранить традиционное для монографий по метрологии построение. Ее задача – не ломать созданное трудами нескольких поколений метрологов здание метрологии, а сделать необходимые расширительные обобщения и дополнения, помочь более глубоко и логически обоснованно осмыслить ее положения, теоретические основы и практические приемы.

Книга не претендует на роль универсального справочника по метрологии. Ее задача – скорее ориентировать читателя в современной метрологии и множестве нормативных документов.

Авторы рассчитывают на контингент читателей из метрологов среднего звена, инженеров-приборостроителей, сотрудников ГМС. Поэтому сознательно опущены «экзотические» методы и способы анализа и расчета погрешностей и неопределенностей измерений, с которыми метролог высшей квалификации может встретиться один-два раза за всю свою карьеру.

Обращаем внимание читателей на приложение к этой книге, в котором даны определения основных метрологических терминов. Эти определения отличаются от общеизвестных большей общностью и сформулированы так, чтобы соответствующие термины были применимы к шкалам измерений различных типов (метрических и неметрических). Поэтому при чтении книги рекомендуем обращаться к этому приложению для понимания смысла используемых терминов.

Глава 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТРОЛОГИИ

1.1. Научные и правовые основы метрологии

Накопленные человечеством знания, в сущности, едины и классификация их на различные научные и прикладные дисциплины носит условный характер, т.к. провести четкие границы между ними невозможно, да в этом и нет принципиальной необходимости. Конечно, такая классификация практически полезна для формирования методологических особенностей дисциплин, но вопрос о классификационной принадлежности какой-либо дисциплины приобретает поэтапную актуальность из социально-конъюнктурных соображений (условий) ее развития.

На сегодняшний день в ряду научных и практических дисциплин фигурирует и метрология. Существует несколько определений этой дисциплины. Наиболее адекватно следующее: метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Современная метрология является синтетической дисциплиной, включающей в себя научный, практический и административно-правовой аспекты.

Развитие теорий и их практическое применение немыслимо без первичной информации, полученной путем измерений в процессе научного познания. Таким образом, метрология является такой научной дисциплиной, на достижения, средства и методы которой опираются в своем развитии как фундаментальные, так и прикладные научные направления. Измерения распространены в различных областях деятельности так же широко, как и математические методы. Более того, математика и метрология рождались, формировались и развивались в тесной взаимосвязи, современная теория измерений (теория шкал) серьезно математизирована и разделы метрологии, использующие положения этой теории, имеют все признаки математической дисциплины (с аксиомами, теоремами и леммами), опирающейся на теорию множеств, аппарат математической статистики и теорию вероятности. В части методов измерений, установления и воспроизведения размера единиц и шкал измерений метрология тесно взаимосвязана с естественными науками (физикой, химией). Эту часть метрологии принято называть фундаментальной или теоретической.

Практическая (прикладная) часть метрологии, занимающаяся разработкой и применением эталонов единиц и шкал измерений всех уровней и реализацией единства измерений в стране, имеет признаки технической дисциплины (приборостроения).

Развитие экономики, как в рамках одной страны, так и на международном уровне, невозможно без унификации единиц и шкал измерений, государственного узаконения средств измерений, т. к. без этого невозможна сопоставимость и признание результатов измерений, выполняемых различными исполнителями; взаимозаменяемость деталей и устройств, выпускаемых на разных предприятиях; нормальная работа средств связи, т.е. всего того комплекса вопросов, который укладывается в понятие единство измерений. Другими словами, единство измерений обеспечивается, когда применяются узаконенные средства измерений, результаты измерений выражаются в узаконенных единицах и шкалах измерений, а погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью. Все эти вопросы решаются законодательной частью метрологии, которая осуществляется государственными органами.

Таким образом, метрология является многогранной дисциплиной со своей методологией, не имеющей аналогов в других научных дисциплинах. Несколько условно принято различать законодательную, теоретическую и прикладную метрологию. Рассмотрим несколько более подробно задачи и функции этих разделов метрологии.

Законодательная метрология. Проблема обеспечения необходимой точности и достоверности измерительной информации, которая используется в управлении экономикой, была и остается одной из первостепенных государственных задач. В Российской Федерации основы законодательной метрологии на государственном уровне закреплены статьей 71 Конституции РФ, а основные принципы метрологической деятельности определены Законом РФ «Об обеспечении единства измерений», устанавливающим необходимые организационные, экономические и правовые вопросы метрологической деятельности в стране, в том числе деятельность Государственной метрологической службы, государственное управление которой возложено законом на Госстандарт России.

Положения Закона РФ «Об обеспечении единства измерений» развиваются постановлениями Правительства РФ, в частности, Постановлением от 12 февраля 1994 г., № 100, которым установлен порядок проведения и организации работ в области обеспечения единства измерений и утверждены четыре нормативных акта: «Положение о государственных научных метрологических центрах»; «Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений»; «Порядок утверждения положений о метрологических службах феде-

ральных органов исполнительной власти и юридических лиц»; «Положение о метрологическом обеспечении обороны в Российской Федерации». Постановлением Правительства РФ от 16.05.2003 г. «Об утверждении Положения об организации и осуществлении государственного контроля и надзора в области стандартизации, обеспечения единства измерений и обязательной сертификации» утвержден перечень платных работ и услуг, выполняемых федеральными государственными учреждениями, находящимися в ведении Госстандарта России. *(С 2008 г. необходимо руководствоваться положениями Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» от 26 июня 2008 г., № 102-РФ и соответствующими ему подзаконными актами, которые имеют отличия от изложенных в книге законодательных положений предыдущего закона от 28 апреля 1993 г. № 4871-1)*

Следующим уровнем подзаконных актов законодательной метрологии является комплекс нормативных документов Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

Теоретическая метрология. Ее предметами являются: разработка теоретических основ измерений, принципы построения эталонов шкал и единиц измерений; исследования по применению для целей точных измерений фундаментальных физических констант и характеристик внутриатомных процессов; совершенствование понятийной базы метрологии, системы единиц измерений и метрологической терминологии; разработка научных основ государственной системы обеспечения единства измерений.

Решением проблем фундаментальной метрологии в России занимаются в основном Государственные научные метрологические центры (ГНМЦ) Госстандарта России, которые в необходимых случаях кооперируются с институтами РАН и научными учреждениями других ведомств.

Прикладная (практическая) метрология. Это наиболее обширное поле деятельности по практическому внедрению и применению достижений теоретической метрологии в повседневной метрологической практике, по передаче шкал и размеров единиц измерений от государственных эталонов рабочим средствам измерений, решению задач поддержания рабочих средств в надлежащем состоянии, воплощению в практику требований и норм законодательной метрологии с целью практического обеспечения единства измерений в стране.

Задачи прикладной метрологии решаются ГНМЦ, органами Государственной метрологической службы, а также метрологическими службами Государственных органов управления и метрологическими службами юридических служб.

Нередко возникают дискуссии на тему: «Где начинается метрология?» Можно ли относить к метрологии измерения, выполняющиеся на рабочих местах различных предприятий, в розничной торговле, в быту? В некоторых руководствах по метрологии авторы дистанцируются от этих областей выполнения измерений, считая их не относящимися к метрологии. Ответ нужно искать в определении предмета метрологии, все построение которой направлено на достижение единства и достаточной точности всего многообразия измерений в различных сферах деятельности. Поэтому любые измерения должны быть предметом метрологии.

Эффективность любых банков данных, информационных и любых современных высоких и критических технологий прямо зависит от качества первичной, исходной измерительной информации. Последующая обработка (переработка), хранение и поэтапная передача информации по ходу технологического процесса не могут устранить дефекты или недостаточность первичной входной информации.

Получение достоверной измерительной информации невозможно без привлечения обширного арсенала метрологии, начиная от рабочих средств измерений, их прослеживаемости до государственных эталонов единиц и шкал измерений и кончая методическими приемами выполнения измерений, обработки результатов, оценки их достоверности. Совокупность средств и методов метрологии по существу является во всех сферах деятельности технологией для получения достоверной первичной информации о количественных или качественных свойствах исследуемых объектов или явлений. С каждым годом сфера использования метрологии расширяется. Она давно вышла за рамки так называемых точных наук и промышленных специальностей. Причем фактически измерения выполняются с использованием как метрических, так и множества стандартизованных неметрических шкал (см. гл. 2). Измеряют биологи (современная генетика немыслима без точных измерений), врачи различных специальностей, экономисты, банковские специалисты. Стали появляться интеллектуальные средства измерений и новые измерительные процедуры вплоть до "статистических" и "мягких" измерений, которые не укладываются в рамки классической теории измерений. При этом в практику метрологии начинают входить такие понятия, как "нечеткая логика", "нейронные сети", "генетические алгоритмы". Идет процесс взаимного проникновения репрезентативной теории измерений (теории шкал измерений), информационной теории измере-

ний, теорий нечеткой логики, нечетких ограничений, гранулирования нечеткой информации и др. Актуальным становится энтропийный подход к оценке точности результатов измерений.

Уместно напомнить о тесной связи метрологии и кибернетики. Теснейшее взаимопроникновение и обогащающее влияние кибернетики и метрологии обуславливаются, прежде всего, единством целей, на достижение которых они объективно направлены. Более того, нельзя говорить о проблемах и задачах кибернетики, не используя при этом метрологические термины. Следует упомянуть и еще об одном методологическом сходстве метрологии, кибернетики и информатики: как метрология исходит из признания неизбежности присутствия неопределенностей (погрешностей) в результатах измерения, ставит задачу свести к минимуму их влияние, так и информатика исходит из того, что при передаче информации неизбежны помехи, искажающие информацию или вносящие ошибки в системы управления различными объектами. Это свидетельствует о глубоком внутреннем родстве этих двух наук.

И, наконец, все чаще перед метрологами встают задачи обеспечения достоверности измерений в сложных информационных системах, достигающих в ряде случаев глобальных размеров и объединяющих результаты измерений сотен различных параметров, известных с разной полнотой. Типичным примером являются системы экологического мониторинга, предупреждения о сейсмических явлениях и т.п.

В последние годы начался качественно новый этап развития мировой системы измерений. Появилось многостороннее Соглашение о взаимном признании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки средств измерений. Признание национальных эталонов может состояться только в результате достаточно успешного участия их в международных ключевых сличениях. Выпущено от имени самых авторитетных международных организаций Руководство по выражению неопределенности результатов измерений всех уровней точности (от рядовых технических измерений до эталонных измерений). Новые взгляды на природу неопределенностей в измерениях тесно связаны с общей тенденцией развития информатики.

В современной теории измерений (теории шкал измерений) присутствуют признаки общей теории кодирования информации в части кодирования информации о проявлениях различных свойств в конкретных объектах наблюдения. Кроме того, теория шкал измерений может играть роль единой методологической основы для охвата большинства информационных технологий, начиная со способов получения первичной информации и кончая алгоритмами принятия решений. Такая методология позволяет исключать из информационных технологий неправомерные суждения.

Для участия в новом этапе развития мировой системы измерений и обеспечения независимости государства в части получения необходимой и достаточно достоверной измерительной информации необходима модернизация государственной системы измерений на всех уровнях ее структуры (от национальной эталонной базы до рядовых измерений) и во всех аспектах (концептуальном, понятийно-терминологическом, методологическом, методическом). Настоящая монография призвана способствовать этому процессу.

1.2. Организационно-практическая деятельность по обеспечению единства измерений в Российской Федерации

Согласно закону РФ «Об обеспечении единства измерений» в социально значимых, а также важнейших для государства сферах деятельности таких, как: здравоохранение; ветеринария; охрана окружающей среды; безопасность труда; торговые операции и взаимные расчеты; государственные учетные операции; обеспечение обороны страны; геодезические, геологические и гидрометеорологические работы; банковские, налоговые, таможенные и почтовые операции; производство продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд; испытания и контроль качества продукции на соответствие обязательным требованиям стандартов; обязательная сертификация продукции и услуг, а также в ряде других случаев, единство измерений обеспечивается осуществлением Государственного метрологического контроля и надзора (ГМКиН) за соблюдением установленных законодательной метрологией метрологических правил и норм.

Управленческая функция ГМКиН осуществляется Государственной метрологической службой Госстандарта России, включающей в себя:

- государственные научные метрологические центры (ГНМЦ), осуществляющие создание, совершенствование, хранение и применение государственных эталонов шкал и единиц измерений, а также разработку нормативных документов по обеспечению единства измерений. ГНМЦ, как правило, аккредитованы в качестве Государственных центров испытаний средств измерений (ГЦИ СИ);

– органы Государственной метрологической службы на территориях республик в составе РФ, автономных областей, округов, краев, областей (центры стандартизации и метрологии – ЦСМ), а также центры испытаний и сертификации городов Москвы (Ростест-Москва) и С.-Петербурга (Тест-С.-Петербург), осуществляющие государственный метрологический контроль и надзор на своих территориях.

Государственный метрологический контроль включает: испытания (в ГЦИ СИ) и утверждение типа СИ, допускаемых к применению в перечисленных выше сферах; поверку средств измерений при выпуске из производства и ремонта, а также находящихся в эксплуатации; лицензирование деятельности юридических и физических лиц по изготовлению и ремонту СИ.

Государственный метрологический надзор осуществляется: за выпуском, состоянием и применением СИ; за применением аттестованных методик выполнения измерений (МВИ); за эталонами единиц величин и шкал измерений, за соблюдением метрологических правил и норм; за количеством товаров, отчуждаемых при совершении торговых операций; за количеством фасованных товаров в упаковках любого вида при расфасовке и продаже.

Государственный метрологический надзор осуществляют должностные лица Госстандарта России – главные государственные инспекторы по обеспечению единства измерений. Государственные инспекторы, осуществляющие поверку средств измерений, подлежат аттестации в качестве поверителей. Права, обязанности и ответственность государственных инспекторов регламентированы Законом РФ «Об обеспечении единства измерений».

Госстандарту РФ предоставлено законом право аккредитации в качестве ГЦИ СИ специализированных организаций, а также аккредитации метрологических служб юридических лиц на право поверки средств измерений. Поверочной деятельностью в этих метрологических службах имеют право заниматься лица, аттестованные в качестве поверителей с участием органа Государственной метрологической службы.

Государственные органы управления РФ, а также предприятия, организации, учреждения, являющиеся юридическими лицами, могут создавать в необходимых случаях, в установленном порядке метрологические службы для выполнения работ по обеспечению единства и требуемой точности измерений и для осуществления метрологического контроля и надзора на подведомственных предприятиях. При выполнении работ в сферах деятельности, на которые распространяется ГМКИН, создание метрологических служб или иных структур по обеспечению единства измерений является обязательным.

Обеспечение единства измерений в сферах деятельности, на которые не распространяется ГМКИН, является заботой юридических и физических лиц, выпускающих, ремонтирующих, ввозящих по импорту СИ, а также эксплуатирующих эти СИ. Средства измерений, применяемые в этих сферах, не подлежат обязательным испытаниям с целью утверждения типа и последующей поверке, тем не менее, по желанию владельца они могут быть подвергнуты калибровке, т.е. совокупности операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению.

Калибровка СИ проводится метрологическими службами юридических лиц с использованием рабочих эталонов, соподчиненных государственным эталонам единиц и шкал измерений. При калибровке собственных СИ метрологическими службами юридических лиц не требуется их аккредитация на право выполнения этих работ. В случае, когда метрологическая служба юридического лица намерена проводить калибровку СИ для сторонних организаций, она должна быть аккредитована на право проведения калибровочных работ Государственным научным метрологическим центром или органом Государственной метрологической службы. В этом случае метрологическим службам юридического лица предоставляется право выдавать сертификат о калибровке от имени органов и организаций, которые их аккредитовали.

Государственные научные метрологические центры, аккредитованные на право поверки, и органы Государственной метрологической службы также имеют право калибровки СИ. Совокупность государственных научных метрологических центров, органов Государственной метрологической службы, метрологических служб государственных органов управления и аккредитованных на право калибровки метрологических служб юридических лиц образуют добровольную Российскую систему калибровки, структуру, функции, обязанности, права и ответственность которой установлены Правилами по метрологии ПР 50.2.017-95.

Разработчики, изготовители, импортеры и владельцы средств измерений, предназначенных для применения вне сфер ГМКИН с целью обеспечения единства измерений, имеют возможность на добровольной основе сертифицировать эти средства измерений в Системе сертификации средств измерений России. Основные положения и порядок работы системы сертификации

средств измерений определены рекомендацией МИ 2277. Основной задачей Системы сертификации средств измерений является: проверка и подтверждение соответствия средств измерений установленным в распространяющихся на них нормативных документах метрологическим нормам и требованиям; проверка обеспеченности сертифицируемых средств измерений методами и средствами калибровки и передачи шкал и размеров единиц измерений от утвержденных Госстандартом России эталонов; проверка соответствия средств измерений дополнительным требованиям, указанным Заявителем. Система сертификации средств измерений является открытой для вступления и участия в ней юридических лиц в установленном порядке.

Метрологические службы Государственных органов управления Российской Федерации, а также юридических лиц осуществляют метрологический контроль и надзор в пределах своей компетенции.

1.3. Государственная система обеспечения единства измерений

Государственное управление деятельностью по обеспечению единства измерений осуществляет Госстандарт России (статья 4 закона РФ «Об обеспечении единства измерений») на основе создания на межотраслевом уровне правовых, нормативных, организационных, технических и экономических условий, необходимых для решения задач, направленных на охрану прав и законных интересов граждан и установленного метрологического правопорядка, содействия экономическому и социальному развитию страны защитой от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

Основные положения Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) в стране определены государственным стандартом Российской Федерации – ГОСТ Р 8.000-2000, который возглавляет комплекс нормативных документов этой системы.

ГСИ состоит из следующих подсистем: правовой, технической, организационной и, таким образом, объединяет деятельность законодательной, теоретической и прикладной метрологии на решение целей единства измерений.

Правовой подсистемой ГСИ является комплекс взаимоувязанных законодательных и подзаконных актов, в том числе межотраслевых, нормативных документов, объединенных общей целевой направленностью и устанавливающих согласованные требования ко всем сторонам метрологической деятельности.

К настоящему времени массив нормативных документов ГСИ насчитывает около 2500 наименований нормативных документов (НД). В том числе межгосударственные стандарты и рекомендации (ГОСТ, РМГ), стандарты Российской Федерации (ГОСТ Р...), правила (ПР 50.2...) и рекомендации (Р 50.2...) Госстандарта России, рекомендации ГНМЦ (МИ), а также методические указания (МУ) и инструкции (И), утвержденные в 50-60 гг. прошлого века. Предметы регламентирования этими документами исключительно многообразны: от технических и методических требований в области метрологии до вопросов компетенции и правового статуса тех или иных структур метрологических служб и норм, определяющих порядок и организацию проведения метрологических работ разных видов и направлений.

Комплекс этих нормативных документов постоянно обновляется, приводится в соответствие с законодательными актами правительства РФ, международными стандартами, рекомендациями МОЗМ, достижениями теоретической метрологии и практическими потребностями.

В соответствии с Федеральным Законом от 27.12.2002 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании», очевидно, часть НД ГСИ будет переработана в технические регламенты.

Техническую подсистему ГСИ составляет комплекс эталонов единиц величин и шкал измерений, совокупность стандартных образцов, утвержденных в установленном порядке; совокупность стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

К технической подсистеме относится также совокупность научно-исследовательских метрологических институтов, испытательных, поверочных, калибровочных лабораторий Госстандарта России.

Организационную подсистему ГСИ составляют: Государственная метрологическая служба, метрологические службы федеральных органов исполнительной власти и юридических лиц, в том числе метрологической службы Вооруженных Сил РФ. К организационной подсистеме относятся также: Государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), Государственная служба стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов (ГССО), Государственная служба стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов (ГСССД).

Литература к главе 1

1. Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» от 28 апреля 1993 г. №4871-1
2. Постановление Правительства РФ от 16.05.2003 г. «Об утверждении Положения об организации и осуществлении государственного контроля и надзора в области стандартизации, обеспечения единства измерений и обязательной сертификации»
3. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология на рубеже третьего тысячелетия // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2001. – № 1. – С. 36–37. – №2. – С. 33–36
4. ГОСТ Р 8.000-2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные положения
5. ПР 50.2.017-95. Государственная система обеспечения единства измерений. Положение о Российской системе калибровки
6. МИ 2277-93. Государственная система обеспечения единства измерений. Система сертификации средств измерений. Основные положения и порядок проведения работ
7. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд. стандартов. – 1991. – 79 с.
8. Брянский Л.Н. Российская метрология и российские метрологи // Законодательная и прикладная метрология. – 1996. – №4. – С. 51–52
9. Брянский Л.Н. Метрология и истоки точных наук // Законодательная и прикладная метрология. – 1996. – №6. – С. 53–54
10. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Главный метролог – лицо государственное // Главный метролог. – 2002. – №2. – С.18-19
11. Брянский Л.Н. Непричесанная метрология. – М.: Поток-Тест. – 2002. – 160 с.
12. Федеральный Закон от 27.12.2002 г. №184-ФЗ «О техническом регулировании»

Глава 2 ШКАЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Соотношения понятий мера, единица и шкала измерений

Метрология начиналась с материальных мер. Эта простая истина подтверждается всеми историческими памятниками (овеществленными и письменными), связанными с ее историей. Вавилонская (Халдейская) система измерений была системой мер, она опиралась на вещественные, рукотворные, конкретные меры длины и веса (массы). Такой же была и древнеегипетская система и все позднейшие системы мер. Конкретное (а не абстрактное) мышление, по-видимому, было свойственно человечеству на ранних ступенях его развития. И в наши дни дети проходят эту стадию, свободно считая предметы (игрушки, конфеты и т.п.), но еще не умея оперировать абстрактными числами. По мере развития человеческого общества, и метрологии в частности, конкретное понятие о мере постепенно дополнялось (и во многих случаях заменялось) абстрактным понятием "единица измерений", совсем не обязательно жестко связанным с конкретной мерой.

Долгое время конкретными, предметными были не только системы, но и различные Указы, Постановления и другие распоряжения императоров, князей, правительств. Вот несколько примеров из истории отечественной метрологии: "Мерам и весам быть равными; хлебные меры делать с железными обручами...." (Указ царя Алексея Михайловича, 1649 г.); "В Адмиралтействе иметь весы правдивые..., а также меры медные и аршины, с обоих концов заклеянные..." (Указ Петра I от 10.12.1722 г.); "Об учреждении при С.– Петербургском Монетном дворе собрания образцовых мер и весов главнейших иностранных государств" (Высочайше утвержденная записка министра финансов от 13.12.1829 г.); "О системе Российских мер и весов" (Именной указ Сенату от 11.10.1835 г.). И, тем не менее, если рассмотреть старинные системы мер подробнее, то и в них можно обнаружить "меры без мер". Во все времена существовали меры фута, локтя (локтей), весового таланта. Но нигде, например, не попадаются сведения о существовании меры стадия (мерной веревки или цепи, длиной около 185 м).

Судя по египетским иероглифам, самая длинная мерная веревка содержала сто локтей (около 50 м). Об отсутствии меры, равной стадии, косвенно свидетельствует и большой разброс его значений, примерно от 155 до 210 м, употреблявшихся в одно и то же время. В довольно широком ассортименте изготавливались и использовались меры объема. А вот с мерами площади дело обстояло совсем по-другому. Их, по-видимому, не было совсем, так сказать "по ненадобности". Хотя и здесь не все так просто.

В российских системах мер существовали меры фута, аршина, сажени. Никогда не материализовывали в виде меры размер версты. Существовал ряд мер массы (веса): золотника, фунта (гривны), пуда. Наибольшая из известных эталонных гирь имела (если судить по имеющимся в

Государственном Эрмитаже и музее ВНИИМ им. Д. И. Менделеева наборам) массу, равную двум пудам. Гири массой в берковец (163,8 кг) и тем более в ласт (примерно 1179 кг), по-видимому, никогда не изготавливались. В защиту российской системы мер, скажем, что и берковец и ласт содержали целое число пудов (10 и 72). Поэтому можно было обходиться двухпудовиками. Имелся целый набор мер объема от бутылки до ведра (12,29904 л) и до бочки, равной 40 ведам.

Единицы площади не имели мер и в русской системе. Хотя в сознании создателей системы эти меры, безусловно, "витали". Показательна, в этом смысле, история десятины. Вплоть до конца XVII века под десятиной понимали не просто меру площади земли, а ее участок вполне определенной формы: 50х50 и 40х80 сажень в XIV-XVI вв. и 30х80 сажень в XVII в. – т.е. мыслилась некая виртуальная мера в виде гигантского полотнища указанных выше размеров (естественно, никто и никогда не пытался ее материализовать). И лишь в XIX в. под десятиной стали понимать просто участок земли любой формы, площадью 2400 (или 3200) квадратных сажень. Единица окончательно абстрагировалась от меры.

Своеобразное отражение процесс становления понятия "единица измерений" нашел в известном энциклопедическом словаре Брокгауза и Ефрона. Наряду с обширной статьей "меры" в нем присутствует и статья "Единица меры – такая основная мера, которою или частями которой измеряются другие величины того же рода". А далее в этой же статье описываются абсолютная система единиц и практическая система единиц.

Достаточно показательна в этом плане и история метрических систем. Метрические системы 1791 и 1875 гг. – это, без всякого сомнения, еще системы мер, мер метра и килограмма. Очень интересны в этом плане системы Гаусса (миллиметр, миллиграмм, секунда) и СГС (сантиметр, грамм, секунда). Во-первых, что такое "мера секунды"? Размер секунды, безусловно, можно и нужно воспроизводить. А хранить в виде обычной меры проблематично. И никому не приходило в голову изготовить для системы Гаусса эталонные миллиметр и миллиграмм, а для СГС – сантиметр и грамм. Эти системы спокойно продолжали опираться, в конечном счете, на меры совсем другой системы – метра и килограмма. В процессе дальнейшего расширения метрических систем, приведшего к формированию современной международной системы единиц – SI, они "обрастали" большой совокупностью производных единиц измерений. Именно единиц, а не мер, поскольку для многих таких единиц нельзя разработать и выполнить меры. Да и основные единицы SI не все и не всегда опираются на меры. Так, например, не существует меры кельвина. Никогда не создавалась мера ампера (хотя представить себе ее можно).

Итак, по мере развития метрологии, в дополнение к понятию "мера" появилось абстрагированное от материального воплощения понятие "единица измерений" и на смену обозначения "система мер" – "система единиц измерений". Естественно, эта смена понятий несколько не умаляет значения мер, на которые метрология продолжает опираться, а является важнейшим этапом формирования теории измерений.

Процесс формирования ключевых (исходных) понятий метрологии на этом не закончился. По мере развития теоретической и прикладной метрологии, расширения сферы приложения ее принципов и практических приемов, привычное, устоявшееся определение измерения как экспериментального сравнения измеряемой величины с некоторым ее значением, принятым за единицу измерения, утратило присущую ему ранее общность. Дело в том, что к качественным свойствам и непропорциональным величинам понятие единицы измерения неприменимо.

Эти трудности снимаются при использовании положений теории шкал измерений, которая охватывает (описывает) любые измеряемые свойства – количественные (величины) и качественные, имеющие единицы измерений и не имеющие их. Можно с полным основанием утверждать, что поскольку существуют шкалы измерений без единиц, но нет единиц измерений, существующих вне соответствующих шкал, понятие «шкала измерений» является первичным и более общим по сравнению с понятием «единица измерения». Сам термин «шкала» происходит от латинского «scala» – лестница.

Прежде, чем начать изложение основных положений теории шкал, необходимо сделать следующее пояснение: термин "шкала" в отечественной метрологической практике имеет, по крайней мере, два различных значения. Во-первых, шкалой или точнее шкалой измерений называют принятый по соглашению порядок определения и обозначения всевозможных проявлений

(значений) конкретного свойства (величины). Во-вторых, шкалой называют отсчетные устройства аналоговых средств измерений. В настоящей книге термин "шкала" используется только в первом из приведенных выше значений. При использовании второго значения мы будем подчеркивать, что речь идет о шкале средства измерений.

2.2. Классификация измеряемых свойств

*Ей в приданое дано
Было зеркальце одно.
Свойство зеркальце имело:
Говорить оно умело.*
А.С.Пушкин. Сказка о мертвой
царевне и семи богатырях

То, что измеряют свойства, обычно не вызывает сомнений, так как понятие и термин "свойство" используются в определениях ключевых метрологических терминов. А вот по вопросу, какие свойства измеряют? – имеются различные мнения. Крайние точки зрения таковы: измеряют любые свойства; измеряют только количественные свойства – "физические" величины, т.е. величины, взаимосвязанные формулами физики. В зависимости от позиции в этом спектре мнений оказывается и определение границ метрологии и класса процедур, относимых к измерениям. Попробуем снять противоборствующее напряжение в этом вопросе классификацией свойств и последующим обсуждением способов использования различных классов свойств в метрологии. В общесловарном смысле "свойство – качество, признак, составляющий отличительную особенность кого-чего-нибудь" (С.И.Ожегов).

Накопленные людьми знания формируются в виде моделей объектов бытия (предметов, полей, явлений, процессов, организмов...). Смысл моделей объектов раскрывается описанием их свойств. При этом говорят о сходстве или различии свойств объектов или одного объекта в различных состояниях. Совокупность проявлений какого-либо свойства образует множество, элементы которого находятся в определенных логических соотношениях, т.е. свойство обладает определенной логической структурой. Смысл этих известных базовых понятий будет более полно раскрываться через контекст дальнейшего изложения.

Предлагаемая классификация известных свойств, составленная без претензии на исчерпывающую полноту, носит многоуровневый характер с использованием различных классификационных признаков. На первом общесмысловом уровне классификации свойства рационально (удобно) разделить на 4 класса (рис. 2.1).

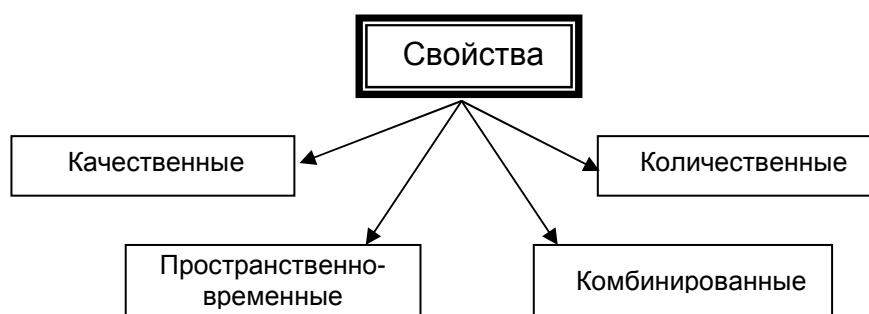


Рис. 2.1

Качественное свойство описывается множеством его проявлений, не обладающих количественным признаком, т.е. любые пары элементов этого множества могут находиться в логическом соотношении эквивалентности (условной тождественности, неразличимости) или отличия. Количественное свойство описывается множеством его количественных проявлений, т.е. любые пары элементов этого множества находятся в логическом соотношении порядка по размеру (одно проявление больше или меньше другого) или эквивалентности.

Пространственно-временные свойства выделяются в отдельный класс из-за особого, фундаментального характера пространства и времени в философских и естественнонаучных представлениях о бытии: все происходит в пространстве и времени. Во многих других свойствах присутствует пространственно-временной аспект (развитие, изменение, движение...). При этом сразу отметим, что некоторые пространственно-временные свойства относятся также к количественным свойствам, а другие – к качественным, т.е. этот класс свойств, в принципе, перекрывается двумя

предыдущими. Комбинированные свойства – это качества или признаки, описываемые совокупностями различных свойств. Перейдем к следующему уровню рассмотрения этих четырех классов свойств.

Качественные свойства. Качественные свойства подразделить на отдельные подклассы затруднительно, однако можно выделить и у них некоторые классификационные признаки: дискретность, непрерывность, неупорядоченность, упорядоченность по сходству, многомерность (рис. 2.2).

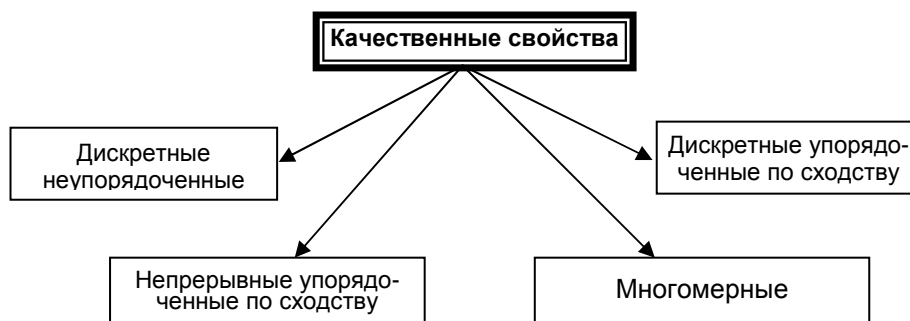


Рис. 2.2

Например, такое качественное свойство, как цвет (цветовое ощущение), в различных известных моделях обладает всеми этими классификационными признаками.

Цвет является качественным свойством потому, что не имеет смысла утверждение такого характера: какой-либо цвет больше или меньше другого; цвета либо идентичны (одинаковы), либо отличны. В моделях классификации людей по цвету волос (блондины, брюнеты, шатены, рыжие) и животных, например, лошадей по масти (вороная, сивая, бурая, гнедая, каурая, чалая, буланая, серая, пегая) цвет является дискретным неупорядоченным свойством. Наборы дискретных по цвету объектов (красок, материалов, источников света) могут обладать некоторыми признаками упорядоченности по сходству (близости), например, голубой и фиолетовый цвета ближе к синему, чем к желтому. Непрерывное упорядоченное по сходству подмножество спектрально чистых цветов являет нам радуга. Совокупность же всевозможных (для нормально цветовидящего человека) цветов различной цветности и яркости моделируется непрерывным трехмерным множеством (цветовое пространство – модельное трехмерное неевклидово пространство, в котором отсутствует мера расстояния).

Подмножества качественного свойства могут обладать и некоторыми количественными признаками, например, цвета одной цветности отличаются яркостью – количественным свойством.

Многообразие воспринимаемых человеком звуков, так же как и цветов, является многомерным качественным свойством: звуки отличаются по высоте, громкости, модуляции (вибрации, прерывистости), длительности, тембру (характерной "окраске" звука). Тембр звука описывается качественными признаками, а высота чистых тонов и громкость (уровень звука) имеют количественный характер. Однако аналогичная, как для множества цветов, общая многомерная модель для всего многообразия воспринимаемых звуков пока не создана.

Многомерными качественными свойствами также являются вкус и запах. Качественные вкусовые признаки горькости, сладости, солености, кислотности, терпкости и др. обладают некоторыми количественными признаками (например, горький и еще горше). Многообразие приятных и неприятных запахов различных оттенков тоже обладает количественным признаком силы запаха (слабый и сильный запах). Модельная структура этих свойств еще менее изучена, чем для звуков.

Качественными свойствами оперируют в многочисленных моделях идентификации и классификации: качественного химического анализа, распознавания, диагностирования, установления сортности и т.п.

Особо отметим принципиальную неперебиваемость качественных свойств в количественные свойства совершенствованием моделей их представления даже с введением в них некоторых количественных элементов. Это обусловлено общей логической особенностью качественных свойств – отсутствием соотношения "больше – меньше" (принципиальной невозможностью определить такое соотношение).

Количественные свойства – величины. Количественные свойства принято называть величинами, а различные проявления какого-либо количественного свойства называют значениями величины. Смысл термина "величина" с развитием науки подвергался ряду обобщений и, в соот-

ветствии с современными представлениями, величины удобно разбить на три подкласса (рис. 2.3).

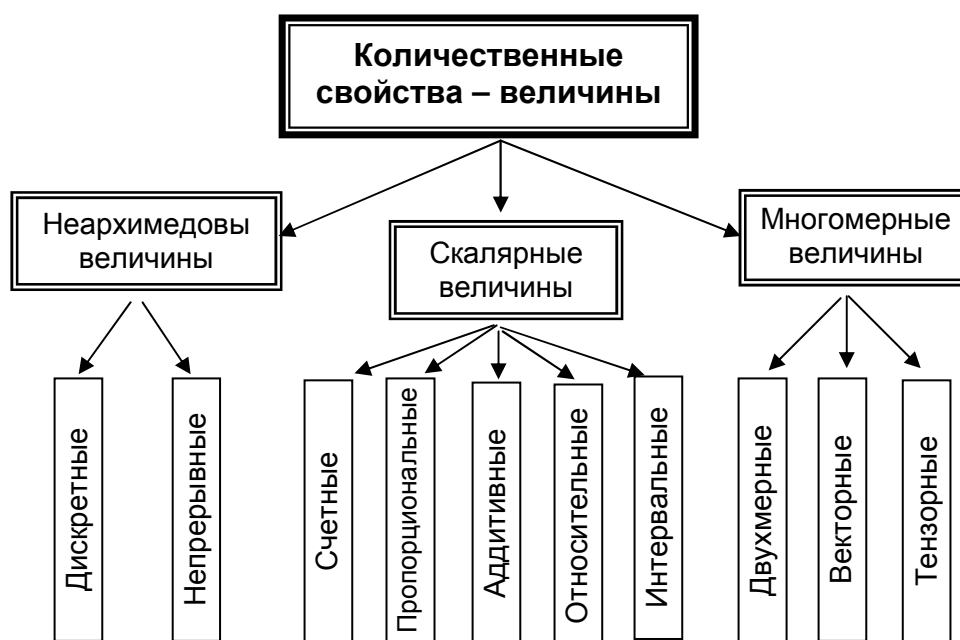


Рис.2.3

Неархимедовы величины описываются логическими соотношениями эквивалентности и порядка по размеру (“больше – меньше”), но к ним не применимо понятие пропорциональности, т.е. отсутствует возможность получения информации о том, во сколько раз одно проявление свойства больше или меньше другого проявления. Причем для неархимедовых величин не обязательно наличие нуля. В математике это выражают так: для неархимедовых величин не выполняется аксиома Евдокса (или аксиома Архимеда): каковы бы ни были величины “**a**” и “**b**” одного и того же рода, существует такое натуральное число “**n**”, что $a < nb$ при $a > b$.

Причем отсутствие пропорциональности у неархимедовых величин невозможно устранить какими-либо усовершенствованиями моделей объектов. Не следует считать, что авторы соответствующих моделей не достигли возможного уровня логической адекватности. В известных моделях встречаются как непрерывные, так и дискретные неархимедовы величины.

Наличие неархимедовых величин многими воспринимается с трудом из-за привычки оперировать только арифметическими и алгебраическими понятиями. Поэтому поясним особенность неархимедовых величин конкретными примерами.

Дискретными неархимедовыми величинами являются числа твердости по шкале Мооса, баллы силы землетрясений по шкале наблюдаемых разрушений, баллы силы ветра по шкале Бофорта и т.п. Непрерывными неархимедовыми величинами являются числа твердости по шкалам Бринелля, Роквелла, Викерса и Шора, кислотные, бромные и йодные числа, октановые и цетановые числа, числа светочувствительности фотоматериалов и т.п. Очевидна неаддитивность перечисленных здесь величин – бессмысленность операции сложения этих величин или их интервалов. Также невозможно придумать даже мысленный эксперимент для получения ответа на вопрос: во сколько раз твердость по конкретной шкале у одного образца больше, чем у другого? Можно только определить расположение этих образцов на данной шкале чисел твердости. Это свидетельствует о принципиальной невозможности установления пропорциональности неархимедовых величин, т.е. невозможности преобразования их в привычные скалярные величины какими-либо модельными усовершенствованиями.

Скалярные величины являются основным подклассом свойств, используемых для количественного описания моделей объектов. Этот подкласс подразделяется на счетные, пропорциональные, аддитивные, интервальные и относительные величины (рис.2.3). Счетные величины дискретны, т. к. выражаются положительными целыми числами для определения числа объектов в рассматриваемой реализации. Причем объекты могут быть не только однородными (эквивалентными), например, электроны, нейтроны, яблоки, но и разнородными, например, предметы партии багажа. Пропорциональные величины выражаются непрерывным множеством положи-

тельных действительных чисел, начиная с нуля. Для этих величин имеют смысл суждение «во сколько раз больше или меньше», и, следовательно, операции арифметического вычитания, умножения и деления, но не имеет смысла операция сложения. Примером пропорциональной величины является термодинамическая температура; складывать термодинамические температуры нет смысла. Аддитивные величины также выражаются непрерывным множеством положительных действительных чисел. К этим величинам применимы все арифметические операции, включая сложение, например, массы объектов даже различной природы можно складывать. Имеются скалярные величины, которые в разных ситуациях обладают признаками пропорциональных или аддитивных величин. Например, электрические сопротивления резисторов при их последовательном соединении складываются арифметически – аддитивная величина, а при параллельном соединении – правило сложения совсем другое, и суммарное сопротивление в этом случае – пропорциональная величина. Понятия о счетных, пропорциональных и аддитивных величинах содержат в себе привычное логическое представление о нуле – нулевом количестве (нулевом значении), т.е. отсутствии проявления такого свойства. Интервальные величины отличаются тем, что для них невозможно логически обоснованно определить нулевое количество – нуль, однако интервалы таких величин имеют логическую структуру пропорциональных или аддитивных величин и поэтому имеют нуль. Для самих же интервальных величин невозможна операция сложения, но возможно определение условного (принятого по соглашению) нуля, от которого отсчитываются условно положительные и отрицательные значения интервальной величины. Известным примером интервальной величины является текущее время, счисление которого ведется от условного нуля в положительную и отрицательную стороны, а интервалы времени, естественно, могут иметь нулевое значение (одновременность событий). Складывать интервалы времени можно, но складывать даты событий бессмысленно. Другой известной интервальной величиной является пространственная протяженность вдоль бесконечной прямой линии, на которой может быть обозначен условный нуль, а интервалы протяженности (расстояния, длины) имеют значения, начинающиеся с естественного нуля.

Естественной единицей измерения для счетных величин является арифметическая единица. Единицы измерения пропорциональных, аддитивных и интервальных величин устанавливаются по соглашению. Относительные величины в дополнение к признакам пропорциональных или аддитивных величин характеризуются логически предопределенными единицами измерений. Эта особенность обусловлена тем, что относительные величины являются по определению отношениями двух произвольных (не фиксированных) количественных проявлений (значений) одного и того же свойства. Такие отношения выражаются действительными числами, для которых одной единицей измерения является арифметическая единица. Относительными величинами являются разнообразные коэффициенты (пропускания, отражения, ослабления, затухания, усиления), глубина модуляции, добротность, коэффициент полезного действия, вероятность, числа Маха, Рейнольдса и др., критерии подобия и, наконец, размеры плоского и телесного углов.

Многомерные величины могут быть двухмерными, трехмерными (векторы), девятимерными (тензоры) и другой различной мерности, свойственной математическим понятиям различных видов. В этом ряду скалярные величины следует назвать одномерными. К многомерным величинам можно отнести и другие “не скалярные величины” (разного рода матрицы, тензоры более высокой мерности и др.). Для многомерных величин логическое соотношение “больше – меньше” в общем случае не имеет смысла; это соотношение имеет смысл для модулей некоторых двухмерных и трехмерных величин. Операции сложения и умножения многомерных величин имеют специфический смысл, например сумма нескольких ненулевых векторов может быть равна нулю, а произведение векторов может быть скалярным или векторным. Примерами двухмерных величин – конкретных свойств – являются: импеданс, характеризуемый совокупностью активной и реактивной составляющими (или модулем и фазой) полного сопротивления; давление крови человека, характеризуемое совокупностью, так называемых, верхнего и нижнего давлений. Трехмерными величинами (векторами) являются скорость и ускорение движения в пространстве, сила, напряженность электрического поля и т.д. В качестве конкретных примеров девятимерных величин – свойств можно привести тензоры механических напряжений, диэлектрической проницаемости, показателя преломления электромагнитного излучения (света) для анизотропных сред.

Пространственно-временные свойства. Только некоторые пространственно-временные свойства являются величинами, а в основном это такие свойства, которые невозможно назвать величинами, но и считать их рядовыми качественными свойствами нелогично из-за их явного своеобразия. Поэтому будем называть эти свойства пространственными, временными и пространственно-временными (рис. 2.4). Особенно многообразны пространственные свойства. Это

обусловлено трехмерностью и беспредельностью реального пространства. Пространственными величинами (скалярными), характеризующими размеры объектов, являются расстояние (длина), площадь и объем, обобщенные определения которых имеются в математике.

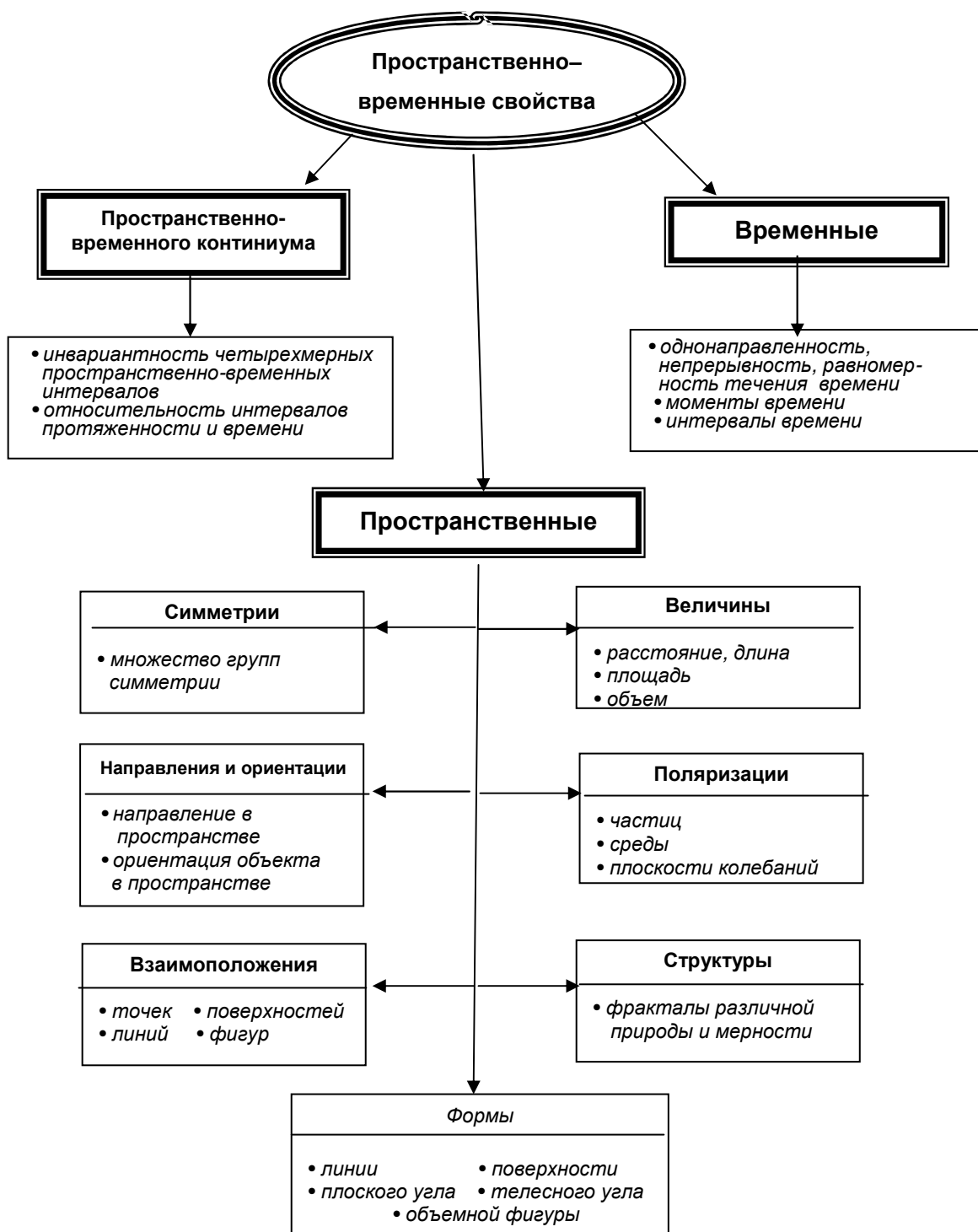


Рис. 2.4

Причем эти привычные величины относятся к линиям, поверхностям и пространственным фигурам произвольной формы. Расстояние между двумя точками в пространстве приходится считать интервалом (отрезком) на беспретельно протяженной, не имеющей нулевой точки, прямой линии, проходящей через эти точки. Может определяться длина произвольной кривой линии между двумя точками на ней, например, расстояние между населенными пунктами по железной дороге или длина отрезка эвольвентной линии на зубе шестерни.

Аналогично определяют площадь поверхности, ограниченной замкнутым контуром произвольной формы на плоскости или поверхности произвольной формы, и объем пространства (тела), ограниченного замкнутой поверхностью произвольной формы. Пространственные свойства взаимоположения, направления и ориентации, формы, симметрии, структуры и поляризации не являются величинами, т. к. для них бессмысленно логическое соотношение «больше – меньше».

Свойства взаимоположения относятся к точкам, линиям, поверхностям, и фигурам, и их комбинациям; точки могут находиться на линии, на поверхности, по одну или разные стороны поверхности (плоскости), внутри или снаружи замкнутой поверхности и т.д.; линии могут разнообразно пересекаться и скрещиваться, быть параллельными, лежать в одной плоскости или находиться на одной поверхности и т.д.; поверхности могут разнообразно располагаться относительно друг друга, касаться, пересекаться, находиться одна внутри другой и т.д. Фигуры тоже могут разнообразно располагаться в пространстве относительно друг друга (нос к носу, спина к спине, одесную – по правую руку, в колонну, в шеренгу, хаотично), касаться, пересекаться, находится одна внутри другой (матрешки, рыбки в аквариуме) и т.д.

Свойства направления и ориентации в пространстве проявляются по отношению к другим объектам: множество направлений вертикали, горизонтальной плоскости и азимутов в разных точках на Земле и в атмосфере, направление на Полярную звезду; ориентация оси вращения гироскопа, оси вращения Земли относительно плоскости эклиптики, диполей вдоль силовых линий поля и т.д.

Свойство формы (в пространстве) относится к линиям, поверхностям, объемным фигурам, плоским углам, телесным углам. Линии могут быть прямыми, кривыми, ломаными, лежащими в плоскости или на поверхности, произвольной формы в пространстве, замкнутыми, круговыми, овальными и т.д.

Поверхности могут быть плоскими, сферическими, эллиптическими, параболическими, ребристыми, волнистыми, замкнутыми, односвязными, произвольной формы. Объемные фигуры могут быть шаровыми, эллипсоидальными, яйцеобразными, многогранными, полыми, произвольной формы и т.п. Термин «плоский угол» (или просто «угол») имеет два смысла: геометрическая фигура в форме двух лучей, исходящих из одной точки и величина, характеризующая степень раскрытия лучей, образующих эту геометрическую фигуру. Поэтому можно говорить о качественном различии форм углов: острый, тупой и дополнительный к острому разного раскрытия, прямой, развернутый и полный угол, соответствующий множеству всех исходящих из точки направлений на плоскости.

Телесные углы могут иметь форму кругового или произвольного конуса, двухгранного угла с вершиной на ребре, трехгранного или многогранного конуса, полного телесного угла, соответствующего множеству всех направлений в пространстве, исходящих из точки. К тому же поверхности и фигуры могут находиться в соотношении подобия, а совокупности точек тоже могут располагаться подобным образом. Фундаментальное для природы свойство пространственной симметрии отражает соразмерность, одинаковость в расположении частей чего-нибудь по противоположным сторонам от точки, прямой и плоскости. Существуют и более сложные по расположению виды симметрии. Логическая структура этого свойства раскрывается через такие классификационные элементы, как центр симметрии, оси симметрии разного порядка N и соответствующие им повороты вокруг осей симметрии на углы $360^\circ/N$, плоскости зеркального и скользящего отражения, правые и левые винтовые оси симметрии различных порядков, одномерная трансляция применительно к полярным и неполярным бордюрам, орнаментам, лентам и другие элементы симметрии. Комбинации элементов симметрии образуют множество одномерных, двумерных и трехмерных групп симметрии. Пространственные объекты могут быть симметричными или асимметричными (с отсутствующей или нарушенной симметрией), антисимметричными. Точечные группы симметрии описывают внешнюю форму кристаллов (вид и число граней, ребер и вершин), а пространственные группы симметрии – расположение частиц (атомов, ионов, молекул) в кристаллах. Для кристаллов существует 32 точечные группы и 230 пространственных групп симметрии. Составляющие кристалл частицы могут располагаться в пространстве только в тех местах, которые им разрешены элементами симметрии данной пространственной группы. Для бордюров существует

только 7 групп симметрии. Свойство симметрии относится также к физическим явлениям и законам. Например, симметрия кристаллов предопределяет и пространственную симметрию их индикатрис (и соответствующих тензоров) показателя преломления, диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости, упругих напряжений и деформаций. Электрическое и магнитное поля имеют разную симметрию, поэтому напряженность электрического поля описывается полярным вектором, а напряженность магнитного поля – аксиальным вектором. Разнообразными сложными видами симметрии обладают животные и растительные организмы и их части. При этом для живых форм характерно еще наличие диссимметрии – невозможности совмещения фигуры с ее зеркальным изображением простым наложением. Наглядным примером диссимметричных фигур являются левая и правая кисти рук человека. Свойство пространственной структуры проявляется закономерным или хаотическим чередованием элементов одинаковой или различной формы. Множества с крайне нерегулярной разветвленной или изрезанной структурой называют фракталами различной природы и дробной мерности. Оказывается, что почти все природные образования имеют фрактальную структуру с признаками самоподобия. Различные виды проявления свойства пространственной поляризации относятся к частицам, средам, поперечным колебаниям и др. Например, поляризация атома – смещение электронов оболочки атома относительно его ядра под действием внешнего электрического поля, поляризация диэлектрика – относительное смещение противоположно заряженных частиц, входящих в состав атомов или молекул диэлектрика, под действием электрического поля. Другой пример поляризации частиц – преимущественная ориентация спинов элементарных частиц относительно направления движения их или направления магнитного поля. Плоская поляризация луча света означает то, что колебания электрического вектора во всех точках луча происходят в одной плоскости, проходящей через направление луча. Существуют также круговая и эллиптическая формы поляризации света.

Для описания пространственных свойств, не являющихся величинами, используются различные математические модели и теории: пространственные системы координат, векторное и тензорное исчисления, аналитическая геометрия, теория групп, теория фракталов, специальные вектора и матрицы (четырёхкомпонентный вектор Стокса, матрица 2 на 2 Джонса) для состояния поляризации света и др.

Принятой модели времени свойственны неограниченность в прошлое и будущее, односторонность (“стрела времени”), неповторимость моментов времени, равномерность течения, возможность определения длительности интервалов времени – скалярной аддитивной величины в инерциальной системе отсчета. Исчисление хронологии событий возможно только от условного (принятого по соглашению) нуля. В пространственно-временной модели теории относительности оперируют единым пространственно-временным континуумом, который обладает особыми свойствами: относительностью в движущихся системах отсчета интервалов пространственной протяженности (длин) и интервалов времени, но инвариантностью четырехмерных пространственно-временных интервалов, соответствующих двум событиям.

Комбинированные свойства. Комбинированные свойства (рис. 2.1) делить на подклассы не имеет смысла, т.к. они могут объединять различного рода качественные, количественные и пространственно-временные свойства для обозначения какого-либо характеризованного ими свойства. Например, потребительское свойство хлебобулочных изделий определяется составом муки и добавок, технологическими параметрами приготовления теста и выпечки, цветом, вкусом, запахом, пространственной формой, твердостью, черствостью, датой выпечки, ценой и др. Состояние погоды характеризуется совокупностью таких показателей: давление, температура, влажность, скорость и направление ветра, степень и вид облачности, концентрация и вид аэрозолей, количество и вид осадков и др. Состояние здоровья характеризуется температурой тела, давлением крови, показателями зрения, слуха, двигательных и психологических реакций, личным ощущением своего состояния и многим другим. Такого рода многомерные комбинированные свойства не могут быть величинами, поэтому приходится классифицировать их как качественные свойства, даже если в совокупность показателей входят и величины (количественные свойства). Поэтому, в принципе, можно бы обозначить их подклассом качественных свойств. Комбинированные свойства принципиально невозможно сводить к одномерным величинам без искажения их логической структуры.

2.3. Общие принципы измерения свойств

Измерение, оценка какого-либо свойства становится возможной только после установления (принятия по соглашению) шкалы измерений (см. 2.4), отображающей логическую структуру модели этого свойства на систему чисел или других знаков. По сути, установление шкалы измерений свойства означает соглашение о системе кодирования первичной измерительной инфор-

мации, о проявлениях этого свойства в различных объектах. По теории шкал измерений качественным свойствам соответствуют шкалы наименований, которые могут быть неупорядоченными, упорядоченными многомерными. Неархимедовым величинам соответствуют дискретные и непрерывные шкалы порядка. Скалярным величинам, пространственным величинам, интервалам времени и текущему времени соответствуют метрические шкалы (пропорциональные и аддитивные шкалы отношений, шкалы разностей) и дискретные (счетные) и непрерывные абсолютные шкалы. Многомерным величинам соответствуют многомерные шкалы, объединяющие шкалы скалярных величин. Пространственным свойствам, не являющимся величинами, соответствуют дискретные и непрерывные многомерные шкалы наименований. Комбинированным свойствам соответствуют многомерные шкалы наименований, состоящие из совокупности шкал различных типов. Сам факт наличия знаний обо всех рассмотренных в классификации свойствах свидетельствует о существовании для них достаточно определенных и применяемых шкал измерений.

Очевидно, что не все способы получения знаний, сведений, данных называют измерениями. Обычно изучение, исследование, идентификацию, оценку, определение свойств предпочитают не называть измерением, особенно, если эти действия осуществляются без экспериментов с использованием специальных технических устройств. Конечно, далеко не все шкалы измерений используются в инструментальной метрологии – измерениях с применением поверенных или калиброванных средств измерений. Однако конкретное рассмотрение фактического содержания прикладной метрологии показывает, что практически все классы и подклассы свойств в какой-то степени охвачены инструментальной метрологией. Это показано на некоторых примерах в табл. 2.1. Из представленных в таблице примеров видно, что прикладная метрология не ограничивается измерениями только "физических" величин.

Свойства, охваченные инструментальной метрологией

Таблица 2.1

1	2	3
Качественное многомерное свойство	Цвет объекта	Трехканальные колориметры для измерений в трехмерной шкале координат цвета МКО. Компараторы цвета и эталонные образцы цвета. (Существуют государственный эталон и поверочная схема)
Неархимедовы величины	Твердость материалов	Твердомеры различных видов для измерений твердости по шкалам Бринелля, Роквелла, Виккерса и Шора (Существуют государственные эталоны и поверочные схемы)
	Детонационная стойкость бензинов	Октаномеры — приборы для измерения октанового числа по стандартизированной методике
	Хлебопекарное качество муки	Стандартизованные приборы для измерения по стандартной методике числа падения, характеризующего качество муки
Счетные величины	Число объектов, событий	Счетчики объектов (изделий, событий), применяемые в учетных операциях (узаконенные единицы счета занесены в ОКЕИ — Общероссийский классификатор единиц измерений)
Пропорциональные величины	Плотность вещества	Плотномеры, ареометры, спиртомеры, нефтенсиметры и др.
	Давление	Манометры, барометры и др.
	Вязкость	Вискозиметры
Интервальные величины	Текущее время	Хронометры, часы, сверяемые по сигналам времени от государственного эталона национальной шкалы времени
	Расстояние от столицы по железным дорогам	Геодезические приборы, приборы для измерения расстояний (протяженности) от условной нулевой точки
	Температура по шкале Цельсия	Термометры
Аддитивные величины	Масса	Весы и гири
	Энергия	Счетчики электроэнергии и др.
	Освещенность	Люксметры
	Интервалы времени	Измерители длительности функционирования телефонных соединений, таймеры и др.
Относительные величины	Интервалы протяженности (длины)	Линейный мерительный инструмент, длинометры, рулетки, дальнометры и др.
	Коэффициент пропускания света	Фотометры
	Глубина амплитудной модуляции сигналов	Модулометры
	Размер плоского угла	Угломерные приборы

Продолжение таблицы 2.1

Многомерные величины	Полное электрическое сопротивление (импеданс)	Приборы для измерения совокупности активной и реактивной составляющих (модуля и фазы) полного сопротивления — двумерной величины
	Механическая сила	Трехкомпонентные силоизмерительные приборы для измерения трех составляющих силы по осям выбранной системы координат или модуля силы и двух плоских углов, характеризующих ее направление в выбранной системе координат
	Скорость летательного аппарата	Навигационные приборы для измерения модуля скорости и плоских углов, характеризующих направление движения в системе координат
Свойства пространственной формы	Плоскостность поверхности	Контрольно-измерительные приборы для измерения плоскостности (отклонения от плоскости)
	Сферичность поверхностей оптических деталей	Эталонные пробные стекла, используемые для наблюдения и подсчета интерференционных полос при наложении на контролируемую поверхность
	Эвольвентная форма поверхностей зубчатых зацеплений	Специальные контрольно-измерительные приборы (эвольментомеры)
Пространственные аддитивные величины	Площадь поверхности	Геодезические приборы, планиметры и др.
	Объем жидкости	Приборы для измерения объема, мерная посуда, объемные счетчики расхода жидкостей и др.
Свойства пространственного взаимоположения	Взаимное расположение точек, линий, поверхностей и фигур в изделии	Трехкоординатные измерительные машины с системами математической обработки результатов измерений координат точек изделий
	Расположение пунктов на поверхности Земли	Геодезические и спутниковые приборы для измерения геодезических координат в принятой по соглашению системе координат
Свойства пространственной симметрии	Группа симметрии кристалла	Приборы для измерения кристаллографических параметров
Свойства пространственной поляризации	Поляризация света	Полярископы, поляриметры, спектрополяриметры, поляризационные анализаторы и компенсаторы и др.

Инструментально измеряются не только обычные пропорциональные и аддитивные величины, но и неархимедовы и относительные величины, многомерные величины, такие свойства, которые величинами назвать невозможно (направление, форма, взаиморасположение) и даже качественные свойства.

При этом имеются необходимые средства обеспечения единства измерений, хотя способы описания точности таких измерений не всегда вписываются в обычные формы оценки погрешностей или неопределенностей. Фактически такие измерения входят в государственную систему обеспечения единства измерений. Назрела потребность в развитии метрологических принципов оценки алгоритмов и неопределенностей, например, экологических прогнозов, диагностических процедур и методов идентификации. Достаточно общей методологической основой для таких исследований может быть теория шкал измерений (см. 2.4), а также изложенная в 2.2 классификация измеряемых свойств.

2.4. Основы теории шкал измерений

В этом параграфе основные положения теории шкал измерений для прикладной доступности сознательно даны без привлечения строгого математического языка и символики теории множеств, чисел, групп, топологических пространств и др. (подробности см., например, в монографии И. Пфанцгеля). Измерению подлежат различные проявления свойств тел, веществ, явлений, процессов, описываемых принятыми моделями (см. 2.2). Некоторые свойства объектов измерений проявляются количественно, а другие – качественно.

Многообразие проявлений любого свойства образует множество, отображение элементов которого на упорядоченное множество чисел или, в более общем случае, на систему условных знаков образует шкалу измерения этого свойства. Системами знаков являются, например, множество обозначений (названий) цветов, совокупность классификационных символов или понятий, множество баллов оценки состояний объекта, множество действительных чисел и т.д. Элементы множеств проявления свойств находятся в определенных логических соотношениях между собой.

Таковыми соотношениями могут быть "эквивалентность" (равенство) или "сходство" (близость) этих элементов, их количественная различимость ("больше", "меньше"), допустимость выполнения определенных математических операций (сложения, вычитания, умножения, деления) с элементами множеств и т.д. Эти особенности элементов множеств проявления свойств определяют типы шкал измерений.

Единообразие измерений и возможность сопоставления результатов измерений, выполненных по той или другой шкале различными операторами в различных учреждениях или даже государствах, возможно только в случаях, когда используемая шкала измерений подробно описана или, точнее, специфицирована неким документом, а оператор scrupulously выполняет требования этого документа. Спецификация – это перечисление подробностей, на которые необходимо обратить особое внимание. Так, например, спецификации шкал измерений длины, массы, времени, силы электрического тока, термодинамической температуры, количества вещества, силы света установлены соответствующими резолюциями ГКМВ, описательным определением соответствующих единиц измерений – метра, килограмма, секунды, ампера, кельвина, моля, канделы, образующих группу основных единиц международной системы единиц (SI). Кроме определений основных единиц, спецификации шкал соответствующих величин содержат те или иные дополнительные сведения, например, спецификация шкалы измерения силы света, измеряемой в канделах, содержит стандартизованную на международном уровне табулированную функцию $V(\lambda)$ – относительную спектральную световую эффективность монохроматического излучения для дневного зрения и модель линейного спектрально-аддитивного селективного приемника. Производные единицы SI по существу, в основном, специфицированы законами и уравнениями физики.

Небезынтересно отметить, что в резолюции ГКМВ единица термодинамической температуры кельвин определена только по одной точке шкалы – тройной точке воды, а вся шкала измерений практически достижимых термодинамических температур претерпела ряд уточнений, отраженных в спецификациях ГКМВ: МПТШ-48, МПТШ-68, МТШ-90, опирающихся на уточненные реперные значения температур тройных точек, точек плавления, кипения или затвердевания ряда химических элементов.

Многие неметрические шкалы наименований и порядка появились из практической потребности измерения параметров и свойств явлений и материалов. Так, например, известные шкалы твердости материалов, предложенные в свое время шведским инженером И.Бринеллем, американским металлургом С. Роквеллом и английской фирмой «Виккерс Лимитед» впоследствии были специфицированы рекомендациями МОЗМ.

Ряд шкал специфицирован специализированными (не метрологическими) международными организациями. Здесь достаточно сослаться на шкалу практической солености морской воды (см. 7.10) и международную шкалу оценки событий на АЭС (см. 7.12). Многие шкалы измерений различных специфических особенностей и свойств материалов, явлений, веществ, а также некоторых изделий устанавливаются национальными стандартами.

Спецификации неметрических шкал, как правило, тщательно исследуются в процессе их разработки. Последующее совершенствование ограничивается мерами по уменьшению погрешности измерений, выполняемых в ходе реализации спецификации и по устранению влияния второстепенных мешающих факторов.

Смены спецификаций и даже определений единиц метрических шкал разностей и отношений, наоборот, имеют целью существенное улучшение метрологических характеристик эталонов. Так, например, трехкратная смена определения секунды позволила снизить погрешность эталона времени и частоты на 6-7 порядков, т.е. в миллионы раз.

В соответствии с логической структурой проявления свойств в теории измерений различают пять основных типов шкал измерений (см. табл. 2.2): наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные шкалы. Каждый тип шкалы обладает определенными признаками, основные из которых рассматриваются ниже.

Шкалы наименований – отражают качественные свойства, в том числе комбинированные свойства. Их элементы характеризуются только соотношениями эквивалентности (равенства) и сходства конкретных качественных проявлений свойств.

Классическим примером такой шкалы является шкала классификации (оценки) цвета объектов по наименованиям (красный, оранжевый, желтый, зеленый и т.д.), опирающаяся на стандартизованные атласы наборов цветов, систематизированных по сходству. В таких атласах, выполняющих роль своеобразных эталонов, цвета могут обозначаться условными номерами. Измерения в шкале цветов выполняются сравнением при определенном освещении образцов цвета из атласа с цветом исследуемого объекта и установления эквивалентности их цветов.

Полное множество всевозможных цветов описывается трехмерной шкалой наименований – моделью цветового пространства, каждый цвет в котором характеризуется тремя координатами.

В принципе, любая классификационная система, например, классификация растений и животных по Линнею, соответствует понятию шкалы наименований, но лишь некоторые из них представляют интерес для инструментальной метрологии. Шкалой наименований также является классификация кристаллов по группам симметрии.

В шкалах наименований нельзя ввести понятие единицы измерения; в них отсутствует и нулевой элемент. Но некоторые шкалы наименований могут содержать в себе количественные компоненты соответствующих качественных свойств. Так, в стандартной трехкоординатной колориметрической системе (см.7.7) две координаты носят качественный характер (они определяют цветность), а третья координата соответствует количественной характеристике – яркости, описываемой аддитивной шкалой отношений.

Классификация шкал измерений

Таблица 2.2

Признак шкалы	Тип шкалы измерений					Абсолютные
	Наименований	Порядка	Разностей	Отношений		
				1-го рода	2-го рода	
Логические соотношения между проявлениями свойств	Эквивалентность	Эквивалентность, порядок	Эквивалентность, порядок, пропорциональность или суммирование интервалов	Эквивалентность, порядок, пропорциональность	Эквивалентность, порядок, суммирование	Эквивалентность, порядок, пропорциональность или суммирование
Наличие нуля	Не имеет смысла	Не обязательно	Устанавливается по соглашению	Имеется естественное определение		
Наличие единицы измерения	Не имеет смысла		Устанавливается по соглашению			Безразмерная единица
Диапазон шкалы	По спецификации	Определяется реальными потребностями				По определению измеряемой величины
Многомерность	Возможна					
Допустимые преобразования	Изоморфное отображение	Монотонные преобразования	Линейное преобразование	Умножение на число		
Необходимость эталонов шкалы	Могут реализовываться без эталонов		Реализуются только посредством эталонов			Необходимости нет
Что должен воспроизводить эталон при его наличии	Используемый участок шкалы		Часть или две точки шкалы	Часть или точку шкалы		Требований нет

Для шкал наименований, описывающих комбинированные свойства (см. 2.2 и 2.3), аналогичное присутствие количественных элементов даже более характерно

Тем не менее, шкалы наименований в целом, по существу, качественны; хотя возможны некоторые статистические операции при обработке результатов измерений в этих шкалах, например, можно найти модальный или наиболее многочисленный класс эквивалентности. Изменения спецификаций шкал наименований недопустимы. Любые изменения равносильны введению новой шкалы.

Шкалы порядка – описывают свойства, для которых имеют смысл не только соотношения эквивалентности, но и соотношения порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства. Характерным примером шкал порядка являются существующие шкалы чисел твердости тел, шкалы баллов землетрясений, шкалы баллов ветра, международная шкала оценки событий на АЭС и т.п. Узко специализированные шкалы порядка широко применяются в методах испытаний различной продукции.

В этих шкалах также нет возможности ввести единицы измерений из-за того, что для описываемых свойств логически невозможно установить пропорциональность (они не только принципиально нелинейны, но и вид нелинейности может быть различен и неизвестен на разных ее участках). Такие числа являются неархимедовыми величинами (см.2.2). Шкалы порядка допускают монотонные преобразования, в них может быть или отсутствовать нулевой элемент. Шкалы порядка, как и шкалы наименований, не допускают изменения спецификаций по тем же причинам.

Все неметрические шкалы можно разделить на непрерывные и дискретные. Примерами непрерывных шкал наименований являются международные трехмерная шкала координат цвета и двухмерная координат цветности. К непрерывным шкалам порядка относятся, например, все шкалы твердости металлов и изделий; ясно, что в результате измерений может быть получено любое дробное число твердости.

Дискретные неметрические шкалы содержат некоторое определенное число классов эквивалентности, число баллов, символов, знаков и т.д. Число этих градаций или классов эквивалентности может меняться в соответствии со спецификациями на конкретные шкалы. Так, например,

шкалы порядка оценки знаний учащихся бывают пяти-, двадцати- и даже стобальными. Некоторые тестовые шкалы знаний, например, английского языка, содержат несколько сот баллов. Дискретна шкала твердости минералов по Моосу, содержащая 10 классов эквивалентности. Существуют 17, 12 и 10 балльные шкалы силы ветра и состояния поверхности моря и т.д.

Шкалы разностей (интервалов) – отличаются от шкал порядка тем, что для описываемых ими свойств имеют смысл не только соотношения эквивалентности и порядка, но и суммирования интервалов (разностей) между различными количественными проявлениями свойств. Шкалами разностей описываются интервальные скалярные величины (см.2.2). Характерный пример – шкала времени. Интервалы времени (например, периоды работы, периоды учебы) можно складывать и вычитать, но складывать даты каких-либо событий бессмысленно. Другой пример, шкала длин (расстояний) – пространственных интервалов определяется совмещением нуля линейки с одной точкой, а отсчет делается у другой точки. К этому типу шкал относятся и практические шкалы температур Цельсия, Фаренгейта, Реомюра.

Шкалы разностей имеют условные (принятые по соглашению) единицы измерений и условные нули, опирающиеся на какие-либо реперы. Заметим, что интервалы шкал разностей обладают всеми свойствами шкал отношений. В этих шкалах допустимы линейные преобразования, в них применимы процедуры для отыскания математического ожидания и стандартного отклонения. Шкалы разностей допускают изменение спецификаций и даже определений единиц измерений.

Шкалы отношений – отличаются от шкал разностей тем, что в них существуют естественные нули, соответствующие логически однозначному пределу бесконечно малого проявления количественного свойства. К множеству количественных проявлений в этих шкалах применимы соотношения эквивалентности и порядка, операции вычитания и умножения (шкалы отношений 1-го рода – пропорциональные шкалы), а во многих случаях и суммирования (шкалы отношений 2-го рода – аддитивные шкалы). В шкалах отношений существуют условные (принятые по соглашению) единицы и естественные нули. Шкалами отношений описываются пропорциональные и аддитивные скалярные величины (см.2.2). Примерами шкал отношений являются шкалы массы (2-го рода), термодинамическая температурная шкала (1-го рода). Массы любых объектов можно суммировать, но суммировать температуры разных тел нет смысла, хотя можно судить о разности и отношении их термодинамических температур. Шкалы отношений широко используются в физике и технике; в них допустимы все арифметические и статистические операции, кроме суммирования для шкал отношений 1-го рода.

Абсолютные шкалы - обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно в них существует естественное однозначное определение единицы измерений. Такие шкалы используются для измерений безразмерных скалярных счетных и относительных величин (отношений одноименных величин: коэффициентов усиления, ослабления, КПД, коэффициентов отражений, пропусканий и поглощений, добротности, глубины модуляции, коэффициентов трения покоя и скольжения, коэффициента сцепления колеса с дорожным покрытием и т.д. – см. 2.2). Их единицы безразмерны и сочетаются с единицами любых систем, являясь, по сути дела, всесистемными или надсистемными. Такие шкалы также используются как вариант представления шкал отношений делением соответствующих величин на некоторые опорные значения этих величин, выраженные в принятых единицах (так получают условно безразмерные величины, см. 3.6). Абсолютные шкалы бывают ограниченными (КПД) и неограниченными (коэффициент усиления), непрерывными и дискретными. Логическая структура большинства абсолютных шкал такова, что значения в них не аддитивны, а лишь пропорциональны. В некоторых случаях их можно перемножать. Аддитивными абсолютными шкалами являются шкалы плоских и телесных углов, количества информации, счетных величин. Изменения спецификаций допустимы и для абсолютных шкал введением единиц измерений, кратных или дольных естественной единице, когда возникает необходимость в этом.

Диапазоны практически используемых значений большинства измеряемых величин и явлений весьма велики. Даже в обыденной жизни человек сталкивается с одноименными величинами, во много раз различающимися между собой. Например, интенсивности звуков, воспринимаемых ухом человека, от порога слуха до болевого порога, различаются в миллионы раз, коэффициенты усиления или ослабления электрических сигналов могут достигать нескольких миллионов. Психологические особенности человека, выполняющего операции с числами, таковы, что натуральные числа, содержащие более трех-четырёх значащих цифр, уже плохо воспринимаются и запоминаются, требуют напряжения при осмыслении полученных результатов.

В то же время характеристика, например, десятичного логарифма натуральных чисел, вплоть до 10^9 , выражается однозначным числом, что во многих случаях весьма наглядно и удобно. Это свойство логарифмирования часто используется для представления в логарифмическом масштабе результатов измерений в метрических шкалах разностей, отношений и абсолютных шкал. Логарифмические шкалы удобны еще тем, что приращения уровня реакции (ощущения) человека на физические внешние раздражители – звук, свет и др. – примерно пропорциональны логарифму величины, характеризующей стимулирующий фактор и широко используются для построения так называемых **биофизических шкал**. Логарифмирование метрических и абсолютных шкал приводит к изменению типа шкалы. Так, например, пропорциональные абсолютные шкалы в логарифмическом варианте становятся аддитивными: коэффициенты усиления последовательно включенных усилителей перемножаются, а их логарифмы складываются. При логарифмическом преобразовании шкал отношений и разностей получается логарифмическая шкала разностей с фиксированным нулем, соответствующим принятому опорному значению преобразуемой шкалы.

Литература к главе 2

1. Дойников А.С. Измеряемые свойства // Измерительная техника.– 2002.– № 11.– С. 50 - 56
2. Брянский Л.Н., Дойников А.С. От меры к единице измерений // Законодательная и прикладная метрология.– 2000.– № 4.– С. 63
3. Колмогоров А.Н. Величина // Математическая энциклопедия.– М.: Сов. энциклопедия.– 1977.– Т. 1.– С. 651-653
4. Пфанцагль И. Теория измерений /При участии В.Бауманна и Г. Хуберта.– Перевод с англ. В.Б.Кузьмина.– Под ред. С.В Овчинникова.– М.: Мир.– 1976.– 248 с.
5. Берка Карел. Измерения. Понятия, теория, проблемы /Пер. с чеш. К.Н.Иванова.– М.: Прогресс.– 1987. – 320 с.
6. Пиотровский Я. Теория измерений для инженеров.– М.: Мир.– 1989.– 335 с.
7. МИ 2365-96. ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения.– М.: ВНИИФТРИ.– 34 с.
8. Воронин Ю.А. Начала теории сходства. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние.– 1991.– 128 с.
9. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Шкалы в законодательной метрологии // Сборник докладов международной конференции по мягким вычислениям и измерениям.– С.-Петербург: ЛЭТИ.– 1998
10. Дойников А.С. Шкалы измерений. Физическая энциклопедия.– М.: БРЭ.– 1998.– Т.5.– С. 465-466
11. Дойников А.С. Классификация измеряемых свойств // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2002. С.-Петербург: 2002

Глава 3 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ СИСТЕМЫ

3.1. История развития систем единиц

В параграфе 2.1 был показан процесс возникновения единиц измерений. Еще в глубокой древности были осознаны преимущества применения систем взаимно связанных мер и единиц по сравнению с отдельными, разобщенными мерами и единицами измерений.

Первыми системами, которые с достаточным основанием можно было назвать системами единиц, были Гауссова (миллиграмм, миллиметр, секунда) и ряд систем СГС (сантиметр, грамм, секунда). Дальнейшее развитие подобных систем привело к разработке и принятию в 1960 г. XI Генеральной конференцией по мерам и весам международной системы единиц (Le Systeme international d'unites – сокращенно – SI).

Исходной для SI, безусловно, является метрическая система, предложенная в 1791 г. Следующий этап – подписание семнадцатую ведущими промышленными державами мира дипломатического документа метрической конференции 1875 г.

В 1881 г. появилась система СГС (развитие системы Гаусса) и позднее, в связи с необходимостью ее применения для измерений не только механических, но и электромагнитных величин, ее разновидности (наиболее известны СГСЭ и СГСМ). Следующий важный этап – принятие в 1950 г. системы МКСА – системы Джорджи, в которой появилась четвертая основная единица – ампер. МКСА вошла в SI как ее составная часть, применяемая для электрических и магнитных величин. Необходимость включения в систему тепловых и световых величин привела к включению в SI еще двух основных единиц – кельвина и кандел. В 1971 г. в число основных единиц был включен моль. Прежде чем перейти к подробному рассмотрению SI, необходимо остановиться на общих принципах построения систем единиц измерений.

3.2. Принципы построения систем единиц измерений

Метод построения систем единиц, в его первоначальном виде, был разработан Ф. Гауссом. По этому методу построение систем единиц измерений начинается с выбора минимального числа основных единиц, через которые выражают все практически применяемые единицы измерений – называемые производными. Небезынтересно отметить, что какие-либо теоретически обоснованные алгоритмы, позволяющие однозначно определить совокупность (набор) необходимых для построения системы основных единиц, отсутствуют. Единственным критерием при выборе основных единиц могут быть лишь эффективность и целесообразность использования данной системы. Различные системы базируются на разном числе основных единиц. Как уже было сказано, метрическая система 1791 г. базировалась на одной основной единице – метре, затем на двух – метре и килограмме. Система Гаусса и система СГС – на трех. Варианты СГС – СГС ϵ_0 ; СГС μ_0 ; СГСФ; СГСБ – на четырех. Система МКС вновь на трех, ее варианты – МКСК; МКСА; МКС μ_0 ; МКСКД и МКСЛМ – на четырех. SI включает в себя 7 основных единиц. Это максимальное число для всех известных систем единиц.

Первоначально предполагалось, что основные единицы должны воспроизводиться совершенно независимо друг от друга. Как будет показано ниже, фактически в системах единиц появились значительные отступления от этого принципа

Следующий этап разработки системы – присвоение основным единицам буквенных символов их размерностей. Затем следует этап включения в систему некоторой совокупности производных единиц, выраженных через основные и присвоение им размерностей подстановкой символов основных единиц в физические уравнения, определяющие эти единицы через основные.

3.3. Размерность измеряемых величин и единиц измерений

Размерность – это выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных единиц в различных степенях и отображающее связь данной производной единицы с основными.

Существует два толкования понятия “размерность”. По одному – размерности присваивают величинам, по другому – единицам. Очевидно, что единицы, являясь частными реализациями величин, имеют одинаковые с ними размерности, поэтому между этими точками зрения нет коренного противоречия. Во всей физической, метрологической литературе и в данной книге под размерностью понимается, в первую очередь, только обобщенное выражение зависимости единицы данной величины от основных единиц.

Таким образом, размерности, присвоенные основным и производным единицам, одновременно являются размерностями соответствующих величин. Необходимо предостеречь от бездумного, автоматического, применения терминов «основные и производные величины». Все величины обозначают существующие свойства, среди которых нет ни основных ни производных от них. Все величины в этом смысле равноправны. Другое дело – единицы в рамках объединяющей их системы. Формируя систему единиц, мы вправе подразделять их на основные и производные.

Из теории шкал измерений следует, что размерностями обладают лишь единицы метрических шкал разностей и отношений. Единицы абсолютных шкал безразмерны в принципе, даже при включении их в любую систему единиц. Шкалы наименований и порядка не имеют единиц измерений, поэтому к цифрам, баллам и иным знакам, характеризующим эти шкалы, понятие “размерность” не применимо.

По не совсем понятным причинам периодически появляются публикации, в которых обсуждаются действительные и надуманные проблемы, связанные с интерпретацией этого понятия. Часто предпринимаются попытки “прояснить” физический смысл размерностей и “присвоить официально” размерности безразмерным величинам и единицам.

Напомним, что большинство классиков физики и метрологии считали и считают, что “размерность какой-либо величины не есть свойство, связанное с существом ее, но представляет собой некую условность, связанную с выбором системы единиц (М.Планк, П.Бриджмен и др.). Это мнение подтверждается зависимостью размерности единиц от выбранной системы, совпадением размерностей величин, имеющих различную физическую природу, трудно интерпретируемыми физически размерностями ряда величин (пример - электрическая емкость), тем фактом, что величины, размерные в одной системе, могут быть безразмерными в другой.

Вот что писал по этому поводу Г.Хартли в своей монографии “Анализ размерностей”: “Не существует такого понятия, как абсолютная размерность физической величины ... Размерности ... являются относительными по своему определению. Формула размерности физической величины основана на определении этой величины, которое само по себе зависит от метода измерения величины с использованием основных единиц измерений, выбор которых (в определенных преде-

лах) произволен". Из сказанного видно, что символы размерности являются специфическими логическими операторами, функционально определенными только в рамках соответствующих систем единиц. Символы размерности не являются обычными величинами, а абстрактная алгебра операций с ними отличается от обычной алгебры. Применение этих операторов вне систем единиц бессмысленно.

На практике мы интересуемся не размерностями, как таковыми, а выражениями, связывающими единицы измерений с основными единицами системы и друг с другом. По структуре они похожи, но не тождественны: символы размерности абстрагированы от конкретных размеров единиц измерений. Не случайно в таблицах международного документа "Le Systeme international d'unites" отсутствует графа "размерность", а приведены лишь выражения связи между различными единицами измерений.

Размерность величины одновременно является размерностью ее единицы. Пример: размерность площади (величины) – L^2 , размерность единицы площади – m^2 , также – L^2 . Размерность основной единицы системы совпадает с ее символом в степени равной 1. Степени символов основных единиц, входящих в одночлен, могут быть целыми, дробными, положительными, отрицательными, их называют показателями размерности производных единиц. Совокупность размерностей основных и производных единиц данной системы образует размерную систему. Ее база – размерности основных единиц. Над размерностями можно производить формальные действия умножения, деления, возведения в степень, извлечения корня. Сложение и вычитание размерностей не имеют смысла. Размерность единиц (величин) зависит от принятой системы единиц. Единица, в размерности которой хотя бы одна из основных единиц возведена в степень, не равную нулю, называется размерной, в противном случае она называется безразмерной. Напомним, что единица конкретной величины, безразмерная в одной системе, может быть размерной в другой и наоборот.

3.4. Международная система единиц – SI

SI является когерентной системой, построенной по десятичному принципу: кратные и дольные единицы образуются умножением исходных единиц на множители, равные десяти в целой положительной или отрицательной степени, а в уравнениях, связывающих между собой единицы системы, числовые коэффициенты равны единице.

Принятие SI позволило унифицировать единицы измерений – для каждой величины принята одна и только одна единица. SI охватывает большинство областей естественных наук и техники. Ее единицы, как правило, имеют удобные для практического применения размеры. Четко разграничены единицы массы и силы (веса). Для всех видов энергии установлена одна единица – джоуль (таким образом, отпала потребность в различных переводных коэффициентах). Упростилась запись уравнений и формул в различных областях науки и техники. Но SI нельзя считать всеобъемлющей. Она распространяется только на метрические шкалы скалярных величин (см. 2.2). Необходимо также осознать, что фактически в SI для образования многих производных единиц используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал. Особо отметим привычную и незамечаемую условность распространения SI на векторные величины, такие как скорость, ускорение, угловая скорость вращения, сила, момент силы, напряженность электрического и магнитного поля и др. В действительности соответствующие единицы измерения (m/s , m/s^2 , rad/s , N , $N \cdot m$, V/m , A/m) могут соответствовать только модулям этих векторов – скалярных величин. Для полного описания векторов, включая их направление (качественную сторону – см. 2.2), обязательно использование системы координат – трехмерных комбинированных шкал. Хотя спецификации неметрических шкал, как правило, опираются на единицы SI, эти шкалы в принципе не могут охватываться SI.

В стандарте ГОСТ 8.417-2002 "ГСИ. Единицы величин" имеется указание на то, что этот стандарт не устанавливает единиц величин, оцениваемых по условным шкалам, единиц количества продукции (например, единиц Международной сахарной шкалы, шкал твердости, шкал светочувствительности фотоматериалов и т.д., а также счетных единиц). В понятиях теории шкал измерений это указание неточно. Как следует из табл. 2.2, единицы любых шкал, кроме абсолютных, являются условными, т.е. принятыми по соглашению. Поэтому правильнее писать, что SI и приведенные выше стандарты не распространяются на величины и свойства, описываемые неметрическими шкалами. Также вне SI остается множество широко применяемых счетных единиц, таких как "пара", "мешок", "упаковка" и т.д.

Подчеркнем, что с единицами SI (как и с единицами других систем) сочетаются единицы абсолютных шкал, являющиеся, по существу, всесистемными или надсистемными.

Как уже было сказано, SI содержит семь основных единиц: длины – метр; массы – килограмм; времени – секунду; силы электрического тока – ампер; термодинамической температуры – кельвин; силы света – канделу; количества вещества – моль.

Первоначально SI содержала также категорию "дополнительных единиц", в которую входили радиан и стерадиан. В метрологической литературе неоднократно подчеркивался тот факт, что SI – единственная система, в которой присутствует такая категория и что определение этого термина отсутствует. Эти обстоятельства давали почву для постоянных дискуссий. Их результатом явилось исключение из SI отдельной категории "дополнительных единиц" и помещение их в международном стандарте МС ИСО 1000-1992 со ссылкой на уточнение МКМВ 1980 г. в таблицу "Производные единицы, имеющие специальные наименования, включая дополнительные единицы SI". В 1995 г. решением XX ГКМВ радиан и стерадиан предложено "интерпретировать" как безразмерные производные единицы SI. Сомнительна окончательность такого решения. По принципам построения любой системы единиц, безразмерные единицы не могут быть производными. Теория шкал измерений и в этом случае дает простое и ясное объяснение. Радиан и стерадиан, как единицы абсолютных шкал, должны входить в SI в качестве внесистемных (надсистемных) единиц.

Документы по SI обычно содержат более ста производных единиц. Среди них выделяется группа производных единиц, имеющих собственные наименования. Многие из них названы по фамилиям выдающихся ученых.

Рассмотрим кратко генезис и современное состояние основных единиц SI и соответствующих эталонов.

Единица длины – метр. Шкала длины (интервалов) – шкала разностей. Существовало много предшествовавших метру единиц (точнее – мер) длины. Это повсеместно распространенный в древности локоть, русские аршин и сажень, английские фут и ярд, французский туаз и т.д. Все эти меры в какой-то степени антропометричны, соразмерны с человеческим телом или его частями. Без сомнения, творцы метрической системы должны были выбрать размер метра таким, чтобы он не выпадал из перечисленной совокупности традиционных мер длины. Сделать это было нетрудно: размеры Земли и до проведения точных измерений дуги парижского меридиана (а метр, напомним, был принят равным одной десятиmillionной части четверти этого меридиана, проходящего через Париж) были известны достаточно точно и предопределить ожидаемый размер метра можно было с погрешностью не превышающей 0,5 %.

Измерения производились с использованием "дометрической" французской единицы длины – туаза – около 1,95 м. Все работы по измерениям и обработке результатов измерений длины дуги меридиана между Дюнкерком и Барселоной заняли 7 лет, с 1792 по 1799 гг. Они завершились установлением точного (на уровне конца XVIII в.) соотношения: 1 м = 0,513074 туаза, и изготовлением платинового стержня прямоугольного сечения длиной между торцами в 1 метр – концевой меры по современной терминологии. Этот первый эталон метра был в 1799 г. сдан на хранение в архив Французской республики и получил название "архивный метр".

Довольно скоро стало ясно, что каждое новое измерение дуги меридиана будет давать новое значение метра, т.к. форма и размеры Земли не остаются неизменными. Поэтому международная комиссия, созданная по инициативе Петербургской Академии наук, уже в 1872 г. постановила принять за единицу длины сам архивный метр, хотя его размер отличался от теоретического. Таким образом, метр потерял связь с земным меридианом. Дальнейшие измерения подтвердили обоснованность такого решения. Например, по измерениям 1964-1967 гг. длина 1/4 меридиана оказалась равной уже 10001954,5 м и метр 1967 г. оказался бы короче архивного на 0,2 мм.

После подписания 20 мая 1875 г. метрической конвенции было решено снабдить все страны, ее подписавшие, национальными эталонами метра. В 1889 г. прототипы этих эталонов (30 экземпляров) были изготовлены. Они представляли собой всем хорошо известные платино-иридиевые линейки X-образного сечения, вписывающегося в квадрат 20 на 20 мм. Вблизи концов линейки, длина которой 102 см, на плоскости средней полки, совпадающей с нейтральной плоскостью сечения, нанесены по 3 штриха на расстоянии 0,5 мм друг от друга. Расстояние между средними штрихами и равно 1 метру. Этим эталонам была суждена долгая жизнь – с 1889 по 1960 г.

К этому времени повысились требования науки и промышленности к точности линейных измерений и относительная погрешность эталонов (около $1 \cdot 10^{-7}$) стала восприниматься как препятствие на пути дальнейшего прогресса. Кроме того, появились сомнения в постоянстве размеров эталонов (из-за явлений перекристаллизации материала). Высказывалось предположение, что между 1889 и 1957 гг. эталоны укоротились на 0,5 мкм. Все это, а также появление прецизионных интерферометров сделало актуальным сопоставление метра с длиной волны светового

излучения. Сначала выбор пал на красную спектральную линию излучения кадмия. Было установлено, что в один метр укладывается 1553164,13 длин волн этой линии при измерениях в воздухе при 15 °С, давлении 1,013 бар и 0,03 % объемного содержания CO₂. Линия кадмия оказалась недостаточно узкой. В 1960 г. было принято новое определение: 1 метр равен 1650763,7300 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями 5d5→2p10 атома криптона, и стандартизована конструкция криптоновой лампы. Новое определение позволило уменьшить относительную погрешность эталона до $1 \cdot 10^{-8}$. Общий прогресс науки и техники предопределил и меньшую "продолжительность действия" новых эталонов, точнее, нового определения метра,— оно просуществовало 23 г. Требования к точности измерения длин продолжали повышаться, и появилась идея определения расстояния через интервал времени и скорость какого-либо природного процесса.

Во второй половине XX века время и частота измерялись уже настолько точно, что с этой стороны препятствия на пути принятия нового определения метра отсутствовали. Сложнее обстояло дело со скоростью. Единственной фундаментальной физической константой (ФФК), пригодной для выработки нового определения, была скорость света в вакууме. Теория предсказывала ее неизменность и независимость от длины волны (частоты) излучения, но ее значение нельзя было определить точнее, чем позволял опять-таки эталон метра. Образовалась тупиковая ситуация. Чтобы выйти из нее, было принято оригинальное решение: наиболее достоверное из измеренных значение скорости света для целей метрологии считать точным, т.е. не имеющим погрешности. Тем самым появилась возможность увеличения точности воспроизведения метра и дать его новое, действующее в настоящее время, определение - **метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299792458 с**. Таким образом, скорость света в вакууме постулирована на международном уровне как точно равная 299792458 м/с. Практически по этому определению измеряют большие и сверхбольшие расстояния, когда фигурируют достаточно длительные интервалы времени, например, в навигации и астронавигации.

Сравнительно небольшие длины, и сам метр, определяют косвенными методами. Для этого пришлось создать так называемые радиооптические частотные мосты (РОЧМ). Это сложные комплексы, состоявшие до последнего времени из ряда последовательно расположенных радиотехнических генераторов и лазеров с умножителями частоты между ними. Они позволяют определять значения частот стабилизированных лазеров с погрешностями, сравнимыми с погрешностью цезиевых реперов частоты. Один из радиооптических мостов был создан в России, во ВНИИФТРИ. На его вход подается эталонная частота 5 МГц от генератора, синхронизированного через систему умножителей частоты с водородными генераторами эталона времени и частоты, откалиброванными по цезиевому реперу частоты. Мост умножает эту частоту до значения около $1 \cdot 10^{14}$ Гц. Сейчас разрабатываются новые принципы построения РОЧМ, например, с использованием фемтосекундных лазеров.

Зная частоты лазеров, вычисляют длины волн их излучения и с помощью оптических интерферометров аттестуют и проверяют различные меры длины. Не составляет труда и подсчитать число длин волн конкретного лазера, соответствующее одному метру. Эта последняя операция формально ничем не отличается от процедуры воспроизведения размера метра с помощью криптоновой лампы. Но отличия все же есть. XVII ГКМВ и 72 сессия МКМВ вместо единственной криптоновой лампы рекомендовала сразу несколько источников излучения. В их числе гелий-неоновые лазеры на частотах около 88, 473, 489 и 520 ТГц с погрешностями от $1,3 \cdot 10^{-10}$ до $1,1 \cdot 10^{-9}$, аргонный лазер на частоте около 582 ТГц с погрешностью $1,3 \cdot 10^{-9}$, спектральные лампы Kr, Hg, Co с погрешностями около $4 \cdot 10^{-9}$. Эти точности гарантируются конструкциями и принципами работы источников. Выбор источника определяется технико-экономическими возможностями метрологической службы и потребностями пользователей. Можно использовать и другие исследованные источники и повышать точность измерений длины. Наличие в России РОЧМ позволяет определить значение частоты перевозимого стабилизированного лазера точнее, с СКО $< 1 \cdot 10^{-11}$ и НСП $< 2 \cdot 10^{-11}$. С его помощью с несколько меньшей точностью определяют частоту лазера, входящего в состав эталона метра России. В результате его СКО не превышает $2 \cdot 10^{-10}$, а НСП — менее $1 \cdot 10^{-9}$. К сожалению, области измерения длины "по определению" и интерференционным методом с помощью стабилизированного лазера на сегодня не стыкуются, т.е. нет меры, которую можно аттестовать с сопоставимой точностью обоими способами. Единственным связующим звеном является РОЧМ.

Единица массы – килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма. Шкала масс – аддитивная шкала отношений. Килограмм – основная единица SI и первая производная единица метрической системы 1791 г. Она была выражена че-

рез метр и равнялась массе 1 дм^3 воды при температуре ее максимальной плотности. Далее повторилось все уже сказанное о метре. Сначала в 1799 г. был изготовлен "архивный килограмм" – платиновая гиря цилиндрической формы, сданная на хранение в архив Французской республики. В 1872 г. принято новое определение, в соответствии с которым килограмм перестал быть связанным с метром, а стал просто равен массе архивного килограмма. Оно позволило существенно снизить погрешность воспроизведения значения единицы массы – килограмма. Последующие открытия подтвердили обоснованность такого решения. Достаточно напомнить о различном изотопном составе воды из разных источников и о ее различной плотности. После подписания метрической конвенции 1875 г. одновременно с изготовлением прототипов (будущих национальных эталонов) метра были изготовлены и 42 прототипа будущих национальных эталонов килограмма. Изготовила их та же лондонская фирма Джонсона, Маттена и К° из платиново-иридиевого сплава.

Эти гири в течение более 100 лет являются эталоном. Уникальный случай в современном мире. Килограмм не зависит от других основных и производных единиц SI.

То обстоятельство, что килограмм не связан ни с физическими постоянными, ни с какими-либо другими природными явлениями, является для метрологов причиной постоянной головной боли. Международный прототип безусловно подвержен износу, степень которого определить принципиально невозможно. Поэтому в метрологических лабораториях ряда стран идет интенсивный поиск новых путей создания определения и эталона килограмма. Так, например, ведутся работы по определению килограмма через вольт и ом с помощью обращенных ампер-весов. Теоретически можно представить себе эталон килограмма в виде идеального кристалла (без примесей и дислокаций), содержащего известное число атомов определенного химического элемента, точнее, определенного изотопа. Способы выращивания таких кристаллов пока не известны.

Единица количества вещества – моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12, массой 0,012 кг. Структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц. Моль включен в число основных единиц SI в 1971 г. решением XIV ГКМВ. Эталоны моля никогда не создавались и не создаются по следующим основным причинам: масса одного моля различных веществ или структурных элементов различна; моль, по сути дела, счетная единица, численно равная числу Авогадро – $6,02214199(47) \cdot 10^{23}$ частиц; средства измерений, отградуированные в молях, не выпускаются. Есть обоснованные предложения исключить моль из числа основных единиц SI и допустить его к применению наравне с единицами SI как специальную единицу массы, удобную для химических расчетов.

Единица времени – секунда. Шкала времени – классический пример шкалы интервалов: с интервалами времени можно производить любые арифметические действия, а даты событий можно только выстраивать в хронологический ряд. Секунда занимает особое место среди других основных единиц SI. Во-первых, необратимость, однонаправленность времени (т.н. "стрела времени") – одна из фундаментальных характеристик нашей Вселенной. Во-вторых, существует прогрессивная тенденция – все больший ансамбль единиц и шкал SI выражать через секунду (или обратную ей – частоту) и ФФК. Секунда не связана непосредственно с другими основными единицами SI.

Примечательно, что если сама секунда и ее доли (миллисекунда, микросекунда и т.п.) являются "законными членами SI", то более крупные единицы – минута, час, сутки, неделя, месяц, год, будучи потомками двенадцатирично-шестидесятиричной Вавилонской системы счисления и лунного месяца, к таковым не относятся и именуются "единицами, допущенными к применению наравне с единицами SI". Для основной единицы системы ситуация, мягко говоря, необычная.

Определения секунды неоднократно менялись: $1/86400$ средних солнечных суток (до 1960 г.); затем $1/31556925,9747$ часть тропического года для 1900 г. 0 января в 12 ч. эфемеридного времени (что соответствует 12 ч. 31 декабря 1899 г.) – (эфемеридная секунда). Современное определение: **секунда есть время, равное 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу ($F=4$, $m=0$) и ($F=3$, $m=0$) между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.**

В соответствии с этим определением разработаны различные конструкции устройств, именуемых цезиевыми реперами (эталоны) частоты. По сути дела это высокостабильные генераторы монохроматического излучения (сигнала) с частотой 9192631770 Гц. При соблюдении всех правил конструирования, изготовления, отладки и эксплуатации погрешность этого значения частоты не превышает $1 \cdot 10^{-13}$ и имеет тенденцию к снижению.

Все современные эталоны времени и частоты имеют в своем составе цезиевые реперы. В ряде случаев они же используются как хранители частоты (и шкал времени), т.е. работают непрерывно (используется группа таких хранителей, один из которых, по крайней мере, всегда работает, а другие могут останавливаться для проведения профилактических работ). В последнее время "классические" пролетные цезиевые реперы, с горизонтальным направлением полета атомов цезия, уступают свое место, так называемым "фонтанным", с вертикально-возвратным движением атомов цезия.

Другой вариант (используемый, в частности, в государственном эталоне России) основан на использовании в качестве хранителей других устройств, например, водородных генераторов. Их частота не постулирована, поэтому они должны периодически сличаться с цезиевыми реперами, но их долговременная нестабильность меньше и не превышает $1 \cdot 10^{-14}$.

Кроме реперов и хранителей, в состав эталона входят системы формирования сеток эталонных частот, эталонных интервалов времени, система внешних сличений с другими эталонами, аппаратура сличения шкал времени по метеорным следам с помощью радионавигационных станций и искусственных спутников Земли, перевозимые квантовые часы для сличения эталонов и определения запаздывания радио- и телевизионных трасс и уже описанный выше РОЧМ. Первичный эталон времени и частоты России ГЭТ 1-98 воспроизводит интервал времени от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^8$ с и значения частот от 1 до $1 \cdot 10^{14}$ Гц с СКО, не превышающим $5 \cdot 10^{-14}$ и НСП = $1 \cdot 10^{-14}$. Наличие аппаратуры формирования и хранения шкал времени вынуждает эталон времени и частоты в отличие от всех остальных эталонов функционировать непрерывно.

Основная шкала, хранящая эталоном, шкала равномерного атомного времени – ТА.

Единица силы электрического тока – ампер названа в честь А. Ампера (1775 - 1836 гг.). Шкала силы тока – аддитивная шкала отношений. Впервые общепринятые единицы силы электрического тока появились в системе СГС и ее вариантах. В системах СГС единица силы тока имела неудобные для практики размеры. Так, в системах СГС, СГСЭ и СГС_{ε₀} эта единица была равна $3,336 \cdot 10^{-10}$ А, а в системах СГСМ и СГС_{μ₀} – 10 А. В 1881 г. Международная конференция электриков (ныне МЭК) приняла систему абсолютных практических электрических единиц (АПЭ), в которую, как основные, вошли ом и вольт, а в качестве производных единиц – ампер, кулон и фарад. Так, впервые появилась единица, именуемая ампер. В 1884 г. МЭК установил, что ампер равен 0,1 единицы СГСМ и принял ее в качестве основной единицы, наряду с омом. Вольт стал производной единицей. При изготовлении эталонов для теоретически установленных АПЭ возникли трудности. Поэтому МЭК в 1893 г. ввел новые практические электрические единицы, получившие название "международных".

Международный ампер равнялся "силе неизменяющегося электрического тока, который выделял 0,001118 г серебра в секунду, проходя через водный раствор азотнокислого серебра, при соблюдении спецификации". Соответствующие эталоны единицы ампера – серебряные вольтметры – создавались децентрализованно различными национальными метрологическими учреждениями.

В 1948 г. взамен международных практических электрических единиц вновь были введены абсолютные (АПЭ), при этом размер ампера и других единиц изменился. Прежний международный ампер стал равным 0,99985 абсолютного, международный вольт – 1,00034 абсолютного, международный ом – 1,00049 абсолютного и т.д. АПЭ в 1946-1948 гг. вошли сначала в число единиц системы МКСА, а затем и в число единиц SI. Тогда же было принято определение – **ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона**. Оно не только по содержанию отличается от определения 1893 г., но и определяет, по сути, другую единицу (другой размер ампера). Определение связало ампер с тремя основными единицами – метром, килограммом и секундой и не может быть воплощено в какое-либо техническое устройство. Поэтому в большинстве стран в качестве эталонов ампера использовались установки, реализующие ампер либо измерениями силы (ампер-весы различных конструкций), либо измерениями момента сил, действующих на катушку с током, помещенную в магнитное поле другой катушки. Ампер-весы – это точные равноплечие весы, выполненные из немагнитных материалов. На одном конце коромысла подвешена чашка для размещения постоянного и дополнительного уравнивающих грузов. К другому концу коромысла подвешивается подвижная катушка, входящая коаксиально в неподвижную большего диаметра. Обмотки катушек (в простейшем случае) соединены последовательно. В обесточенном режиме весы уравниваются. При прохождении

через катушки электрического тока подвижная катушка втягивается в неподвижную (или выталкивается из нее). Для восстановления равновесия служит дополнительный уравнивающий груз.

По результатам метрологического исследования рассчитывают значение массы этого груза, соответствующее, например, силе электрического тока в 1 А. Включив в цепь катушек эталонный резистор, можно откалибровать эталонные меры ЭДС (эталонные меры силы тока не применяются). Эталоны, основанные на измерениях магнитной индукции методом ядерного магнитного резонанса, используются в качестве вторичных.

В России в 1992 г. утвержден национальный эталон ампера, размер которого воспроизводится с использованием "квантовых" эталонов вольты и ома. Эталон воспроизводит некоторые интервалы шкалы силы постоянного тока. В точке 1 А его СКО $< 1 \cdot 10^{-8}$, НСП $< 2 \cdot 10^{-7}$ (прежний эталон – ампер-весы имел СКО $\leq 4 \cdot 10^{-6}$, НСП $\leq 8 \cdot 10^{-6}$). Из сказанного не следует, что ампер (основная единица SI) вот-вот уступит свое место вольту или ому. Такое решение привело бы к неоправданной модификации всей SI (переопределению многих производных единиц), без получения каких-либо практических выгод.

Единица термодинамической температуры – кельвин (К) названа в честь английского физика Дж. Томсона (лорда Кельвина). Шкала термодинамической температуры – пропорциональная шкала отношений.

Температура в термодинамике определяется как производная от энергии тела в целом по его энтропии. Определяемая таким образом температура всегда положительна (т.к. положительна кинетическая энергия). Эту температуру называют абсолютной или температурой по термодинамической шкале, в краткой форме – термодинамической температурой. Понятие температуры применимо только к телам, состоящим из достаточно большого числа молекул, в применении к отдельной молекуле оно условно.

Впервые ввел понятие термодинамической температуры Дж. Томсон в 1848 г., базируясь на работах своих предшественников. Здесь совершенно необходимо упомянуть французского ученого Г. Амонтон (1702 г.), который впервые создал и применил газовый термометр постоянного объема, предсказал существование минимально возможной температуры (абсолютного нуля) и даже оценил ее значение: минус 242 градуса по современной шкале Цельсия. Для уровня физического эксперимента конца семнадцатого века – выдающийся результат.

Введению термодинамических температур предшествовал период применения практических интервальных шкал, базирующихся на двух произвольно выбранных точках; шкала Фаренгейта, 1714 г. (96 °F – температура человеческого тела и 32 °F – точка таяния льда); шкала Реомюра, 1730 г. (0 °R – точка таяния льда, 80 °R – точка кипения воды); и, наконец, шкала Цельсия, 1742 г. (100 °C точка таяния льда, 0 °C – точка кипения воды) – современный, привычный для нас вид шкалы Цельсия по совету К. Линнея придал позднее Штремер. В 1889 г. 1-я ГКМВ утвердила принятую МКМВ шкалу водородного газового термометра постоянного объема, основанную на реперных точках плавления льда (0 °C) и кипения воды (100 °C). Она была названа "практической", т.к. не учитывала поправок на отклонения свойств водорода от идеального газа.

Вопрос о соотношении термодинамической и практических температурных шкал заслуживает более подробного рассмотрения. Измерения температуры в термодинамической шкале с помощью газового (а также акустического, шумового, магнитного) термометра сложны, трудоемки и требуют применения уникальной, дорогостоящей аппаратуры. Воспроизводимость результатов при этом обычно хуже, чем, например, у платиновых термометров сопротивления (наиболее распространенных "держателей" практических шкал). Для большинства целей удобство и воспроизводимость важнее, чем точность по термодинамической шкале, например, при определении значений величин, для которых требуется определять не абсолютные значения, а разности температур.

Практические шкалы базируются, как правило, на ряде реперных точек, в качестве которых используются тройные точки, точки плавления и затвердевания различных веществ.

Следующая по времени практическая шкала МТШ-27 была одобрена 7-й сессией ГКМВ с оговоркой, что она является предварительной, подлежащей дальнейшему обсуждению. Затем была принята МПТШ-48, все еще базирующаяся на точках таяния льда и кипения воды. Решительный шаг был сделан в 1960 г., когда, наконец, было принято предложение Дж. Томсона, выдвинутое еще в 1854 г. и состоящее в том, что единица термодинамической температуры должна определяться интервалом от абсолютного нуля до одного выбранного значения температуры. Этой точкой была выбрана температура + 0,01 °C – температура тройной точки воды (тройная точка воды – температура, при которой в равновесии находятся ее твердая, жидкая и парообразная фазы), воспроизводимая гораздо точнее температуры точки таяния льда. В связи с этим возникла необходимость базировать на одном значении температуры и практические шкалы. В 1968 г. единицы температуры по термодинамической и новой практической шкале МПТШ-68 были одинаково определены как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды. Эта

единица получила название "кельвин" (К), вместо "градуса Кельвина". Наряду с термодинамической шкалой Томсона-Кельвина существует и применяется (в основном, в США) термодинамическая шкала Ренкина. Отсчет в ней также ведется от абсолютного нуля, но размер градуса Ренкина ($^{\circ}\text{Ra}$) равен градусу Фаренгейта. В этой шкале точка таяния льда соответствует $491,67^{\circ}\text{Ra}$, а точке кипения воды – $671,67^{\circ}\text{Ra}$. Перевод в температуру Кельвина выполняется по уравнению $t_{\text{K}} = 5/9 t_{\text{Ra}}$.

Определение, связавшее кельвин с одной реперной точкой, удачно и устойчиво. Так, например, в 1976 г. была опубликована работа Гильднера и Эдсингера (США), в которой, в частности, было показано, что температура кипения воды равна плюс $99,975^{\circ}\text{C}$. Если бы действовало прежнее определение, пришлось бы изменять размер кельвина, что привело бы к пересмотру всей шкалы, а так ничего делать не пришлось, просто была уточнена точка кипения воды. Не изменился и размер градуса Цельсия: по последнему определению эта шкала уже не связана с точкой кипения воды. Просто 0°C – точка таяния льда, а размер градуса Цельсия равен кельвину. В настоящее время действует максимально приближенная к термодинамической международная практическая шкала МТШ-90, принятая 17-й сессией Консультативного комитета по термометрии (ККТ) в 1989 г. и утвержденная МКМВ. Она начинается в точке $0,65\text{ K}$, сверху не ограничена. Расхождения между МТШ-90 и термодинамической шкалой не превышают $1\text{--}3\text{ мК}$. Она, как и все предыдущие практические шкалы, опирается на ряд реперных точек.

Современное определение: кельвин есть единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Государственные первичные эталоны России воспроизводят МТШ-90 в двух поддиапазонах: $0,8\text{...}273,16\text{ K}$ и $273,16\text{...}2773\text{ K}$. В состав низкотемпературного эталона в качестве основной его части входят две группы железо-родиевых и платиновых термометров сопротивления. Градуировочные зависимости термометров определены по результатам международных сличений, полученных национальными лабораториями России (ВНИИФТРИ), Англии, США, Австралии и Голландии. Каждая группа содержит по два платиновых и железородиевых термометра, постоянно находящихся в блоке сравнения. Передача шкалы термометрам (вторичным и рабочим эталонам) осуществляется приведением их в тепловой контакт с эталонным блоком сравнения и сличением в криостате. В набор контрольной аппаратуры эталона, помимо устройств для точных измерений сопротивлений, входит комплект установок для реализации температур реперных точек, газовый интерполяционный термометр с уникальным ртутным манометром и криостат сравнения. СКО эталона лежит в пределах $0,3\text{...}1,0\text{ мК}$, НСП не превышает $0,4\text{...}1,5\text{ мК}$ для любого значения температуры в пределах поддиапазона. Наименьшие значения соответствуют точке $0,8\text{ K}$.

В состав второго эталона входят платиновые термометры сопротивления, температурные лампы, аппаратура воспроизведения реперных точек в диапазоне $273,16\text{...}1355,77\text{ K}$. В относительных значениях СКО этого эталона лежит в пределах $5\cdot 10^{-5}\text{...}1\cdot 10^{-2}$, а НСП = $1\cdot 10^{-4}\text{...}1\cdot 10^{-3}$.

Единица силы света - кандела (от латинского *candela* – свеча). Шкала силы света – аддитивная шкала отношений. Световая единица впервые стала фигурировать в качестве основной в системе МКСЛМ (метр, килограмм, секунда, люмен) принятой в 1948 г. В 1956 г. ее сменила система МКСКД (метр, килограмм, секунда, кандела), вошедшая затем в СИ как ее часть, применяемая для световых величин. Каждый источник, испускающий свет в видимой области спектра, как естественный, так и искусственный, характеризуется силой света. В отличие от силы излучения (энергетической силы света) сила света источника видимого света определяется потоком излучения, воспринимаемого человеческим глазом, с учетом различной чувствительности глаза к различным участкам спектра электромагнитных колебаний. Определения канделы (свечи) и соответствующие эталоны неоднократно менялись. В 1860 г. во Франции в качестве эталона была принята масляная лампа Карселя. В Англии – нормальная спермацетовая, в Германии - нормальная парафиновая свеча.

Первый международный конгресс электриков (МКЭ) в 1881 г. отдал предпочтение платиновой свече Виоля, характеризуемой силой света, испускаемого площадкой в 1 см^2 поверхности расплавленной платины при температуре ее затвердевания. Однако для ее воспроизведения требовался 1 кг платины и, соответственно, значительные материальные затраты. Вторым МКЭ в 1889 г. рекомендовал в качестве единицы силы света десятичную или децимальную свечу, равную $1/20$ свечи Виоля.

В 1893 г. МКЭ рекомендовал в этом качестве амилацетатную лампу Гефнера-Альтенека с нормальной высотой пламени 40 мм при его ширине 8 мм . Значения этих единиц были различны. Если принять силу света лампы Гефнера-Альтенека за единицу, то силы света лампы Карселя $10,9$; спермацетовой свечи $-1,14$; парафиновой свечи $-1,22$; десятичной свечи Виоля $-1,13$. Эпоха эталонов силы света в виде светильников с открытым пламенем закончилась окончательно уже в XX веке. В 1915 г. была предложена так называемая "международная свеча", состоявшая из электрических ламп накаливания, а к 1921 г. усилиями Международной фотометрической комиссии по освещению (МКО) был создан международный эталон силы света (международной свечи) в виде группы постоянно возобновляемых электрических ламп накаливания с угольной ни-

тью (ламп Эдисона). При этом было установлено соотношение: 1 свеча Гейфнера равна 0,9 международной свечи (канделы).

В 1948 г. решением IX ГКМВ размер международной свечи был изменен. Она стала называться "новой свечой" и равнялась 0,99502 старой свечи. Это изменение было связано с уточнением значения фундаментальной константы – второй постоянной излучения $C_2 = 0,014388$ м·К, вместо принимавшегося ранее значения 0,01432 м·К.

В 1967 г. XIII ГКМВ приняла следующее определение: кандела равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600000$ м² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре затвердевания платины (2042 °К) и при давлении 101325 Па. При этом определении канделы оставалась неоднозначной связь световых и энергетических величин, которая стала проявляться все заметнее по мере совершенствования техники измерений и международных сличений. Поэтому в 1979 г. было принято новое, ныне действующее определение: **кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср**». При этом максимальная световая эффективность (683 лм/Вт) фактически была возведена в ранг точных (не имеющих погрешности) метрологических констант. Частота $540 \cdot 10^{12}$ Гц находится в зеленой области видимого света и соответствует максимуму чувствительности глаза. Видна зависимость канделы от целого ряда производных единиц SI.

Определение канделы распространяется на оптическое излучение любого спектрального распределения применением эмпирической функции $V(\lambda)$ – относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения (см. 7.7).

3.5. Другие системы единиц измерений

SI не является на сегодня единственно действующей. Применяется (и де-факто будет применяться еще долгие годы), в основном в англоязычных странах система фут-фунт-секунда. Основные единицы: фут равен 0,3048 м; фунт равен 0,45359237 кг; секунда; ампер; градус Ренкина ($^{\circ}\text{Ra} = 5/9$ К); кандела. Определение секунды, ампера и канделы в этой системе совпадают с определениями в SI.

В ранее действующем ГОСТ 8.417-81 во вводной части было указано, что стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и при публикации их результатов, если в них не рассматриваются и не используются результаты измерений конкретных физических величин. Хотя такого указания нет во вновь принятом Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации ГОСТ 8.417-2002 "ГСИ. Единицы величин" в теоретической физике применяются "естественные" системы единиц (Планка, Хартли, Людовичи). В системе Планка четыре основные единицы: гравитационная постоянная, скорость света, постоянная Планка, постоянная Больцмана. Система Хартли также содержит четыре основные единицы: заряд электрона, масса электрона, радиус первой боровской орбиты атома водорода, постоянная Планка. Система Людовичи содержит три основные единицы: гравитационная постоянная, диэлектрическая проницаемость вакуума, магнитная проницаемость вакуума. Однако эти системы, несмотря на то, что они опираются на естественные, природные единицы, а не на условные, выбранные научной общественностью, и успешно применяются в соответствующих областях физики, мало пригодны для повседневного применения в привычном для нас макром мире. Дело в том, что размеры их единиц очень малы. Например, единица длины в системе Планка равна $4,02 \cdot 10^{-35}$ м, в системе Людовичи – $4,88 \cdot 10^{-35}$ м. Единица массы в системе Планка равна $5,43 \cdot 10^{-8}$ кг, а в системе Людовичи $6,60 \cdot 10^{-9}$ кг и т.п.

3.6. Внесистемные и безразмерные единицы

Как уже было сказано ранее, под внесистемными единицами понимают единицы, не вошедшие в SI. Совокупность этих единиц внутренне неоднородна и нуждается в некоторой классификации. Более того, SI принципиально не могут быть охвачены числа, знаки, баллы неметрических шкал, вообще не имеющих единиц (см. 2.4). В международном документе № 2 МОЗМ предлагается следующая классификация этой совокупности единиц: внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами SI; единицы и их наименования, которые временно могут применяться до срока, который должен быть установлен национальным предписанием и которые не должны применяться там, где это не было принято; единицы и их наименования, которые изымаются из обращения и не должны применяться.

Такое деление явно искусственно, внутренне неоднородно и не опирается на сколь угодно существенные, объективные, классификационные признаки и на теорию шкал измерений. Не формализована грань между применением единицы всюду или в специальной области. Нет четкой границы и между временным применением и изъятием. Так, например, в первую группу входят единицы, относящиеся к шкалам разностей (интервалов) – минута, час, сутки, неделя, месяц, год, к шкалам отношений – тонна, карат, текс и др., а также и к абсолютным шкалам – оборот, 1 градус (угловой), минута, секунда (угловые). Мы будем пользоваться другой классификацией, на наш взгляд, более обоснованной.

Первую группу в ней образуют размерные единицы, характеризующие величины, описываемые метрическими шкалами. Такие единицы отличаются от «законных» производных единиц SI только одним признаком – они содержат не кратное десяти в положительной или отрицательной степени число единиц SI. Как правило, значения переводных коэффициентов определены с достаточной для практики точностью. Поэтому их можно было бы назвать «некогерентными» единицами SI и не ограничивать области применения. Примерами таких единиц служат торр (1 торр = 133,3 Па), морская миля (1 м. миля равна 1852 м, точно), световой год (1 св.год. = $9,4605 \cdot 10^{15}$ м), парсек (1 пк = $3,0857 \cdot 10^{16}$ м) и т.п.

Вторую группу образуют безразмерные «внесистемные» единицы, которые характеризуют относительные величины, описываемые абсолютными шкалами (см. табл. 3.1).

Единицы абсолютных шкал

Таблица 3.1

Величина	Естественная единица измерения	Кратные и дольные			
		Название	Обозначение		Соотношение с естественной единицей
			Русское	Международное	
1	2	3	4	5	6
Относительные величины (отношения одноименных величин *)	Арифметическая (безразмерная) единица "раз" (после численного значения величины не пишется)	процент промилле процентмилле миллионная доля	$\%$ ‰ ‱ млн^{-1}	$\%$ ‰ ‱ ppm	10^{-2} безразмерной единицы (б.е.) 10^{-3} б.е. 10^{-5} б.е. 10^{-6} б.е.
Плоский угол, географические широта и долгота, фаза гармонического колебания	Полный угол (один оборот), период, цикл	радиан градус угловой минута угловая секунда угловая метрический градус прямой угол румб тысячная (дистанции)	рад ...° ...' ..." град (гон) ...А румб Т	rad ...° ...' ..." gon или ... ^g ...А R —	$1/2\pi$ часть полного угла (п.у.) $1/360$ часть п.у. $1/21600$ часть п.у. $1/1296000$ часть п.у. $1/400$ часть п.у. $1/4$ часть п.у. $1/32$ или $1/16$ часть п.у. соответственно в навигации и метеорологии. $1/(2\pi \cdot 10^3)$ п.у.
Телесный угол	Полный телесный угол**)	стерадиан квадратный градус	ср \square°	sr \square	$1/4\pi$ часть полного телесного угла (п.т.у.) $(\pi/180)^2$ часть п.т.у.
Частотные интервалы	Арифметическая единица	Декада октава	дек октава		Отношение граничных частот равно: 10 для декады, 2 для октавы
Логарифмические величины (логарифмы отношений произвольных начений однородных величин)	Арифметическая единица логарифма относительной величины	бел децибел непер бит	Б дБ Нп бит	В dB Np bit	$\lg 10 = 1$ 0,1 Б $\ln e = 1n(2,718284...) = 1$ $\log_2 2 = 1$
Счетные (штучные) величины	Арифметическая единица	эйнштейн штука пара десяток дюжина гросс тысяча миллион единиц товара ***)	Э шт пара десяток дюжина гросс тыс. млн		$6,0221367 \cdot 10^{23}$ б.е. 1 б.е. 2 б.е. 10 б.е. 12 б.е. 144 б.е. 10^3 б.е. 10^6 б.е.
Количество информации	Единица двоичной системы счисления	бит байт килобайт мегабайт гигабайт нат	бит байт кбайт Мбайт Гбайт нат	bit byte или b Kb Mb Gb —	$\log_2 2 = 1$ 8 бит 1024 байт 1024 кбайт 1024 Мбайт 1,44 бит
Показатель преломления	Арифметическая единица	—	—	—	—
Критерии подобия (числа Рейнольдса, Фруда, Маха, Кнудсена, Эйлера и др.)	Арифметическая единица	—	—	—	—

*) Примеры относительных величин: КПД; добротность; коэффициенты пропускания, отражения, поглощения, ослабления и усиления; альbedo; глубина модуляции и т.д.
 **) Совокупность всех элементарных телесных углов по всем направлениям в пространстве вокруг точки образует сферу
 ***) Единицы счета в сочетании с названием товара: банок, бобин, изделий, катушек, кип, комплектов, контейнеров, коробок, кусков, мест, наборов, пакетов, партий, рулонов, упаковок, экземпляров, ящиков и т.д.

Безразмерные единицы не зависят от выбора системы единиц, но хорошо сочетаются с любыми системами. Как уже упоминалось, их с равными основаниями можно называть «надсистемными» или «внесистемными» единицами. К этой группе единиц относятся включенные в SI единицы плоского и телесного углов – радиан и стерадиан, и трудности их отнесения к какой-либо

группе единиц SI (дополнительные единицы; безразмерные производные единицы; единицы, которые предлагается интерпретировать как безразмерные производные SI) объясняются стремлением включить в SI единицы "надсистемные".

К третьей группе можно отнести безразмерные единицы, которые используются для выражения значений условно безразмерных величин – размерных величин, преобразованных делением на некоторые фиксированные (опорные) значения тех же величин.

Логарифмы таких отношений образуют логарифмические шкалы с фиксированным нулем. Таким образом, оказывается возможным выражать значения размерных величин в безразмерных единицах. Сложение или вычитание величин, выраженных в таких логарифмических единицах, когда это имеет смысл, сводится к определению логарифма суммы или разности величин, логарифмы которых известны. Примеры таких величин и единиц их измерения представлены в табл. 3.2.

Единицы условно безразмерных величин

Таблица 3.2

Величина	Единицы измерения			Определение, опорные величины и их значения
	Название	Обозначения		
		Русское	Международное	
Уровень энергетических величин	Логарифмическая единица	дБ (отн.Р _о)	dB(re.Р _о)	10 lg P/P _о , где Р - измеряемая величина, Р _о - опорное значение, например, 1Вт для уровня электрической мощности или 10 ⁻¹² Вт/м ² для уровня интенсивности звука
Уровень силовых величин	Логарифмическая единиц	дБ (отн. F _о)	dB(re.F _о)	20 lg F/F _о , где F - измеряемая величина, F _о - опорное значение, например, 1мВ для уровня электрического напряжения или 2·10 ⁻⁵ Па для уровня звукового давления
Водородный показатель рН	Единица логарифма безразмерной величины	1	1	pH = – lg(m _н γ _н /m ^о), где m _н - моляльность ионов водорода, моль· кг ⁻¹ ; γ - моляльный коэффициент активности, безразмерный; m ^о - моляльность ионов водорода в стандартном состоянии, равная 1 моль/кг - опорное значение
Относительная диэлектрическая проницаемость	Арифметическая единица	1	1	ε = ε _а /ε _о , где ε _а - абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф·м ⁻¹ ; ε _о - абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, равная 8,854·10 ⁻¹² , Ф·м ⁻¹ – опорное значение
Высота звука в музыке	Октава	Октава	—	Отношение граничных частот октавы равно 2. Опорным значением шкалы высоты звука является частота 440 Гц - нота “ЛЯ” первой октавы

Примечание: Символ “1” обычно опускается в сочетании с численным значением.

Примечание: Символ "1" обычно опускается в сочетании с численным значением.

Четвертую группу составляют счетные единицы, которые бывают и размерными и безразмерными. Сразу отметим, что некоторые размерные счетные единицы входят в число основных и производных единиц SI. В качестве примера приведем беккерель, (число распадов в секунду, с размерностью Т⁻¹), моль – число частиц, равное числу Авогадро (см. 3.4).

В наши дни широкое распространение получили безразмерные счетные единицы, обязанные своему появлению информатике. Это, в первую очередь, бит и байт. Они хорошо сочетаются

с традиционными единицами SI; пропускная способность канала связи – байт/секунду, плотность записи – байт/мм или байт/мм² и т.п. (сравним – оборот в секунду). Внешне такие комбинированные единицы очень похожи на производные единицы SI. Но, во-первых, образующие их единицы количества информации безразмерны. Во-вторых, они имеют кратные единицы, но не имеют дольных. В-третьих, в информатике и вычислительной технике используется двоичная система счисления (см. 7.12).

Нетрудно заметить, что по признаку «некогерентности» (несоблюдения десятичного принципа образования кратных единиц) эти единицы имеют нечто общее с первой группой внесистемных единиц (по нашей классификации), а по признаку отсутствия размерности (в принятом SI смысле) – со второй группой. Именно это обстоятельство и предопределило выделение нами счетных единиц в отдельную группу. Она заслуживает самого пристального внимания метрологов в связи с бурным развитием информатики и вычислительной техники.

Возможно, не стоит вообще подразделять внесистемные единицы на какие-либо группы, а внесистемные единицы, полностью отвечающие определению производной единицы SI (например, тонну, диоптрию) включить в их число, например, с примечанием о нежелательности их широкого применения.

3.7. Системы единиц измерений и ФФК

Системы единиц измерений неразрывно связаны с фундаментальными физическими константами (ФФК). ФФК – постоянные, входящие в уравнения, описывающие фундаментальные законы природы и свойства материи. ФФК определяют точность, полноту и единство наших представлений об окружающем мире, возникая в математических моделях наблюдаемых явлений в виде универсальных коэффициентов в соответствующих математических выражениях. Благодаря ФФК возможны инвариантные соотношения между измеряемыми величинами.

Таким образом, ФФК могут также характеризовать непосредственно измеряемые свойства материи и фундаментальных сил природы и совместно с теорией должны объяснять поведение любой физической системы как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровне. К таким ФФК относятся: скорость света в вакууме, гравитационная постоянная, постоянная Планка, заряд электрона, постоянные Авогадро, Фарадея, Больцмана, универсальная газовая постоянная и многие другие. Законы природы познаются на основе обобщения опытных данных, полученных экспериментально, и отражают объективные закономерности существующие в природе. Математические записи фундаментальных законов природы выражают количественные связи между различными величинами, что позволяет устанавливать численные значения постоянных, входящих в эти уравнения.

Установлением численных значений ФФК, на основе обобщения достижений мировой науки, занимается Международный комитет по численным данным для науки и техники (КОДАТА). Публикации КОДАТА в России переводятся и публикуются государственной службой стандартных справочных данных (ГСССД) в виде таблиц стандартных справочных данных (например, ГСССД 1-87).

Не умаляя объективного значения фундаментальных законов природы, отметим, что входящие в математические формулы этих законов постоянные (ФФК) неизвестны с абсолютной точностью, их численные значения постоянно уточняются с развитием науки и техники. Это подтверждается тем, что в таблицах ФФК КОДАТА и, соответственно, ГСССД численные значения ФФК приведены с указанием относительного среднего квадратического отклонения.

Как уже говорилось в предыдущих параграфах, установление любой системы единиц измерений начинается с выбора основных единиц системы и их размера. При этом постоянные, входящие в уравнения фундаментальных законов природы, естественно, как по численным значениям, так и по размерности, определяются выбором основных единиц системы измерений. Более того, некоторые ФФК обязаны своим появлением именно выбором системы единиц измерений, например, магнитная постоянная μ_0 и электрическая постоянная ϵ_0 существуют только в системах СГСЭ, СГСМ и SI, в системе СГС этих постоянных нет, вернее, они равны безразмерной единице.

Появление постоянных μ_0 и ϵ_0 в SI обусловлено тем, что в ней использована рационализованная форма написания уравнений электромагнетизма, предложенная впервые Хевисайдом, в которой относительно более часто встречающиеся на практике уравнения приобретают более симметричный, удобный вид.

Значения ФФК, полученные с опорой на размер единиц, воспроизводимых наиболее точными национальными эталонами единиц измерений мира, представляют собой предельные зна-

ния фундаментальных свойств материи на сегодняшний день. С одной стороны, очень часто проверка справедливости физических теорий определяется точностью измерений постоянных, а с другой, – твердо установленные экспериментальные данные кладутся в фундамент новых физических теорий.

Большинство ФФК, включенных в таблицы КОДАТА и, соответственно, в ГСССД взаимно зависимы. Поэтому определение относительного среднего квадратического отклонения ФФК возможно только в случае, если некоторым основным константам будет приписано абсолютно точное значение.

КОДАТА (1998 г.) определил, что следующие фундаментальные физические константы имеют точное значение, т.е. не имеют погрешности:

- скорость света в вакууме $c = 299792458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$,
- магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н} \cdot \text{А}^{-2}$,
- электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$,
- моль-масса $M(^{12}\text{C}) = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{mol}^{-1}$,
- постоянная эффекта Джозефсона $K_{J-90} = 483597,9 \text{ ГГц} \cdot \text{В}^{-1}$,
- постоянная эффекта Кличинга $R_{K-90} = 25812,807 \text{ Ом}$.

Остальные ФФК приведены в таблицах КОДАТА и ГСССД с указанием относительных среднеквадратических отклонений, которое необходимо учитывать при применении их в метрологии.

Литература к главе 3

1. Брянский Л.Н. В поисках точного времени // Законодательная и прикладная метрология. – 1995. – № 4. – С. 54-58
2. Брянский Л.Н. Независимы ли основные единицы // Законодательная и прикладная метрология. – 1997. – № 2. – С. 39-40
3. Бурдун Г.Д. Справочник по международной системе единиц. – М.: Изд-во стандартов. – 1977. – 232 с.
4. Брянский Л.Н. SI знакомая и незнакомая // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 2. – С. 48-50
5. Маликов М.Ф. Основы метрологии. – М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при СМ СССР. – 1949. – 479 с.
6. Брянский Л.Н. Одна единица, две, три, четыре, семь. Что дальше? // Законодательная и прикладная метрология. – 1997. – №1. – С. 55-56
7. Селиванов П.М. Важнейшие международные нормативные документы по метрологии // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 4. – С. 28-32
8. Le Système international d'unités (The International System of Units). – 7^e édition. – Organisation intergouvernementale de la Convention du Mètre. – Pavillon de Breteuil (France): BIPM, 1998. – 152 с.
9. ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин
10. Брянский Л.Н. Секунда // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 3. – С. 54-56
11. Брянский Л.Н. Ампер // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 4. – С. 55
12. Брянский Л.Н. Кельвин // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 5. – С. 49-50
13. Куинн Т. Температура. – М.: Мир. – 1985. – 448 с.
14. Брянский Л.Н. Кандела // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 6. – С. 54-55
15. Физический энциклопедический словарь. / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М.Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич. – М.: Сов. энциклопедия. – 1984. – 944 с.
16. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Внесистемные единицы измерений // Законодательная и прикладная метрология. – 1998. – № 5. – С. 44-46
17. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Шкалы измерений // Законодательная и прикладная метрология. – 1993. – № 3. – С. 44-48
18. МД № 2 МОЗМ. Единицы физических величин, узаконенные к применению. РИЦ ТД. – М. – 1993
19. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Необходимость обновления метрологической парадигмы // Измерительная техника. – 1998. – № 8. – С. 15-21

20. МИ 2365-96. ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения".– М.: ВНИИФТРИ.– 1996.– 34 с.
21. Крупин Б.Н. Логарифмические шкалы и величины // Законодательная и прикладная метрология.– 1994.– № 1.– С. 36-39
22. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Безразмерные единицы и числа // Измерительная техника.– 1999, № 9.– С. 3-10
23. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. О "размерности" безразмерных величин // Законодательная и прикладная метрология.– 1999.– № 4.– С. 48-50
24. Брянский Л.Н., Дойников А.С. О современном состоянии международной системы единиц // Исследования в области общей и квантовой метрологии: сб. науч. тр. /ВНИИФТРИ.– М.: 1991.– С. 10-15
25. Брянский Л.Н. Кое-что о размерностях // Законодательная и прикладная метрология.– 1993.– №3.– С. 49-50
26. Брянский Л.Н. Отменены, но не сдаются // Законодательная и прикладная метрология.– 1993.– №5.– С. 55
27. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. О терминах "единица величины" и "единица физической величины" // Законодательная и прикладная метрология. – 1955.– №1.– С. 21-22
28. Брянский Л.Н. Килограмм и ньютон // Законодательная и прикладная метрология.– 2000.– №6.– С. 54-55

Глава 4 ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Регламентированные показатели точности измерений

В отечественных нормативных документах (НД) по метрологии (см. табл. 4.1) в качестве показателей точности измерений до недавнего времени использовались только характеристики погрешности. Нет необходимости характеризовать здесь эти широко применяемые НД.

В 1999 г. появилась рекомендация МИ 2552-99, в которой впервые для нашей страны утверждается целесообразность использования неопределенности измерений, но только в международных метрологических работах. Затем появился ГОСТ 8.000-2000, которым официально вводится в государственную систему измерений понятие и термин «неопределенность измерений». Это стало возможным только после длительных дискуссий и появления перевода «Руководство по выражению неопределенности в измерении» рекомендательного документа, выпущенного рядом международных организаций по метрологии и стандартизации (далее «Руководство»). Однако до сих пор существует ряд неясных вопросов по соотношению и применению понятий «погрешность измерений» и «неопределенность измерений», попытка анализа которых сделана в следующих параграфах этой главы.

Таблица 4.1

Основные действующие нормативные документы, регламентирующие точность измерений

Обозначение и название НД	Регламентируемый аспект точности измерений
ГОСТ Р 1.5 -2001 ГСС. Общие требования к построению, изложению и содержанию стандартов	Требование указывать допустимую погрешность метода контроля
ГОСТ Р 8.000-2000 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения	Методы оценивания погрешности и неопределенности измерений как объекты деятельности по обеспечению единства измерений
ГОСТ 8.381-80 ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей	Способы выражения погрешностей первичных и вторичных эталонов
ГОСТ 8.061-80 ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение	Пределы (границы) погрешностей средств и методов передачи размеров единиц
ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений	Номенклатура метрологических характеристик средств измерений и способы их нормирования
ГОСТ 8.401-80 ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования	Деление средств измерений на классы точности

ГОСТ 8.315-97 ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов	Установление границ допустимого значения погрешности аттестованного значения стандартного образца с заданной вероятностью
ГОСТ Р 8.563-97. ГСИ. Методики выполнения измерений	Требование указывать приписанные характеристики погрешности измерений
МИ 1317-86 ГСИ. Результаты измерений и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров	Формы представления характеристик погрешностей измерений (границы погрешности с заданной вероятностью, СКО случайной и систематической составляющих, границы неисключенной систематической составляющей с заданной вероятностью и др.)
ГОСТ 8.207-76 ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений МИ 1552-86 ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей	Алгоритмы оценивания характеристик погрешностей результатов измерений
РМГ 43-2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»	Рекомендации по применению международного документа о неопределенности измерений
ГОСТ Р ИСО 5725-1-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений	Основные положения по методам и процедурам оценки точности (правильности и прецизионности) методов и результатов измерений: систематической погрешности лаборатории при реализации конкретной МВИ, лабораторной составляющей систематической погрешности метода измерений (МВИ), повторяемости, воспроизводимости, пределов повторяемости и воспроизводимости

4.2. Международное Руководство по выражению неопределенности в измерениях

4.2.1. История появления Руководства

Понятие неопределенности давно фигурирует в физике (соотношение неопределенностей в квантовой механике) и метрологии, но до последних нескольких лет практически не использовалось в нормативных документах государственной системы измерений России. Неопределенность измерений в самом широком смысле по Руководству означает сомнение относительно достоверности результата измерения.

История возникновения Руководства изложена в предисловии к нему и многократно комментировалась в отечественных публикациях. В 1978 г. Международный комитет мер и весов (МКМВ), признавая отсутствие международного единства по выражению неопределенности в измерениях, обратился к Международному бюро мер и весов (МБМВ) с просьбой рассмотреть эту проблему совместно с лабораториями национальных эталонов и разработать соответствующую рекомендацию. МБМВ разослало подробную анкету, в ответах на которую почти все лаборатории полагали, что важно прийти к международно-признанной процедуре выражения измерительной неопределенности и объединения частных компонентов неопределенности в одну общую неопределенность. Однако не было единого мнения о методе, которым при этом следует пользоваться. Затем рабочая группа разработала Рекомендацию INC-1 (1980 г.) «Выражение экспериментальных неопределенностей», которая была принята МКМВ в 1981 г. и вновь подтверждена в 1986 г. Эта краткая первая рекомендация состоит из следующих пяти пунктов (раздел 0.7 перевода Руководства).

1) Неопределенность в результате измерения обычно состоит из нескольких составляющих, которые можно сгруппировать в две категории в соответствии со способом оценки их численного значения: А – составляющие, которые оцениваются путем применения статистических методов, В – составляющие, которые оцениваются другими способами. Не всегда можно провести простую параллель между классификацией по категориям А и В и ранее используемой классификацией по «случайным» и «систематическим» неопределенностям. Термин «систематическая неопределенность» может вносить неясность, и поэтому его следует избегать. Любой подробный отчет о неопределенности должен содержать полный список составляющих с указанием для каждой из них метода, используемого для получения ее численного значения.

2) Составляющие в категории А характеризуются оцененными дисперсиями s_i^2 (или оцененными стандартными отклонениями s_i) и числом степеней свободы ν_i . В случае необходимости следует указать ковариации.

3) Составляющие в категории В должны характеризоваться величинами u_j^2 , которые можно рассматривать как аппроксимации к соответствующим дисперсиям, существование которых предполагается. Величины u_j^2 можно рассматривать как дисперсии, а величины u_j – как стандартные отклонения. При необходимости ковариации должны рассматриваться аналогично.

4) Суммарная неопределенность должна характеризоваться численным значением, полученным путем использования обычного метода для сложения дисперсий. Суммарная неопределенность и ее составляющие должны выражаться в виде «стандартных отклонений».

5) Если в особых случаях необходимо умножить суммарную неопределенность на какой-то множитель, чтобы получить общую неопределенность, то всегда должен быть указан используемый множитель.

Разработка подробного Руководства, основанного на рекомендации INC-1, была передана Международной организации по стандартизации (ИСО) для возможно лучшего выражения потребностей, возникающих из широких интересов промышленности и торговли (служб стандартизации, калибровки, аккредитации лабораторий, метрологии). Для этого в Технической консультативной группе по метрологии (TAG4) ИСО была учреждена Рабочая группа 3 (ISO/TAG4/WG3), состоящая из экспертов МБМВ, МЭК ИСО и МОЗМ. В результате работы этой группы и было составлено рассматриваемое Руководство, опубликованное по поручению семи организаций:

Международное бюро мер и весов (МБМВ);
Международная электротехническая комиссия (МЭК);
Международная федерация клинической химии (МФКХ);
Международная организация по стандартизации (ИСО);
Международный союз по чистой и прикладной химии (ИЮПАК);
Международный союз по чистой и прикладной физике (ИЮПАП);
Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ).

Руководство соответствует всем приведенным выше положениям Рекомендации INC-1 (1980 г.) и нацелено на обеспечение полной информации о том, как составлять отчеты о неопределенностях в измерениях, и на формирование основы для международного сличения результатов измерений. При этом имеется в виду то, что всемирное единство в оценке и выражении неопределенности во всех видах измерений обеспечило бы должное понимание и правильное использование широкого спектра результатов измерений в науке, технике, торговле, промышленности и регулирующих актах.

В силу международного «Соглашения о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровки», в котором участвуют метрологические институты Госстандарта России, Руководство обязательно используется для выражения неопределенностей в измерениях в процессе международных сличений исходных национальных метрологических эталонов.

Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации принял РМГ 43-2001 «ГСИ. Применение "Руководства по выражению неопределенности измерений"» и создал рабочую группу при НТКМетр для координации работ по внедрению оценки неопределенности в метрологическую практику государств СНГ.

Некоторые международные организации уже разрабатывают на основе Руководства документы более узкого назначения. Так, например, опубликован документ, устанавливающий общие правила для оценивания и выражения неопределенности в количественном химическом анализе (аналитические измерения). Перевод этого документа так же, как и Руководства, осуществлен во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

4.2.2. Структура Руководства

Руководство и его перевод весьма велики по объему (более 100 стр.) для нормативных документов. Однако основной текст Руководства составляет только около четверти общего объема. Остальной объем приходится на многочисленные приложения:

А – Рекомендации Рабочей группы и МКМБ,
В – Основные метрологические термины,
С – Основные статистические термины и понятия,
D – “Истинное” значение, погрешность и неопределенность,
Е – Мотивация и основание для Рекомендации INC-1 (1980),
F – Практические рекомендации по оцениванию составляющих неопределенности,
G – Степени свободы и уровни доверия,

Н – Примеры,
J – Словарь основных символов,
К – Библиография, Алфавитный указатель.

В основном тексте Руководства рассмотрено назначение Руководства, даны определения терминов и подробные мотивированные разъяснения смысла соответствующих терминам понятий. Определения основных терминов таковы:

– Неопределенность (измерения) – параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует рассеяние (разброс) значений: они могут быть достаточно обоснованно приписаны измеряемой величине.

– Стандартная неопределенность – неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения.

– Комбинированная (суммарная стандартная неопределенность) – стандартная неопределенность результата измерения, когда результат получают из значений ряда других величин. Она равна положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются вариациями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерения изменяется в зависимости от изменения этих величин.

– Расширенная неопределенность – величина, определяющая интервал вокруг результата измерения, в пределах которого, можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

Далее приведен (с подробными пояснениями и примерами) математический формализм моделирования измерения в общем виде, оценивания стандартных неопределенностей по типу А и В, определения суммарной (комбинированной) стандартной неопределенности и общей (расширенной) неопределенности. Затем даны общие и конкретные рекомендации по составлению отчета о неопределенности в измерении и возможных формах представления результатов измерения. В заключительном разделе основного текста представлено краткое описание процедуры оценивания и выражения неопределенности. Многочисленные примеры использования положений Руководства в основном тексте и приложениях, безусловно, способствуют его правильному пониманию и применению. Возможные варианты математических формул, используемых для вычислений неопределенностей, понятия и термины, подробно разъяснены в приложениях. Все это обуславливает возможность практического использования Руководства, несмотря на его большой объем. Хотя желательно иметь для широкой практики упрощенный документ малого объема.

Аналогичную структуру имеет и документ, модифицированный применительно к процедуре количественного химического анализа, представляющего собой специфический вид измерений. Подробно разбирать этот документ не будем, заметим только, что в приложениях среди других материалов представлена общая структура аналитической процедуры и детально разобранные примеры оценки неопределенностей четырех характерных видов количественного химического анализа.

4.2.3. Сравнительный анализ Руководства и нормативных документов отечественной государственной системы измерений (ГСИ)

Появление Руководства было встречено ведущими отечественными метрологами рядом довольно резких критических публикаций. Высказывалось мнение о надуманности термина “неопределенность” и о его неприменимости в отечественной метрологической практике. Для того чтобы понять причины такого явного недовольства, необходимо сравнить построение некоторых основных понятий, на которые опираются отечественная нормативная метрологическая документация и Руководство. Для удобства сравнения схожие (но не эквивалентные!) понятия помещены в таблицу 4.2

На первый взгляд может показаться, что Руководство выводит из международной практики все основные понятия, с которыми ассоциируются история и достижения отечественной метрологии, что и превращает его в предмет активной критики. На самом деле сложившаяся ситуация не столь драматична в силу двух следующих обстоятельств. Во-первых, следует воспринимать введение в практику понятия “неопределенность” как естественное развитие метрологии, что было бы совершенно невозможно без накопления огромного опыта практического применения понятия «погрешность». Во-вторых, методы оценивания характеристик погрешностей и неопределенностей имеют общую базу в виде аппарата теории вероятностей и математической статистики, поэтому, несмотря на все смысловые различия, на практике разница в технике расчетов и расхождение конечных результатов оценивания будут минимальными.

Сравнительный анализ Руководства и ГСИ

Таблица 4.2

Отечественная метрология	Руководство
Существует истинное значение измеряемой величины. Истинное значение величины отыскать невозможно. Оно на практике заменяется действительным значением	Понятие “истинное значение измеряемой величины” не используется. Используется понятие “значение измеряемой величины”
Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Характеристики погрешности	Неопределенность измерения – параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует область значений, в котором может находиться измеряемая величина
Случайная погрешность – составляющая погрешности измерений, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины	Оценка типа А (неопределенности) – метод (количественной) оценки неопределенности путем статистической обработки серии наблюдений
Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерений, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины	Оценка типа В (неопределенности) – метод (количественной) оценки неопределенности другими способами, отличными от статистической обработки серии наблюдений

Построение теории измерений на основе понятий “истинное значение измеряемой величины” и “погрешность” в свое время было огромным достижением, так как дало реальное практическое наполнение абстрактным понятиям и методам математической статистики. Кроме того, такая теория измерений стала органичной и неотъемлемой частью материалистического мировоззрения, поскольку она дополняет и иллюстрирует практическое применение доминировавшего в нашей стране философского учения об относительной, абсолютной и объективной истине. В этом контексте становится понятным высказывание о том, что “идейной основой замены термина “погрешность” на “неопределенность” является, по существу, философская посылка агностицизма о том, что “истинное значение” непознаваемо, и погрешность, как базирующаяся на использовании истинного значения измеряемой величины, теряет смысл”. С другой стороны, с развитием естественных наук и философии, выявилась возможность утверждения о неоднозначности истины. Примером такой неоднозначности является хорошо известный из квантовой механики корпускулярно-волновой дуализм. Даже не выходя за рамки традиционных материалистических представлений, необходимо признать, что в этих условиях понятие “истинное значение” оказывается слишком жестким, так как подразумевает единственность и постоянство такого значения, которое идеальным образом отражает количественную характеристику исследуемого свойства объекта, что, вообще говоря, отнюдь не очевидно, как и само существование такого значения (например, из-за фундаментального соотношения неопределенностей). Растущие потребности науки и производства в развитии новых видов измерений вступили в некоторое противоречие с возможностями традиционной теории измерений обеспечить эти виды измерений адекватной теоретико-методической поддержкой. Это привело, с одной стороны, к необходимости обновления метрологической парадигмы, а с другой стороны, к своего рода естественной “защитной реакции” представителей традиционной метрологии в виде попыток сузить поле своей деятельности вплоть до измерений только в метрических шкалах и только величин, имеющих выражение в единицах SI. При этом другие виды измерений относятся ко “второму сорту” и зачастую в них привносятся недопустимые понятия и процедуры обработки результатов наблюдений (например, вычисления среднего арифметического и стандартного отклонения в шкалах порядка).

В Руководстве содержатся достаточно полные пояснения и аргументы в пользу предпочтительного применения понятия “неопределенность” вместо понятия “погрешность”, причем отмечается не аксиоматический, а операционный характер определения введенных понятий. Основным аргументом отказа от использования идеального истинного значения измеряемой величины является то, что, согласно определению, оно остается неизвестным, а для вычисления погрешностей используются его оценки в виде реально полученного в результате измерений действительного значения. Таким образом, на практике, в отличие от теории, действительное значение измеряемой величины и ее истинное значение принимаются тождественными, а оценки идеальных по-

грешностей и их составляющих реализуются в виде рассматриваемых в Руководстве оценок неопределенностей. С операционной точки зрения исследователю нет необходимости классифицировать источники неопределенностей как случайные и систематические, а достаточно знать, каким образом они должны оцениваться и суммироваться для образования оценки результирующей неопределенности.

В отечественной метрологии методы обработки результатов наблюдений, расчет результатов измерений и оценивание характеристик погрешностей определены, в соответствии с понятийно-терминологической основой по ГОСТ 16263-70 (ныне действует РМГ 29-99), в следующих основных документах: ГОСТ 8.381-80 для эталонов, МИ 1552-86 для прямых однократных измерений, ГОСТ 8.207-76 для прямых измерений с многократными наблюдениями и МИ 2083-90 для косвенных измерений, МИ 1317-86 для способов использования результатов измерений и характеристик погрешности при испытаниях образцов продукции и контроле параметров. Здесь необходимо отметить выдающуюся организующую роль терминологического ГОСТ 16263-70 в формировании и развитии отечественной метрологии. Перечисленные и другие документы ГСИ, по-видимому, еще долго и успешно будут применяться до возникновения естественной потребности их обновления в ходе общего развития метрологии и других информационных направлений науки. Сиюминутной необходимости в полной отмене или замене этих документов другими нет. Разработчики Руководства спокойно и с пониманием отнеслись к использованию понятия “погрешность” и даже привели пример (п.3.4.5 Руководства) процедуры измерения, в которой “погрешность” вполне уместна и применима корректно. Достаточно принять “неопределенность” в широком смысле в качестве более общего понятия по сравнению с “погрешностью”.

Однако детальный анализ нормативных документов ГСИ позволяет сделать вывод об их излишней определенности и жесткости. В качестве единственной модели распределения случайной составляющей погрешности принимается нормальное распределение, а в качестве единственной модели распределения неисключенных систематических составляющих погрешности принимается равномерное распределение. Хотя такие модели широко распространены и часто реализуются на практике с высокой точностью, приравнивание нормального и равномерного распределения к абсолютно истинным распределениям недопустимо и неправомерно, так как в результате наблюдений и анализа применяемой модели измерения могут быть установлены совершенно иные законы распределения как случайной, так и неисключенной систематической составляющих погрешности. Кроме того, разделение погрешностей на случайные и систематические носит условный характер и сильно зависит от модели, метода и способа реализации измерений. Один и тот же источник погрешностей в разных ситуациях может рассматриваться как источник и случайных и систематических погрешностей, причем часто разделить их с достаточной степенью достоверности не представляется возможным.

Как следствие операционного (не аксиоматического) способа введения понятий, в Руководстве нет никаких указаний на классификацию неопределенностей в зависимости от их источников и характера проявления в ходе исследования. Классификации подлежат лишь способы оценки неопределенностей (оценка типа А и оценка типа В). Целью такой классификации является указание на два возможных способа оценки неопределенности, хотя оба способа имеют общую основу в виде анализа распределения вероятности и приводят к количественным оценкам составляющих неопределенности в виде дисперсии или стандартного отклонения. Необходимость принятия такой точки зрения объясняется тем, что Руководство предлагает единый подход к методам оценки неопределенностей для всех типов измерений (косвенных и прямых, однократных и многократных). Естественной общности подхода потребовала определенного компромисса со степенью детализации применяемых моделей процесса измерений, модельных распределений и расчетных соотношений. Однако нельзя утверждать, что в жертву общности принесена точность оценок, так как Руководство оставляет исследователю возможность выбора модели, модельных распределений и способов обработки результатов наблюдений, обеспечивая тем самым даже более широкие возможности выбора, чем упомянутые выше отечественные нормативные документы. Так, например, при расчете оценок типа В в качестве модельного распределения может быть выбрано не только равномерное, но и треугольное, трапециевидное и другие специальные виды распределений, наиболее полно характеризующие оцениваемую составляющую неопределенности, а при расчете оценок типа А могут быть применены методы статистической обработки группированных результатов наблюдений.

Сравнивая различные методы обработки результатов наблюдений, невозможно не упомянуть одну характерную особенность методов, используемых отечественной метрологией. Эти методы включают “домысливание” на определенных этапах обработки, что выражается в интерпре-

тации погрешностей в виде доверительных интервалов. Построение доверительных интервалов, соответствующих заданному уровню вероятности, невозможно без конкретизации вида вероятностного распределения результатов наблюдений. Элемент “домысливания” как раз и заключается в жесткой регламентации модельных распределений, при помощи которых производится расчет доверительных интервалов. Разумеется, при применении стандартизованных модельных распределений (в частности, нормального распределения) должны проводиться оценки гипотезы об их применимости к результатам наблюдений по соответствующим критериям, но на практике проверка критериев производится далеко не всегда, а сами критерии обладают по своей природе ограниченными возможностями отсеивать ложные гипотезы. Эти способы выражения оценки погрешностей хорошо обоснованы математически и не могут вызывать существенных возражений с точки зрения свободы исследователя в выборе интерпретации результатов исследования. Однако человеческая психология (индивидуальная и социальная) способна и чрезвычайно склонна выдавать желаемое или предполагаемое за действительность, поэтому гипотетический характер построенных доверительных интервалов часто оказывается полностью забытым.

Многих, наверное, удивит следующая интерпретация результата измерения напряжения, выраженного по ГОСТ 8.207 как $(5,14 \pm 0,05) \text{ В}$ ($P = 0,99$). Это вовсе не означает, что истинное значение напряжения лежит в указанном интервале с вероятностью $P = 0,99$. Это означает, что результаты наблюдений имеют среднее значение 5,14 В. Неявно подразумевается, что исследователь выдвинул гипотезу о принадлежности результатов наблюдений к нормальному распределению и с помощью одного из статистических критериев, перечисленных в ГОСТ 8.207, установил, что вероятность ошибки первого рода (неправильное отклонение верной гипотезы) не превышает 0,01. Заметим, что оценка вероятности ошибки второго рода (неправильное принятие ложной гипотезы) не производится, так как истинное распределение неизвестно. Тогда центр этого нормального распределения, с учетом неисключенной систематической погрешности, которая гипотетически подчиняется равномерному распределению, с вероятностью 0,99 попадает в некий интервал. Границы этого интервала не выходят за пределы 5,09...5,19 В с вероятностью, которая может быть оценена исходя из числа проведенных наблюдений. Согласно результатам анализа связи надежности оценок доверительных интервалов с числом наблюдений, при числе наблюдений менее 80, эта вероятность не превышает 0,95. Приведенная интерпретация может показаться чересчур сложной, но она подчеркивает гипотетический характер оценок, сообщаемых как результат измерения, о чем часто забывают (как и выполнить обязательную процедуру проверки гипотезы по статистическим критериям).

Методы обработки результатов наблюдений, изложенные в Руководстве, не предполагают построение каких-либо дополнительных гипотез и оценок на их основе, а концентрируются на получении прямых результатов обработки. Так, оценки типа А являются вычисленными дисперсиями экспериментально полученного распределения результатов наблюдений и (или) оценками дисперсии их среднего арифметического. Оценки типа В тоже являются оценками дисперсии, но полученными нестатистическими методами. В предложенной в Руководстве общей модели измеряемая величина Y рассматривается явно или неявно функционально зависимой от N измеряемых и других величин X_1, X_2, \dots, X_N . Оценку измеряемой величины y получают, как правило, из функциональной зависимости, используя в качестве ее аргументов так называемые входные оценки x_1, x_2, \dots, x_N . Оценки комбинированной (суммарной) стандартной неопределенности u_c для некоррелированных входных величин также получают прямым расчетом по формуле

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y),$$

где $u_i(y) = |c_i| u(x_i)$, c_i - коэффициенты влияния входной оценки x_i на оценку измеряемой величины y ; $u(x_i)$ - стандартная неопределенность, оцененная по типу А или по типу В.

Для коррелированных входных величин приведенная формула несколько усложняется:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j),$$

где $r(x_i, x_j)$ - оценка коэффициента корреляции. Расширенная неопределенность образуется из комбинированной стандартной неопределенности путем умножения ее значения на некоторый коэффициент (рекомендуются значения коэффициента 2 или 3). Часто оценка расширенной неопределенности очень близка к доверительным интервалам, построенным в соответствии с нормативными документами государственной системы измерений России для доверительных вероятностей $P = 0,95$ и $P = 0,99$, но, разумеется, говорить об их эквивалентности недопустимо.

Обратим внимание на то, что применение метода оценки погрешностей в виде доверительных интервалов в нормативных документах ГСИ логически повлекло за собой появление некоторых поправочных коэффициентов в формулах для суммирования погрешностей. Так, например, для некоррелированных погрешностей:

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2}; \quad \Delta = K S_{\Sigma} = K \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + S^2(\bar{A})},$$

где θ – границы неисключенной систематической погрешности результата измерений; θ_i – граница i -ой неисключенной систематической погрешности; k и K – коэффициенты; S_{Σ} – оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерений; $S(\bar{A})$ – оценка среднего квадратического отклонения результата измерения.

Поправочные коэффициенты k и K , вообще говоря, зависят не только от выбранной доверительной вероятности, но и от соотношения суммируемых величин, их числа и моделей их вероятностных распределений.

К необходимости введения этих поправочных коэффициентов складывается двоякое отношение. С одной стороны, они подчеркивают, что закон сложения погрешностей при различных распределениях отличается от простого суммирования дисперсий, которое реализуется в случае нормально распределенных независимых случайных составляющих суммарной погрешности. Построение результирующего распределения является достаточно сложной и трудоемкой задачей, поэтому даже в случае рассмотрения идеальных модельных распределений поправочные коэффициенты к сумме дисперсий отличаются от рекомендуемых ГОСТ 8.207. Рекомендуемые значения поправочных коэффициентов определены как некие средние из диапазона, в котором могут находиться точные значения для рассматриваемых моделей. Так, например, точное значение коэффициента k в случае суммирования двух равномерно распределенных составляющих лежит в пределах от 1 до 1,1 для доверительной вероятности 0,95 и определяется отношением суммируемых погрешностей. С другой стороны, значения поправочных коэффициентов сильно зависят от поведения функции распределения суммарной погрешности на краях распределения, т.е. именно в той области, в которой можно ожидать существенных отклонений реальных распределений от модельных. Как результат, неопределенность поправочных коэффициентов оказывается сравнимой с отличием их значения от единицы, а теоретическое “улучшение” оценок за счет их применения может вполне обернуться их практическим “ухудшением”. Заметим также, что в нормативных документах ГСИ нет единого подхода к учету корреляции погрешностей.

Примененные в Руководстве методы подсчета суммарных оценок комбинированной неопределенности предполагают только взвешенное суммирование дисперсий (и ковариаций) без каких-либо поправочных коэффициентов. Полученные таким методом оценки неопределенностей неизбежно будут слегка отличаться от оценок, полученных обработкой тех же исходных данных по нормативным документам ГСИ, но это ни в коей мере не говорит об их неточности или недостоверности, так как достоверность оценок главным образом определяется достоверностью положенных в основу расчета исходных данных и степенью соответствия реальных распределений применяемым моделям. Практические преимущества при использовании рекомендованных Руководством методов оценки неопределенностей достаточно очевидны:

- суммарная (комбинированная) стандартная неопределенность одного результата легко вводится в расчет комбинированной стандартной неопределенности другого результата измерения, в котором используется первый результат;

- нет необходимости классифицировать составляющие неопределенности на случайные и систематические, поскольку все составляющие рассматриваются одним и тем же образом.

В отношении составления отчета о проведенном измерении и о неопределенности результата Руководство не предписывает какой-либо фиксированной формы представления, в отличие от нормативных документов ГСИ. Приведенные в Руководстве общие и конкретные рекомендации тем не менее достаточны для выражения результата измерения и неопределенности в форме, обеспечивающей однозначную и адекватную трактовку отчета в случае его последующего практического использования. Рекомендуемый общий подход состоит в представлении информации в достаточно ясном виде, чтобы результат исследования можно было улучшить в будущем, если появится новая информация или новые данные. Например, следует:

- явно описать методы, используемые для вычисления результата измерения и его неопределенности из экспериментальных наблюдений и входящих данных;

- перечислить все составляющие неопределенности и полностью описать способы их

оценки;

- представить анализ данных таким образом, чтобы сразу прослеживались его важнейшие этапы, а расчет результатов можно было бы независимо повторить при необходимости;
- дать все поправки и константы, используемые в анализе, и их источники.

Приведенные рекомендации практически совпадают с принципами, изложенными в МИ 1317-86. Измерения не являются самоцелью, а имеют определенную область использования, то есть проводятся для достижения некоторого конечного результата, который не обязательно представляет собой оценку значения измеряемой величины. В любом случае исследователь обязан сообщить достаточно информации в ясном виде для практического использования результата измерения и его возможного уточнения в будущем.

4.2.4. Проблемы, не нашедшие отражения в Руководстве

В Руководстве отсутствуют какие-либо указания об ограничении использования рекомендуемого метода оценки и выражения неопределенности результата измерения. Более того, утверждается, что "...метод должен быть применим ко всем видам измерений и всем типам входных данных, используемых в измерениях". Строго говоря, именно этому требованию Руководство не отвечает, так как описанные в нем методы применимы далеко не ко всем видам измерений. Из поля зрения разработчиков Руководства выпал тот факт, что измеряют не только количественные свойства (величины), но и качественные свойства, не являющиеся величинами, которым в метрологии соответствуют шкалы наименований. Кроме того, имеются величины, не обладающие свойством пропорциональности, например неархимедовы величины, на которые в метрологии опирается весьма обширный класс шкал порядка. Существенным обстоятельством также является то, что к шкалам порядка и наименований принципиально не применимо понятие единицы измерений.

Отметим, что при измерениях в шкалах порядка и наименований неприменима традиционная процедура определения результата измерения как среднего арифметического результатов отдельных наблюдений, а также расчет среднеквадратической погрешности (см. 4.4). Так как статистики среднего арифметического значения и среднего квадратического отклонения не адекватны шкалам порядка и наименований (здесь применимы медиана и размах), краеугольное для Руководства понятие "стандартная неопределенность" оказывается непригодным для описания неопределенности результата измерения в этих шкалах. Вполне удобным выходом из этой ситуации является привлечение понятия обобщенной неопределенности результатов измерений в самом широком смысле.

В любых измерениях в любых шкалах присутствует некоторая неопределенность, которую желательно оценивать хотя бы качественно, если принципиально невозможна ее количественная оценка. Этими обстоятельствами обусловлены предложения в обновляемой метрологической парадигме для корректного описания точности результатов измерений в любых шкалах применять понятие "неопределенность результата измерений" (НРИ). Согласно МИ 2365-96, НРИ следует понимать как область (участок) шкалы измерений, в которой предположительно находится оценка измеряемого (количественного или качественного) свойства. Однако весьма желательно дополнить это определение неким общим принципом, способом описания и оценки НРИ, пригодным для использования в равной степени как в метрических, так и в неметрических шкалах. Поэтому предлагается делать оценку неопределенности в измерениях на основе информационной теории измерений с использованием энтропийного подхода.

В силу сказанного, рекомендуемые Руководством характеристики НРИ "стандартная неопределенность", "суммарная (комбинированная) стандартная неопределенность" и "расширенная неопределенность" и алгоритмы расчета уже не обладают необходимой общностью. Как и "погрешность измерений", эти понятия, по сути, прямо применимы только для описания измерений в одномерных метрических шкалах. Тем не менее, эти характеристики и алгоритмы необоснованно применены в приложении Н.6 к Руководству для выражения неопределенности измерений твердости по шкале Роквелла С, являющейся шкалой порядка. К тому же здесь неправомерно фигурирует размерная "единица по шкале Роквелла" вместо чисел твердости, которым бессмысленно приписывать какие-либо единицы и размерности.

Несколько шероховато изложен в приложении Н.2 к Руководству пример измерения полного электрического сопротивления. Здесь перемешаны элементы двух равно приемлемых двумерных шкал (совокупность значений активного и реактивного сопротивлений – результат измерения в одной шкале, совокупность значений модуля и фазы полного сопротивления – в другой шкале). Полное сопротивление необходимо и достаточно характеризовать любой из этих совокупностей двух элементов одной шкалы. Вообще недопустимо представление многомерных шкал, описы-

вающих соответствующие многомерные свойства (см. главу 2), в виде произвольного набора независимых одномерных шкал. Например, механическое напряжение и диэлектрическая проницаемость в анизотропной среде описываются совокупностями девяти величин (девятимерные шкалы) соответствующих элементов тензоров напряжений и диэлектрической проницаемости. Цвет описывается совокупностью трех координат в модельном неевклидовом (мера расстояния отсутствует) пространстве – трехмерной шкалой наименований. Стандартного корректного единого подхода к методам оценивания неопределенности такого рода многомерных измерений пока не существует.

Известные способы оценки погрешности и неопределенности измерения также невозможно прямо применить в исследованиях формы поверхностей, места расположения и направления в координатной системе (см. 2.2).

К тому же на метрологическом горизонте еще появились “мягкие измерения” и интеллектуальные приборы, которые основаны на таких развивающихся технологиях, как нечеткая логика, нейронные сети, генетические алгоритмы. Результаты мягких измерений во множестве публикаций тоже характеризуют неопределенностью в широком смысле. Для этого, в частности, привлекаются достижения таких научных направлений, как теория и исчисление нечетких ограничений, теория гранулирования нечеткой информации и теория возможностей. В процедурах идентификации веществ для оценки вероятности правильной или ошибочной идентификации введено в научный оборот также особое понятие – “неопределенность идентификации”.

4.2.5. Заключение

Первоначальное остро критическое отношение к Руководству постепенно сменяется более спокойным взвешенным подходом к проблеме выражения неопределенности и погрешности в различных видах измерений. Выявляются как достоинства, так и недостатки методов и моделей, изложенных в Руководстве, однако они уже не воспринимаются как “иностранный язык”, поскольку многие описанные приемы давно и прочно вошли в отечественную метрологическую практику.

Руководство не имеет целью заменить собой действующие национальные стандарты, но, как будет показано ниже, существует потребность внесения в них некоторых изменений. В течение продолжительного времени возможно параллельное существование и практическое использование действующих нормативных документов ГСИ и Руководства. Областями, в которых использование Руководства обязательно, в настоящий момент являются измерения в процессе международных сличений исходных национальных эталонов и оказание калибровочных услуг зарубежным организациям.

Исследователь может свободно выбирать метод обработки и способ выражения результата измерения и неопределенности. Независимо от выбора конкретного способа выражения следует соблюдать принцип достаточности сообщаемой информации для возможных практических применений результата измерения. Тем не менее, при будущей разработке новых редакций нормативных документов ГСИ рекомендации Руководства должны быть учтены.

4.3. Принципы правильного применения понятий “неопределенность измерений” и “погрешность измерений”

4.3.1. Описание ситуации

Проблема соотношения понятий “погрешность” и “неопределенность” измерений для российских метрологов довольно длительное время носила теоретический характер и обсуждалась сравнительно узким кругом авторов публикаций. С выходом Руководства и его перевода (см. 4.2), а также подписанием Госстандартом России от имени ряда подведомственных ему метрологических институтов Соглашения о взаимном признании национальных эталонов и сертификатов калибровок и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами (далее «Соглашение»), эта проблема перешла в практическую область и вызвала много вопросов и недоразумений. Возникли даже мнения о нецелесообразности использования понятия “неопределенность” в прикладной метрологии, как якобы дублирующего и эквивалентного погрешности. Появление рекомендации МИ 2552-99, в которой вместо практически необходимого выявления различия обсуждаемых понятий прямо сопоставлены формулы для оценивания характеристик неопределенности по Руководству и погрешности по отечественным нормативным документам, не внесло ясности, так как в области ее применения сказано “настоящая рекомендация... показывает соответствие между формами представления результатов измерений, используемыми в отечественных нормативных документах по метрологии, и формой, используемой в Руководстве”. К тому же эта рекомендация содержит общее утверждение о целесообразности использования неопределенности только в международных метрологических работах, т. е. вводит “двойной стандарт”. Однако, несмотря на такую противоречивую ситуацию, появилось вполне логичное решение Гос-

стандарта России о применении, в необходимых случаях, наряду с погрешностью понятия неопределенности измерений. Поэтому существует необходимость конкретизации этого решения для применения в различных метрологических процедурах.

4.3.2. Различие смысла понятий "неопределенность измерений" и "погрешность измерений"

В Руководстве подчеркивается различие обсуждаемых понятий. Однако за прошедшие несколько лет полного осознания различия обсуждаемых понятий и уместных для их применения метрологических ситуаций не произошло. Более того, существует психологически понятная тенденция нивелирования различия этих понятий. Так, в рекомендации МИ 2552-99 на конкретных примерах расчетов доверительных границ погрешности измерений и расширенной неопределенности измерений показывается практическое совпадение этих оценок и даже рекомендована схема прямого сопоставления оценок характеристик погрешности и неопределенности измерения. Тем самым фактически игнорируется прямое указание Руководства не смешивать понятия погрешности и неопределенности: «В этом Руководстве большое внимание уделяется различию терминов «погрешность» и «неопределенность». Они не синонимы и представляют собой совершенно различные понятия; их не следует путать друг с другом или неправильно использовать» (п. 3.2.2, примечание 2). Поэтому рекомендуемое в МИ 2552 сопоставление этих понятий содержит некорректность и логическую ошибку.

4.3.3. Разъяснение определений неопределенности и погрешности

По общепринятым определениям:

- неопределенность (измерения) – параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые достаточно обоснованно могли бы быть приписаны измеряемой величине;

- погрешность (измерения) – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Различию этих понятий в Руководстве и его переводе посвящено много внимания (см., например, Приложение Д. «Истинное» значение, погрешность и неопределенность). При этом обращается внимание на следующее: «измеряемая величина не может быть определена значением, а только путем описания величины», и поэтому «...неполное определение измеряемой величины вносит в неопределенность результата измерения составляющую...»; «Часто... осуществляется измерение величины, которая является лишь аппроксимацией измеряемой величины»; «Хотя окончательный исправленный результат иногда рассматривается как наилучшая оценка «истинного» значения измеряемой величины, в действительности этот результат просто является наилучшей оценкой значения величины, предназначенной для измерения». Из сказанного делается логическое заключение: «...прилагательное «истинное» в термине «истинное значение измеряемой величины» ...не является необходимым – «истинное» значение измеряемой величины (или величины) просто является значением измеряемой величины (или величины). Кроме того, ... единственное «истинное» значение является идеализированным понятием».

По изложенным обстоятельствам в Руководстве предпочитают не пользоваться термином «истинное значение измеряемой величины», на которое опирается определение понятия и термина «погрешность», однако не исключается возможность достаточно правильного использования понятия «погрешность». При этом, по сути, подразумевается, что по определению погрешность всегда имеет определенный знак (положительна или отрицательна), так как является конкретной реализацией случайной величины. На этом уровне исходных определений очевидно отличие «погрешности» от «неопределенности», характеризующей рассеяние значений, т.е. всегда положительного (по соглашению) параметра совокупности возможных значений случайной величины. Так как истинное значение величины неизвестно (неопределимо), то вместо него для определения погрешности на практике используют действительное значение величины – значение, приписываемое конкретной величине и принимаемое, часто по соглашению, как имеющее неопределенность, приемлемую для данной цели. Такая замена истинного на действительное значение в определении погрешности вполне корректна потому, что не меняет ее смысла конкретной реализации случайной величины с определенным знаком.

Логическая некорректность применения понятия «погрешность» в отечественных нормативных документах (НД) возникает при переходе от самого этого понятия к оцениванию характеристик погрешности результата измерения, в частности доверительных границ погрешности. Значение погрешности конкретного результата измерения получается алгебраическим суммированием (со своими знаками) всех ее составляющих, а при оценке характеристик погрешностей по НД оперируют модулями этих составляющих. Поэтому оценки СКО, НСП и доверительных границ по-

грешности результата измерений уже не соответствуют исходному определению погрешности и также не имеют определенного знака. Эти оценки фактически характеризуют не погрешность, а возможное рассеяние значений результата измерений, как и неопределенность. Поэтому у многих отечественных метрологов возникает недоуменный, но не точный вопрос: зачем заменять «погрешность» на «неопределенность»? Ответ таков: эти два разных понятия нужно правильно применять в соответствии с их определениями, не подменяя погрешность оценками параметров и составляющих рассеяния значений. При этом, хотя алгоритмы и результаты оценок параметров рассеяния значений по отечественным НД и Руководству весьма близки, остается принципиально различной интерпретация этих оценок, подробно рассмотренная в 4.2.

Еще необходимо обратить внимание на неоднозначность определения термина "относительная погрешность измерения – погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины". Обозначим эти два варианта относительной погрешности:

$$\delta_o = \frac{\Delta}{X_o}, \quad \delta_u = \frac{\Delta}{X_u}.$$

Здесь X_o – действительное значение, X_u – измеренное значение, $\Delta = X_u - X_o$. Используя эти соотношения, получаем зависимость

$$\delta_u = \delta_o - \frac{\delta_o^2}{1 + \delta_o}.$$

Расчеты по этому соотношению для отрицательных и положительных значений δ_o представлены в нижеследующей таблице:

δ_o	– 0,3	– 0,2	– 0,1	0	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,3
δ_u	– 0,43	– 0,25	– 0,11	0	+ 0,09	+ 0,17	+ 0,23

Очевидна несимметричность относительно нуля этой зависимости и существенное отличие δ_u от δ_o при δ_o более 0,1. Поэтому далеко не редкое нормирование в виде утверждения "относительная погрешность не превышает $\pm 30 \%$ " является весьма неопределенным с учетом того, что X_o на практике часто оценить невозможно и в расчетах пользуются X_u . Привычная замена Δ на ее модульную оценку (без знака) вносит дополнительную неоднозначность понимания этого термина.

4.3.4. Варианты применения понятий: неопределенность и погрешность

Результат измерения – значение величины, полученное путем ее измерения. Точностной характеристикой конкретных результатов измерений в любых метрологических ситуациях однозначно может и должна быть неопределенность (стандартная или расширенная). О погрешности результата измерения, которая принципиально неизвестна и конкретно неопределима, можно говорить только в теоретических рассуждениях о результатах измерений.

Сличения национальных эталонов (ключевые, региональные, межгосударственные). Результаты измерений на эталоне, выполняемых при сличении, в соответствии с Соглашением должны представляться с подробными сведениями об оценке неопределенности. Указанные в паспортах на национальные эталоны России (государственные эталоны и исходные для страны УВТ) нормы на границы составляющих погрешностей эталонов по ГОСТ 8.381 при этом используются для оценки неопределенности результатов измерений.

Калибровочные и измерительные возможности национальных метрологических институтов по Приложению С Соглашения представляются с указанием неопределенности результатов измерений и коэффициента охвата. При этом обязательно приводятся сведения о прослеживаемости передачи соответствующей шкалы измерений или размера единицы измерений (сведения об обеспечении единства измерений – traceability).

Методика выполнения измерений (МВИ) по ГОСТ Р 8.563 – совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результата измерений с установленной погрешностью, т.е. с погрешностью, не превышающей допускаемых пределов (норм погрешности измерений). Возможность и логичность использования в таких МВИ нормативов погрешности не вызывает сомнений. Результаты измерений по ним не требуется сопровождать конкретной харак-

теристикой точности. Однако точностные характеристики результатов измерений при аттестации таких МВИ все-таки логичнее выражать параметрами неопределенности.

Методики выполнения измерений, точностные характеристики которых определяются в процессе или после их применения. Результаты измерений по таким МВИ логично сопровождать оценками неопределенности. Оснований для оперирования погрешностью в таких случаях нет.

Калибровка средств измерений (calibration) – совокупность операций, устанавливающих при определенных условиях соотношение между значением величины по показаниям средства измерений и соответствующим значениям, реализуемым с помощью эталона. По результатам калибровки могут вноситься поправки к показаниям средств измерений или уточняться реализуемые мерами значения. Точностной характеристикой калибровки может быть только неопределенность, так же как в Приложении С к Соглашению. Это относится и к результатам градуировки средств измерений в процессе калибровки.

Здесь приходится особо отметить отличие смысла, областей использования и определенных термина "калибровка" по международным документам и по закону Российской Федерации "Об обеспечении единства измерений". В зарубежной практике для большинства средств измерений, в том числе эталонов, осуществляется калибровка, а не поверка. По указанному Закону и подзаконным НД эталоны подлежат обязательной поверке, а калибровка их вообще не предусмотрена. Поэтому необходимы соответствующие корректировки определений и нормативных положений.

Нормирование метрологических характеристик средств измерений можно по-прежнему осуществлять, оперируя понятием погрешность и руководствуясь ГОСТ 8.401-80 "ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования" и ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений». При этом характеристики погрешности понимаются как пределы допускаемых погрешностей.

Поверка средств измерений (verification) – установление пригодности средств измерений (СИ) к применению на основании экспериментального определения метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным требованиям. При поверке используют эталоны. Поверка СИ может заключаться:

а) «в определении пригодности СИ к применению с забракованием тех СИ, погрешность которых превышает по абсолютному значению предел допускаемой погрешности, установленной для СИ данного типа»;

б) «в установлении действительных значений или градуировке всех СИ, поступивших на поверку (в том числе путем введения поправок)»;

в) «в определении пригодности СИ к применению по нормам их стабильности (с забракованием тех СИ, изменение действительного значения или градуировочной характеристики которых за межповерочный интервал превысило предел допускаемой нестабильности, установленный для СИ данного типа) и в установлении действительных значений или градуировке остальных СИ».

При поверке оперируют установленными в документации на средства измерений нормами на характеристики погрешности. Однако выполняемые при поверке измерения должны характеризоваться неопределенностью. При этом в методиках поверки необходимо указывать, в каком соотношении должны находиться расширенная неопределенность измерений при поверке и норма на допустимую погрешность средства измерений, а также критерии годности средств измерений с учетом неопределенности измерений при поверке по вариантам а), б) и в). Например, если расширенная неопределенность измерений при поверке (с коэффициентом охвата 2) не превышает $1/3$ от пределов допускаемой погрешности, то неопределенностью пренебрегают. Другой вариант: расширенную неопределенность измерений при поверке вычитают из нормы на погрешность или под корнем квадратным из квадрата нормы на погрешность вычитают квадрат расширенной неопределенности измерений при поверке и эту разность принимают за критерий годности средства измерений по результатам поверки. Такой критерий годности применим, в частности, при поверке мер, для которых нормой погрешности является "разность между номинальным значением меры и действительным значением воспроизводимой ею величины". Поверочные схемы. При построении поверочных схем необходимо характеризовать неопределенностью, по крайней мере, результаты измерений при передаче размеров единиц. Нормы на погрешности воспроизведения единиц и методы поверки тоже должны регламентироваться с учетом расширенной неопределенности соответствующих измерений. Предстоит внимательное рассмотрение ГОСТ 8.061 "ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение" для выработки предложений по использованию понятия неопределенности при составлении поверочных схем.

Из рассмотренных метрологических ситуаций можно предложить общее правило: результаты измерений в большинстве метрологических ситуаций характеризуются неопределенностью, а нормативы точности средств измерений, измерительных и контрольных процедур могут характеризоваться погрешностью. Таким образом, понятия неопределенность и погрешность будут гармонично использоваться без попыток взаимного противопоставления и исключения их.

Уже имеется положительный опыт использования понятия неопределенности измерений. Ученые хранители национальных эталонов России (государственных эталонов и УВТ) и другие сотрудники метрологических институтов достаточно адекватно оценивали и описывали неопределенность измерений при ключевых и других сличениях эталонов. По основным видам измерений составлены, прошли международную экспертизу и публикуются таблицы об измерительных и калибровочных возможностях (Приложения С к Соглашению МРА), в которых указаны неопределенности соответствующих измерений. Появляются публикации и документы, в которых применяется подобный изложенному здесь подход к применению обсуждаемых понятий.

4.4. Особенности представления результатов измерений в шкалах различных типов

4.4.1. Общие закономерности

Параграф заключает и обобщает материал главы. Поэтому в нем, для связанности изложения сознательно допущены некоторые повторы. Желательно также при его чтении еще раз обратиться к параграфу 2.4, выборка из содержания которого представлена в виде таблицы 4.3.

Измерения в шкалах различного типа. Представление результатов измерений Таблица 4.3

Применимость	Тип шкалы измерений				
	Наименований	Порядка	Разностей	Отношений	Абсолютные
Единицы измерений	Нет	Нет	Устанавливается по соглашению		Естественные
Диапазон шкалы	Определяется спецификацией	Определяется реальными потребностями			От 0 до 1 или неограничен
Среднего арифметического	Не применимо		Применяется		
СКО	Не применимо ³		Применяется		
Медиана	Применяется иногда	Применяется	Применяется иногда		
Абсолютная погрешность и ее границы	Не имеет обычного смысла		Применяется		
Относительная погрешность	Не имеет смысла		Применяется только для интервалов	Применяется	
Неопределенность результата	Применяется				

Из таблицы 4.3 и раздела 2.4 следует, что при измерениях в шкалах порядка и наименований неприменима традиционная процедура определения результата измерения как среднего арифметического результатов отдельных наблюдений, а также расчета характеристик погрешности, как и само обычное понимание понятия погрешности (см. раздел 4.4.2).

Так как статистики среднего арифметического значения и среднего квадратического отклонения не адекватны шкалам порядка и наименований (здесь применимы медиана и размах), краеугольное для Руководства понятие «стандартная неопределенность» оказывается непригодным для описания неопределенности результата измерения в этих шкалах. Вполне удобным выходом из этой ситуации является привлечение понятия обобщенной неопределенности результатов измерений (НРИ) в самом широком смысле. В любых измерениях, в любых шкалах присутствует некоторая неопределенность результата измерений, которую желательно оценивать каким-либо способом.

Этими обстоятельствами обусловлено предложение вместо погрешности результата измерений и для корректного описания результатов измерений в любых шкалах применять понятие «неопределенность результата измерений» в широком смысле. (см. нижнюю строку таблицы 4.3).

Согласно МИ 2365-96, НРИ следует понимать как область (участок) шкалы измерений, в которой предположительно находится оценка измеряемого (количественного или качественного) свойства.

Смысл этого определения близок к определению понятия «неопределенность измерения» по Руководству как связанный с результатом измерения параметр разброса значений, которые возможно обоснованно приписать измеряемой величине. Такое понимание НРИ близко по смыслу понятию «измерительная неопределенность» в алгоритмической теории измерений, но является более общим по сравнению с определением НРИ в Руководстве. В силу сказанного, как отмечалось в 4.2, рекомендуемые Руководством характеристики НРИ «стандартная неопределенность», «суммарная (комбинированная) стандартная неопределенность» и «расширенная неопределенность» и алгоритмы расчета уже не обладают необходимой общностью. Как и «погрешность измерений», эти понятия, по сути, прямо применимы только для описания измерений в одномерных метрических шкалах и абсолютных шкалах. Поэтому формулы количественного описания неопределенности по Руководству нельзя применять, например, при оценке результатов сличения национальных эталонов, воспроизводящих шкалы твердости металлов, шкалы координат цвета и цветности, при сравнении результатов измерений светочувствительности фотоматериалов, октановых чисел, кислотных чисел и т.д. Также невозможно прямо использовать формулы из Руководства для расчета стандартной неопределенности результатов измерений в логарифмических шкалах, например, при сличениях национальных эталонов единиц звукового давления.

Известные способы оценки погрешности и неопределенности измерения также невозможно прямо применить в исследованиях формы поверхностей, места расположения и направления в координатной системе, в процедурах идентификации веществ, в мягких измерениях (см. 4.2.4).

В метрических шкалах нужно правильно использовать и НРИ по Руководству и привычную погрешность результата измерений по действующим нормативным документам, имея в виду изложенные в 4.3. принципы. Определение границ (зон) НРИ для неметрических шкал в общем случае пока не формализовано; их находят способами, отличными от рекомендуемых в Руководстве в соответствии со спецификацией каждой конкретной шкалы, регламентированной в нормативных документах. Достаточно широкое распространение неметрических шкал, наличие государственных эталонов и исходных установок высшей точности, реализующих такие шкалы, делают задачу поиска обобщенных принципов выражения неопределенности измерений актуальной.

4.4.2. Конкретные рекомендации по шкалам различных типов

В Законе РФ "Об обеспечении единства измерений" дано определение "единства измерений", из которого следует, что результаты измерений должны содержать следующие элементы: числовое значение, узаконенную единицу измерений, погрешность измерений, заданную при оценке погрешности вероятность. Во многих практических случаях выполнение всего комплекса этих требований к представлению результатов измерений вызывает затруднения из-за отсутствия однозначного толкования этих понятий в шкалах различного типа. Рассмотрим эти особенности.

Обработка и форма представления результатов измерений в метрических шкалах (шкалах разностей и отношений) опирается на развитый аппарат прикладной статистики. Этому вопросу посвящены обстоятельные монографии, различные пособия; они также изложены в нормативных документах. Эти принципы обработки и формы представления результатов измерений применимы и к абсолютным шкалам, поскольку они отличаются от шкал отношений лишь наличием естественных, а не установленных по соглашению условных единиц измерений.

В то же время этот аппарат неприменим для обработки результатов измерений в шкалах наименований, порядка и логарифмических, хотя встречаются (и нередко) ситуации, когда результаты измерений в шкалах порядка необоснованно обрабатываются по алгоритмам, установленным для метрических шкал. В статьях и монографиях можно встретить случаи некорректного применения понятия относительной погрешности для представления в шкалах разностей не только результатов измерений интервалов, но и самих точечных значений величины, отсчитываемой от условного нуля. Как известно, относительная погрешность показывает, какую долю она составляет от измеренной величины. И только для шкал отношений и абсолютных шкал эта доля не зависит от выбора размера единицы измерений. Так, например, пусть результат измерений температуры по термодинамической шкале Ренкина (отсчет ведется от абсолютного нуля и $1^{\circ}\text{Ra} = 5/9 \text{ K}$) составил 900°Ra с абсолютной погрешностью 9°Ra или с относительной погрешностью равной $9^{\circ}\text{Ra}/900^{\circ}\text{Ra} = 0,01$. Этот же результат в шкале Кельвина дает 500 K , следовательно, $9^{\circ}\text{Ra} = 9 \times (5/9) \text{ K} = 5 \text{ K}$, и отсюда такое же значение относительной погрешности – $5 \text{ K} / 500 \text{ K} = 0,01$.

Для результатов измерений в шкалах разностей представление погрешности в относительной форме не имеет смысла, так как получаемое при этом значение будет зависеть не только

от размера единицы измерений, но и от выбора условного нуля шкалы. Например, результат измерений температуры тела человека $t_c = 36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ с абсолютной погрешностью $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ дает отношения абсолютной погрешности к значению температуры t_c в шкале Цельсия $0,1\text{ }^{\circ}\text{C} / 36,6\text{ }^{\circ}\text{C} = 2,7 \cdot 10^{-3}$. Пересчет этого результата измерений в шкалу Фаренгейта ($t_F = (9/5) t_c + 32$ при $1\text{ }^{\circ}\text{F} = (5/9)\text{ }^{\circ}\text{C}$) дает $t_F = 97,9\text{ }^{\circ}\text{F}$ и $0,1\text{ }^{\circ}\text{C} = 0,1 \times (9/5)\text{ }^{\circ}\text{F} = 0,18\text{ }^{\circ}\text{F}$, а отношение $0,18\text{ }^{\circ}\text{F} / 97,9\text{ }^{\circ}\text{F} = 1,8 \cdot 10^{-3}$.

Еще более очевидна бессмысленность выражения в относительной форме погрешности датировки событий в шкале единого времени, счет которой идет от условного нуля. В то же время вполне допустимо выражать в относительной форме погрешность измерения интервала в любой шкале разностей, так как точка начала интервала эквивалентна естественному нулю (значения интервалов начинаются с нуля). Иными словами интервалы любой шкалы разностей, например, интервалы времени, обладают свойствами шкал отношений со всеми вытекающими из этого следствиями.

В шкалах наименований, для которых отсутствуют инструментальные средства определения (отнесения к тому или иному классу эквивалентности) измеряемой величины, наиболее адекватен результат, с которым согласно "конституционное большинство" экспертов. При этом решающее значение имеет правильный выбор градаций или классов эквивалентности шкалы. Они должны надежно различаться непосредственно "нормальными наблюдателями". В противном случае шкала теряет практическое значение из-за неприемлемой неопределенности результата измерений или невозможности однозначного отнесения к какому-либо классу эквивалентности. Например, в атласе (наборе образцов) цвета (дискретной шкале наименований) нет смысла делать настолько близкие по цвету образцы, что их не может различить нормальный наблюдатель. Однако и при применении таких мер предосторожности возможны случаи, когда свойство идентифицируемого объекта оказывается "точно" между классами эквивалентности шкалы. В этом случае не следует стремиться обязательно сопоставить объект с одним элементом шкалы, а ограничиться констатацией результата. Например, такая ситуация возможна при измерениях по шкале показателя твердости минералов Мооса (дискретной шкале порядка).

Так как в шкалах наименований и порядка неприменимо понятие интервала, обладающего определенным размером, к результатам измерений в неметрических шкалах неприменимо и понятие "абсолютная погрешность измерения" (см. табл. 4.3) в обычном общепринятом смысле (разность между результатом измерения и действительным значением), так как арифметическая операция вычитания не определена на множествах значений в шкалах наименований и порядка (см. главу 2). В этой ситуации формально затруднительно описывать абсолютную погрешность измерения как отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. Обозначение таких отклонений в виде чисел со знаками плюс или минус имеет другой смысл, отличный от арифметических интервалов: одинаковость чисел отклонений на разных участках шкалы не означает их равенство. Поэтому предпочтительно не употреблять термин «абсолютная погрешность», а характеризовать результаты измерений в этих шкалах размахом (см. 4.4.3, п.5) или неопределенностью.

Определение границ (зон) неопределенностей достаточно сложная и не поддающаяся формализации задача, которую приходится решать в соответствии со спецификацией каждой конкретной шкалы. Так, например, в модельной плоскости координат цветности неопределенность результата измерений характеризуется эллипсообразной окрестностью точки с полученными как результат измерений координатами цветности. В дискретных шкалах возникают свои особенности выражения неопределенности результата измерений. В общем случае зону неопределенности в зависимости от конкретного типа дискретной шкалы можно представить себе как совокупность (для одномерной шкалы – двух) соседних элементов шкалы, расположенных в окрестности идентифицированного как результат измерений элемента шкалы. Для многомерных шкал эта окрестность будет характеризоваться элементарным объемом в соответствующем абстрактном модельном пространстве.

Иногда высказывается мнение, что результаты измерений в шкалах наименований и порядка являются "грубыми оценками", которые не стоит даже называть измерениями. Но ведь с так называемых "грубых оценок" начиналось развитие современной науки, технологии и метрологии. Здесь уместно напомнить, что и сейчас в некоторых видах измерений точность не велика. Например, измерения величин, характеризующих ионизирующие излучения, с погрешностью (40 – 60) % обычны.

Общеизвестен процесс совершенствования шкал измерений температуры: от шкал порядка (холодный, прохладный, теплый, горячий) к шкалам разностей (Цельсия, Фаренгейта, Реомюра) и далее к пропорциональным шкалам отношений (Кельвина, Ренкина). Многие шкалы наи-

менований и порядка успешно применяются и в настоящее время в соответствии с регламентирующими их нормативными документами (см. гл. 7).

Непревзойденные и сегодня булатные мечи и кинжалы проходили сложную термообработку без применения термометров (они просто еще не были изобретены). Главным критерием были так называемые цвета побежалости (шкала наименований), наблюдаемые визуально. Стабильное высочайшее качество изделий, сохраняющееся столетиями, – надежный критерий достаточного единства таких измерений.

Сейчас, когда некоторые эмпирические шкалы порядка в той или иной мере сопоставлены с метрическими, появилась возможность оценить их реальную точность. Такую оценку, например, выполнил П.В.Новицкий. Он показал, что оценка значений температуры по факту плавления различных металлов достаточно точна и если стало известно, что измеряемая температура была такова, что серебряный образец уже расплавился, а золотой еще остается твердым, то температура "... находится в интервале от 960,5 до 1063 °С и этот результат можно записать как (1010 ± 50) °С." Погрешность будет еще меньше, если перейти к термодинамической шкале. В этом случае значения температур возрастают на 273,15 К, интервал остается таким же, а значение относительной погрешности составит всего $\pm 3,9 \%$.

При измерениях в шкалах порядка из-за неопределенной нелинейности (отсутствия пропорциональности) этих шкал нельзя применять в качестве результата измерений среднее арифметическое

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

поскольку при допустимых для этих шкал произвольных монотонных преобразованиях, описываемых выражением $y = \varphi(x)$, равенство

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

в общем случае не выполняется. В этом случае существует более адекватная статистика «медиана», т.е. $(k+1)$ -е значение среди $(2k+1)$ значений ряда результатов наблюдений, расположенных в порядке возрастания. Поэтому для этих шкал корректно принятие за результат измерений медианы (например, третьего из пяти экспериментально полученных значений чисел твердости, расположенных в порядке возрастания). Медиана инвариантна относительно возможных монотонных нелинейных преобразований шкал порядка.

Хорошим примером шкал порядка, не обладающих пропорциональностью, являются все шкалы твердости (см. 7.4). Пример выбран нами не случайно. Область измерения твердости материалов (в первую очередь, металлов и сплавов) хорошо обеспечена метрологически. Достаточно сказать, что в ней функционируют четыре государственных эталона России. Неопределенность результатов измерений чисел твердости h выражается в виде экспериментально полученного размаха значений чисел твердости от h_{\min} до h_{\max} раздвиганием вниз и вверх по шкале на Δ – границы неопределенности воспроизведения и передачи шкалы от эталона, т.е. «неопределенность измерения числа твердости от $h_{\min} - \Delta$ до $h_{\max} + \Delta$ » (здесь привычные алгебраические знаки вычитания «–» и сложения «+» использованы в качестве символов указанного смещения по шкале). Поэтому корректная запись результата измерений твердости, например, по шкале Роквелла должна выглядеть так: HRC = 28,7 с неопределенностью от 28,2 до 29,2. После чисел добавлять какие – либо символы, имитирующие единицы измерения, нет оснований. Распространенную в литературе и нормативных документах форму записи результата измерения твердости в виде 28,7 HRC с погрешностью $\pm 0,5$ HRC нельзя считать приемлемой. Здесь символ HRC ассоциируется с обозначением единицы измерения, которой, как уже было сказано, в этой шкале вообще не может быть. HRC, HB, HV и HSD – это обозначения измеряемых величин – чисел твердости по шкалам Роквелла, Бринелля, Виккерса и Шора соответственно. Можно считать приемлемыми и такие формы записи: результат измерения твердости – HRC = 27,7 с неопределенностью $U_{\text{HRC}} = 0,5$; норма на допустимые пределы погрешности измерения на участке шкалы HRC от 25 до 35 составляет: $\Delta_{\text{HRC}} = \pm 0,5$, если не забыть об указанной выше условности использования здесь знаков плюс и минус.

4.4.3. Выводы и рекомендации

1. Результат измерения должен содержать, кроме полученного значения величины или оценки свойства, также сведения о неопределенности результата измерений или о пределах по-

грешности результата измерений по аттестованной по ГОСТ 8.563 методике выполнения измерений.

2. В шкалах отношений результаты измерений выражаются в единицах величин по ГОСТ 8.417-2002. За результат измерения обычно принимается среднее арифметическое значение ряда наблюдений при измерении. Оценки пределов погрешностей измерений и неопределенности измерений осуществляются по алгоритмам (процедурам), изложенным в РМГ 43-2001, а также в ГОСТ Р 8.563-96, ГОСТ 8.381-80, ГОСТ 8.207-76, МИ 1317-86, МИ 2083-90 и др. При этом нужно иметь ввиду, что некоторые практически применяемые шкалы отношений имеют модельную систематическую погрешность (неопределенность типа B), например, практическая температурная шкала МТШ-90 отличается от теоретической термодинамической шкалы температур, соответствующей определению единицы температуры – кельвина – по ГОСТ 8.417-2002. Неопределенность измерений и пределы погрешностей измерений в шкалах отношений могут выражаться в абсолютной и относительной формах.

О результатах измерений в шкалах отношений можно высказать суждения, во сколько раз одно значение больше или меньше другого (вычислять их отношение и логарифмировать его) или на сколько больше или меньше одно значение по сравнению с другим. В шкалах отношений результаты измерений могут представляться также в форме условно безразмерных величин и их логарифмов путем деления на принятое в стандартах опорное значение, выраженное в единицах измеряемой величины. В таких случаях пользуются единицами измерений, представленными в табл. 3.2.

3. В шкалах разностей результаты измерений выражаются в единицах величин по ГОСТ 8.417-2002. За результат измерения обычно принимается среднее арифметическое значение ряда наблюдений при измерении. Оценка неопределенности измерений и пределов погрешностей измерений осуществляется так же, как в шкалах отношений (см. п. 2), однако они могут выражаться только в абсолютной форме. Относительная форма выражения неопределенности и пределов погрешностей невозможна из-за условности (не абсолютности) нуля шкал разностей соответствующих величин. Например, расширенную неопределенность $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ измерения температуры в точке $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ бессмысленно выражать в относительной форме.

Результаты измерений интервалов величин по шкалам разностей представляются так же, как в шкалах отношений (см. п. 2). О результатах измерений в шкалах разностей можно высказывать суждения, на сколько больше или меньше одно значение по сравнению с другим, но вычислять отношение двух значений бессмысленно. Например, плюс $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ больше минус $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, но пытаться сказать, чему равно отношение этих температур – бессмысленно.

4. В абсолютных шкалах результаты измерений выражаются в единицах, представленных в табл. 3.1. За результат измерения обычно принимается среднее арифметическое значение ряда наблюдений при измерении. Оценка неопределенности измерений и пределов погрешности измерений осуществляется так же, как в шкалах отношений (см. п. 2), однако при этом обязательно упоминание об абсолютной или относительной форме выражения неопределенности и пределов погрешности, так как измеряемые по таким шкалам величины безразмерны.

5. В шкалах порядка отсутствуют единицы измерений (табл. 4.3), поэтому результаты измерений выражаются в принятых для конкретной шкалы символах (числах, баллах, степенях, классах и т.п.). За результат измерения принимается значение, соответствующее медиане ряда наблюдений при измерении.

В шкалах порядка неопределенность измерения и пределы абсолютной погрешности измерений выражаются размахом наблюдений при измерении. Применение относительного размаха, стандартной, суммарной стандартной и расширенной неопределенности по указанным в п. 2 правилам невозможно из-за отсутствия пропорциональности у величин, описываемых шкалами порядка. В дискретных шкалах порядка неопределенность измерения может выражаться совокупностью нескольких последовательных классов эквивалентности. Измеряемым в шкалах порядка величинам и количественным символам (числам, баллам) нет оснований приписывать какие-либо размерности и вычислять отношения разных значений измеряемых величин.

6. В шкалах наименований отсутствуют единицы измерений (табл. 4.3), поэтому результаты измерений выражаются в принятых для конкретной шкалы символах эквивалентности определенных точек шкалы. Например: в колориметрических шкалах результат измерения цвета обозначается совокупностью трех координат, обозначающих точку в модельном цветовом пространстве.

В шкалах наименований, описывающих качественные свойства в общем случае, невозможно вводить количественные параметры типа размаха и стандартной неопределенности для

выражения неопределенности результата измерений. В дискретных шкалах наименований имеет смысл оперировать «неопределенностью идентификации» (возможностью отнесения результата измерения к одному или нескольким классам эквивалентности используемой шкалы). В шкалах наименований, упорядоченных по сходству проявлений качественного свойства, возможно введение не обладающих пропорциональностью специфических параметров шкалы и размаха результатов измерений этих параметров в качестве неопределенности результата измерений.

Какие-либо суждения о количественном соотношении различных значений результатов измерений в шкалах наименований бессмысленны – они различаются качественно, но не количественно.

7. В многомерных шкалах результат измерения выражается обязательно совокупностью значений модельных параметров шкалы. Например, результат измерения векторной величины (силы, скорости, ускорения и т.п.) должен выражаться совокупностью трех значений: модуля в соответствующих единицах и двух плоских углов, обозначающих направление вектора в выбранной для измерений системе пространственных координат.

В многомерных шкалах неопределенность результата измерений выражается объемной областью неопределенности в соответствующем многомерном модельном (абстрактном фазовом) пространстве. Эта объемная область определяется совокупностью неопределенностей измерения параметров, образующих модельное пространство. Для двумерных величин такому объему соответствует область, ограниченная замкнутой кривой на плоскости.

8. В логарифмических шкалах прямое применение установленных в РМГ 43-2001 (см. п. 2) правил расчета стандартной, суммарной стандартной и расширенной неопределенности невозможно. Эти формулы применимы к оценкам составляющих неопределенностей после их потенцирования.

Литература к главе 4

1. International vocabulary of basic and general terms in metrology. – Switzerland, Genève: ISO, 1993. – 59 p.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – Switzerland, Genève: ISO, 1993. – 101 p.
3. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Version: 6 – EURACHEM: A focus for analytical chemistry in Europe, March 1995/ Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях / Перевод документа EURACHEM. – С.-Петербург: "Крисмас+". – 1997. – 129 с.
4. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под ред. В.А.Слаева. – С.-Петербург: ОНТИ ГП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева". – 1999. – 134 с.
5. Дойников А.А., Дойников А.С. Международное Руководство по выражению неопределенности в измерении // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – № 3. – С. 44 – 53
6. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
7. Арутюнов П.А. Новый взгляд для выражения неопределенности в измерениях // Законодательная и прикладная метрология. – 1994. – № 2. – С. 29–34
8. Тарбеев Ю.В., Слаев В.А., Чуновкина А.Г. Проблемы применения в России международного руководства по выражению неопределенности измерения // Измерительная техника. – 1997. – № 1. – С. 69 – 72
9. Квин Т. Дж. Взаимное признание национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки, выдаваемых национальными метрологическими институтами // Измерительная техника. – 1998. – № 5. – С. 67–71
10. Квин Т. Дж. Руководство по ключевым сличениям эталонов, проводимым консультативными комитетами // Измерительная техника. – 1998. – №8. – С. 69 – 72
11. Проблемы применения в России международного руководства по выражению неопределенности измерения (Материалы дискуссии ...) // Метрология. – 1997. – №1. – С. 24-36
12. Исаев Л.К. О месте метрологии в системе наук и еще раз о ее постулатах // Измерительная техника. – 1993. – №8. – С.10–11
13. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Необходимость обновления метрологической парадигмы // Измерительная техника. – 1998. – №8. – С. 15–21
14. Пфанцгаль И. Теория измерений /При участии В. Баумана и Г. Хуберта. – Пер. с англ. В.Б.Кузьмина. М.: Мир, 1976. – 248 с.
15. ГОСТ 8.381-80. ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей

16. МИ 1552-86. ГСИ. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей результатов измерений
17. ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения
18. МИ 2083-90. ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей
19. МИ 1317-86. ГСИ. Результаты измерений и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле параметров
20. Рабинович С.Г. Погрешности измерений.— Л.: Энергия. — 1978.— 262 с.
21. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств.— Л.: Энергия, 1968. — 248 с.
22. МИ 2365-96. ГСИ. Шкалы измерений. Основные положения. Термины и определения. — М.: ВНИИФТРИ.— 34 с.
23. Колмогоров А.Н. Величина // Математическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1977.— Т.1— С. 651–653
24. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Безразмерные единицы и числа // Измерительная техника.— 1999.— №9.— С. 3–10
25. Дойников А.А. Сотворение мира и основание метрологии. // Законодательная и прикладная метрология.— 1997— №1.— С. 46–50
26. Дойников А.А., Дойников А.С. Концепция обобщенной неопределенности результатов измерений // Законодательная и прикладная метрология. — 2000.— №2.— С. 23–30
27. Эльясберг П.Е. Измерительная информация: сколько ее нужно? Как ее обрабатывать? — М.: Наука, 1983.— 208 с.
28. Reznik L. Measurement result uncertainty evaluation: new soft approaches? // Сборник докладов Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям.— С.-Петербург: ЛЭТИ, 1999.— Т 1.— С. 21–24
29. Мильман Б.Л., Конопелько Л.А. Идентификация органических соединений в методиках выполнения измерений // Тезисы докладов Всероссийской конференции “Методологические проблемы разработки и внедрения методик выполнения измерений”.— С.-Петербург: ВНИИМ, 1999.— С. 80–82
30. Исаев Л.К. О неопределенности результатов измерений // Измерительная техника.— 1993.— №8.— С. 66–67
31. Недосекин Д.Д., Прокопчина С.В., Чернявский Е.А. Информационные технологии интеллектуализации измерительных процессов.— С-Петербург: Энергоатомиздат. С.-Петербургское отделение, 1995.— 178 с.
32. Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте // Сборник трудов Международного научно-практического семинара. Коломна, 17-18 мая 2001.— М.: Наука. Физматлит.— 2001.— 311 с.
33. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes.— Paris: CIPM 14 October 1999.— 45 p
34. РМГ 43-2001. ГСИ. Применение "Руководства по выражению неопределенность измерений".— Минск: Межгосударственный совет по стандартизации метрологии и сертификации.— 20 с.
35. Ярына В.П. Неопределенность или погрешность? И то, и другое! // АНРИ (Аппаратура и новости радиационных измерений). М.:— Информационный центр НПП «Доза».— 2000.— № 4 (23).— С. 58–62
36. Вальков К.И. Геометрические аспекты принципа инвариантной неопределенности.— Л.: ЛИСИ.— 1975.— 143 с.
37. Стахов Ф.П. Введение в алгоритмическую теорию измерений. — М.: Сов. радио, 1977.— 287 с.
38. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Особенности представления результатов измерений в шкалах разного типа // Законодательная и прикладная метрология.— 1996.— №6.— С.30–33
39. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Шкалы измерений // Законодательная и прикладная метрология. — 1993.— №3.— С. 44–48
40. Крупин Б.Н. Логарифмические шкалы и величины // Законодательная и прикладная метрология.— 1994.— №1.— С.36–39

41. Брянский Л.Н. Измерение твердости материалов // Законодательная и прикладная метрология.– 1995.– №6.– С.51-52
42. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике.– М.: ИЛ.– 1963.
43. Асланян Э.Г., Дойников А.С. О выражении неопределенности результатов измерений твердости //Законодательная и прикладная метрология.– 2002.– №4.– С. 38-40
44. Aslanyan E.G., Doynikov A.S., On Expression of Hardness Measurements Result Uncertainty // Proc. Joint International Conference IMEKO TC3/TC5/TC20.– Celle, September 24-26.– 2002– p.499-503
45. Пытьев Ю.П. Возможность. Элементы теории и применения. – М.: Эдиториал, УРСС, 2000.– 192 с.
46. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / Пер. с франц. В.Б.Кузьмина – Под ред. С.И.Травкина.– М.: Радио и связь, 1982.– 432 с.
47. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Пер. с франц. В.Б.Тарасова.– Под ред. С.А. Орловского.– М.: Радио и связь, 1990.– 288 с.
48. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Неопределенность результатов измерений в шкалах различных типов // Измерительная техника.– 2000.. – №5.– С. 29-32
49. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. О смысле термина "измерение" // Законодательная и прикладная метрология.– 2002.– №4.– С. 41-43

Глава 5 СРЕДСТВА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

5.1. Средства измерений, испытаний и вспомогательные принадлежности

Современные метрологические службы и другие подразделения юридических лиц, выполняющие измерительные и испытательные операции, оснащены разнообразными техническими устройствами, которые, в общем случае, подразделяются на средства измерительной техники, средства испытаний и вспомогательные принадлежности (измерительные и испытательные). Отнесение того или иного технического устройства к одной из названных выше групп обычно осуществляется, исходя из его функционального назначения, а в некоторых случаях из области применения. Термин «средства измерительной техники» объединяет многочисленные технические устройства, называемые средствами измерений и измерительными принадлежностями, т.е., как это трактует Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» – технические устройства, предназначенные для измерений.

Средства измерений. Несколько условно, как будет показано ниже, средства измерений подразделяются на меры, измерительные преобразователи, средства сравнения и измерительные приборы. Часто встречающиеся названия: измерительная установка, измерительная машина, измерительная система, измерительно-вычислительный комплекс и т. д. получили эти наименования, исходя из их конструктивных или эксплуатационных особенностей, а, отчасти, и традиций. Все они с метрологической точки зрения являются измерительными приборами, метрологические нормы и требования к которым установлены комплексом нормативных документов Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ).

Решения об отнесении тех или иных технических устройств к средствам измерений, согласно Закону РФ "Об обеспечении единства измерений", принимает Госстандарт России.

Средства испытаний. В ГОСТ 16504-81 дается определение собственно средствам испытаний, представляющим собой технические устройства для проведения испытаний, и испытательному оборудованию – средствам испытаний, представляющим собой технические устройства для воспроизведения условий испытаний.

Первое понятие – «средство испытаний» – по существу очень близко к понятию «средство измерений», т. к. термин «испытания» является родовым по отношению к видовому термину «измерения». Испытания проводятся путем измерений, анализа, диагностирования, органолептическим способом и т.д; причем подавляющее большинство испытаний выполняется именно путем измерений с применением средств измерений в качестве средства испытаний.

В то же время между понятиями «измерения» и «испытания» есть существенное различие, определяемое целями выполнения этих операций.

Цель измерений заключается в получении достоверного результата измерений, используемого для научного познания, получения измерительной информации о свойствах и параметрах объекта измерений и т.д. Причем значение измеряемого свойства (по размеру, положению на шкале измерения), как правило, заранее неизвестно с требуемой точностью.

Цель испытаний более узкая – получение однозначного ответа: соответствует ли испытуемый объект, его параметр и свойства известным, предписанным требованиям или нет. Важнейшим признаком любых испытаний, в отличие от измерений, является принятие на основе их результатов определенных решений, например, годен – негоден, соответствует – не соответствует и т.д.

Очень часто средства измерений используются как средства испытаний. Простейший пример. Если с помощью микрометра (средства измерений) определены диаметры стальных шариков с целью получить информацию об их размерах – это обычная измерительная процедура. Но если размеры этих шариков получены с целью определения пригодности их использования в шарикоподшипнике, т.е. получения ответа на вопрос, пригодны или непригодны они для сборки подшипника, – это уже испытания, а средство измерений – микрометр – использовано здесь в качестве средства испытаний.

Испытательное оборудование, в отличие от средств испытаний, обязательно содержит в своем составе устройства для воспроизведения условий испытаний и, при необходимости, средства измерений для контроля соответствия параметров условий испытаний заданным значениям. В состав испытательного оборудования могут входить также средства измерений параметров самих испытываемых изделий (продукции) в заданных условиях испытаний. Типичным примером испытательного оборудования является термобарокамера, создающая в замкнутом объеме заданное температурное поле и барометрическое давление. Техническими характеристиками термобарокамеры являются: диапазон воспроизводимых температур, равномерность теплового поля по объему камеры, диапазон воспроизводимого барометрического давления. Допуски на отклонения температуры от задаваемых значений определяются при аттестации термобарокамеры как испытательного оборудования в порядке, установленном ГОСТ 8. 568-97. В процессе испытаний объекта в термобарокамере условия испытаний – температура, барометрическое давление – измеряются входящими в состав термобарокамеры средствами измерений, имеющими достаточную точность для уверенного контроля температуры и давления в пределах соответствующих допусков.

Отметим еще одну общность операций измерений и испытаний. Такая известная всем метрологам, однозначно относимая к метрологическим операциям процедура, как поверка СИ, по существу, является процедурой испытаний СИ. Действительно, при поверке определяются метрологические характеристики поверяемого СИ, результаты сравниваются с предписанными для данного СИ нормами, и делается вывод о годности или негодности поверяемого средства измерений.

Более существенным отличием поверки от испытаний является то, что метрологические характеристики средства поверки всегда имеют прослеживаемость до соответствующих эталонов, тогда как для средств испытаний это не всегда обязательно.

Несколько по-иному обстоит дело с процедурой калибровки СИ, когда владелец СИ, представляя его на калибровку, просит указать фактические значения метрологических характеристик калибруемого СИ. В этом случае его калибровка превращается в процедуру измерения метрологических характеристик данного СИ.

Не останавливаясь на описании измерительных вспомогательных принадлежностей, отметим, что в ряде случаев некоторые средства измерений могут использоваться как вспомогательные принадлежности. Так, например, в подавляющем большинстве нормативных документов по поверке средств измерений, в разделе условия поверки заданы довольно широкие пределы температуры окружающего воздуха (20 ± 5) °С, атмосферного давления (100 ± 10) кПа, влажности (до 80 %) и т.д. Поэтому обычно при контроле условий поверки не выполняются полновесные измерения параметров условий поверки с определением погрешности измерений, а только контролируется факт, что параметры находятся в заданных пределах. Здесь эти средства измерений можно считать вспомогательными принадлежностями при выполнении поверки.

В общем виде средства измерений, конструктивно выполненные как измерительные приборы, содержат в себе первичный преобразователь, меру, средство сравнения, средство отображения, регистрации или передачи измерительной информации и другие узлы и устройства.

В этой главе мы не ставим цель рассмотреть все стороны и свойства средств измерений, а несколько подробнее остановимся на таких элементах как мера, измерительный преобразователь, средство сравнения и другие, сведения о которых, по нашему мнению, недостаточно четко изложены в существующей литературе по метрологии и приборостроению. Не будем касаться и вспомогательных принадлежностей, применяемых при измерениях и испытаниях.

5.2. Меры количественных и качественных свойств

Приоритет мер в истории метрологии predetermined двойной смысл употребления термина "мера".

Нередко термины – мера (меры) употребляются для обозначения обобщенной совокупности каких-либо средств измерений, например, "линейные меры", или в наименовании совокупности исторически сложившихся национальных (региональных) систем измерений – "русские меры", "английские меры", встречается выражение "метрические меры" и др. Во всех этих случаях термином "мера" подменяются понятия "средство измерений" либо "единица измерения".

По определению, приведенному в РМГ 29-99, под термином мера понимают средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью. Этим определением охватываются меры только скалярных величин. В более общем случае мера – средство измерений, воспроизводящее и (или) хранящее одну или несколько точек шкалы измерений (МИ 2365-96). Такое определение меры применимо в шкалах, описывающих как количественные свойства (величины), так и качественные свойства. К этому определению необходимо добавить пояснение, что в большинстве случаев мера – это тело, вещество, устройство и пр., воспроизводящее и (или) хранящее при определенных условиях, некоторое установленное значение величины или точку шкалы. Существует большое разнообразие мер, различающихся по конструктивным особенностям, по способу хранения или воспроизведения размеров единиц измерений или точек шкал, по характеру применения в метрологии и измерительной технике и по многим другим признакам. Сразу отметим, что не для всех единиц и шкал измерений, используемых в практической метрологии, необходимо и возможно создание мер. Меры занимают в метрологической иерархии все без исключения уровни, от международных эталонов до рабочих СИ. Пример: меры массы – мерой (гирей) является международный прототип килограмма, мерами являются национальные и рабочие эталоны массы и рабочие СИ массы (торговые гири).

Рассмотрим многообразие мер, используемых в современной метрологии. По конструктивному исполнению все меры можно разделить на два вида: меры, конструктивно оформленные как законченное, готовое к использованию средство измерений, и меры, конструктивно встроенные в измерительные приборы (встроенные меры). Примерами конструктивно самостоятельных мер являются: гири, концевые меры длины, меры твердости, катушки электрического сопротивления, нормальные элементы и т.д. – это так называемые однозначные меры. Из однозначных мер формируются наборы мер – совокупность определенного числа однородных однозначных мер, применение которых в различных комбинациях позволяет получить заданное значение величины в определенных пределах, при этом каждая мера набора применяется отдельно, независимо от остальных или в сочетании с другими. Примером таких наборов мер служит набор гирь, набор концевых мер. Однозначные меры, конструктивно объединенные в один прибор, позволяющий переключением воспроизводить дискретный набор значений величины, называют магазинами мер, пример – магазин мер электрического сопротивления или емкости.

В качестве самостоятельных средств измерения существуют многозначные меры, воспроизводящие дискретный или непрерывный ряд значений величин (участок шкалы) в заданном диапазоне. К ним относятся, например, линейки с делениями, конденсаторы переменной емкости и др. Многозначные меры нередко оснащают шкалами – отсчетными устройствами, указывающими значение воспроизводимой величины.

К мерам относятся также стандартные образцы (СО) веществ (материалов) с установленными в результате метрологической аттестации (по ГОСТ 8.315) значениями величин, характеризующих свойства или состав этого вещества (материала). СО свойств веществ (материалов) аттестуются, как правило, по одному значению хранимой величины (однозначные меры). К таким мерам относятся, например, СО диэлектрической проницаемости, СО угла среза кварца и многие другие. СО состава веществ и материалов обычно аттестуются по нескольким значениям одноименных величин, характеризующим, например, массовую долю (в % или в г/м³), молярную (моль/м³) концентрацию ряда веществ (химических элементов), входящих в состав образца. Такие СО можно считать комбинированными мерами. Примером являются СО состава различных марок легированных сталей, чугунов, сплавов цветных металлов, состава газовых и жидкостных смесей и т.д.

Существуют СО, воспроизводящие размер нескольких разноименных единиц, например, СО температуры и теплот фазовых переходов (воспроизводит размер кельвина и джоуля); СО удельной энергии сгорания и молярной доли основного компонента (воспроизводит размер джо-

уля и единицы молярной концентрации бензойной кислоты в образце). Такие СО невозможно отнести к однозначным или многозначным мерам. По воспроизведению размера конкретных единиц измерений – это однозначные меры, но по набору воспроизводимых разноименных единиц они многозначны. Можно и их назвать комбинированными мерами. Часто в качестве особой категории мер выступают чистые природные вещества и химические элементы, позволяющие в определенных условиях воспроизводить и хранить размер некоторых единиц. Такие вещества и химические элементы обычно используют в качестве реперов (контрольных точек с известным значением величины) при воспроизведении и хранении шкал измерений. Так, международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90) построена по значениям основных реперных точек – мер температуры (п. 7.5).

Некоторые химические элементы и вещества используются для воспроизведения нескольких температурных реперных точек. Шкала водородного показателя pH построена на ряде растворов определенных химических веществ, являющихся эталонными мерами pH. В кондуктометрии также в качестве эталонных мер удельной электрической проводимости жидкостей используются растворы химических веществ.

Химические элементы и вещества используются также в качестве мер в различных процедурах идентификации. При этом элементы и вещества играют роль классов эквивалентности в соответствующих шкалах наименований.

Своеобразными мерами являются аттестованные смеси веществ, представляющие собой средства измерений в виде смеси определенных количеств различных веществ, приготовляемой на месте применения в соответствии с утвержденной, в установленном порядке, технической документацией. Такие меры предназначены для воспроизведения и хранения размеров единиц величин, характеризующих содержание определенных компонентов в составе смеси, значения которых установлены по расчетно-экспериментальной процедуре ее изготовления. Аттестованные смеси могут представлять собой механические смеси твердых веществ, смеси газов, растворов, суспензий и т.д.

Все рассмотренные выше меры имеют материальное воплощение в виде устройств, изделий, образцов, растворов и т. д. Вместе с тем существуют меры, которые не могут быть материализованы. К таким мерам относятся, например, сигналы точного времени и частоты, передаваемые по каналам радио и телевидения, которые по существу являются мерами (реперами) моментов времени национальной шкалы времени и размера единицы частоты – герца, хранимыми государственным эталоном времени и частоты (ГЭТ 1-98) ВНИИФТРИ.

Меры позволяют воспроизводить и (или) хранить практически все многообразие единиц и шкал измерений, характеризующих как количественные, так и качественные свойства предметов, явлений, процессов, описываемых метрическими и неметрическими шкалами.

В шкалах наименований, которыми описываются качественные свойства, применяются меры: атласы цветов и другие меры цвета, СО цветности водных растворов (хромо-кобальтовая шкала), СО белой поверхности и др. К качественным мерам следует отнести комбинированные меры характеристик дефектов, используемых для поверки (настройки) ультразвуковых дефектоскопов и медицинских приборов. К качественным мерам можно отнести и такие меры комбинированных свойств (расстояний, взаимного положения и формы), как шаблоны. Особого классификационного рассмотрения требуют такие многомерные координатные меры, как геодезические знаки.

В шкалах порядка широко используются меры твердости, воспроизводящие шкалы неархимедовых величин – чисел твердости металлов и других материалов.

К шкалам разностей (интервалов) относятся меры длины (линейки, рулетки, концевые меры, калибры, шупы и др.), реперные точки практических температурных шкал, шкалы Цельсия, Фаренгейта, Реомюра, сигналы точного времени по национальной шкале и др.

К шкалам отношений относятся меры массы, реперные точки температурной шкалы МТШ-90, источники ионизирующих излучений – меры активности радионуклидов, энергетические меры.

В абсолютных шкалах применяются меры ослабления, коэффициентов отражения и пропускания электромагнитного излучения, звука и др.

Мера обычно имеет номинальное значение воспроизводимого и (или) хранимого размера величины, указанное непосредственно на мере или в сопроводительной документации. За действительное значение меры принимается полученное экспериментально, фактически воспроизводимое мерой значение. В зависимости от погрешности, с какой регламентированы действительные значения мер, они делятся на классы или разряды в соответствии с занимаемым местом в поверочной схеме. Вместе с тем существуют меры, маркировка которых не совпадает с действи-

тельным значением меры. Так, например, гиря массой 1 кг, предназначенная только для использования с неравноплечими сотенными весами, имеет обозначение номинала – 100 кг, грузы конкретного грузопоршневого манометра обычно маркируют не по массе, а по значению давления, воспроизводимого манометром с данным поршнем. Такие меры классики метрологии называли "условными мерами".

Конструктивное исполнение мер чрезвычайно разнообразно. Достаточно упомянуть такие простейшие по конструкции меры, как меры массы, концевые меры и такие сложнейшие конструкции, как цезиевый репер частоты, стабилизированный лазер для воспроизведения единицы длины – метра.

Условия, необходимые для воспроизведения мерами шкал или единиц измерений, могут быть различными. Концевые меры, штриховые меры длины (линейки) и др. не требуют каких-либо особых условий, они всегда готовы к употреблению. Их можно назвать пассивными мерами. Другие, такие как нормальный элемент меры интенсивности ионизирующих излучений, сами генерируют размер воспроизводимого значения величины. Их иногда называют активными мерами.

Существует большая группа мер, для использования которых требуются определенные условия. Большинство электрических и радиотехнических мер, например, воспроизводят размер единиц только в случаях, когда через них пропускается электрический ток. К ним относятся, например, катушки сопротивления, катушки индуктивности, меры электрической емкости и многие другие.

Отметим, что широко распространенные меры массы – гири в комплекте с равноплечими весами – фактически используются для воспроизведения силы притяжения (веса).

Другой особенностью ряда мер является их расходуемость. Например, мера твердости металлов может быть использована ограниченное число раз, пока определенная доля ее поверхности не будет занята отпечатками индентора. Большинство СО также является расходуемыми мерами.

По определению любое средство измерений (измерительный прибор или преобразователь) должен содержать в себе меру. И это действительно так, хотя на первый взгляд не всегда можно сказать, что является мерой в том или ином средстве измерений. В таком простейшем средстве измерений, как штангенциркуль, встроенная многозначная мера в виде линейки с миллиметровыми делениями явно видна. Но если мы обратимся ко всем известным стрелочным приборам: вольтметрам, амперметрам, гальванометрам любой системы (магнитоэлектрическим, электромеханическим, электростатическим и т.д.), то неочевидно, что в них является встроенной мерой. Мерой в таких стрелочных приборах является упругая пружинка или упругие растяжки, удерживающие стрелку на некоторой отметке отсчетной шкалы. В цифровых вольтметрах встроенной мерой является стабилитрон или, ранее, нормальный элемент.

Во многих эталонах высшего звена, использующих калориметрический первичный преобразователь и реализующих метод замещения на постоянном токе, мерой служит прецизионный резистор (или тот же стабилитрон) в компенсационной схеме калориметра.

Упомянем, что могут существовать и меры многомерных величин, например, применяются волноводные меры комплексного (двухмерного) коэффициента отражения СВЧ электромагнитного излучения. Своеобразной дополнительной координатой служит частота, на которой выполняется измерение в электрорадиотехнике и электронике.

Итак, в прикладной метрологии существуют и применяются меры не только количественных, но и качественных свойств, которые можно классифицировать по следующим основным группам: меры качественных свойств, меры неархимедовых величин, меры скалярных величин, стандартные образцы, комбинированные меры, многозначные меры.

5.3. Измерительные преобразователи

Роль измерительных преобразователей в метрологии уступает только мерам. Измерительные преобразователи (ИП) входят в состав большинства средств измерений всех рангов, от рабочих средств измерений до государственных эталонов. Среди них важное место занимают первичные измерительные преобразователи, стоящие первыми в цепи преобразования, непосредственно взаимодействующие с объектом измерений. Особенно велика их роль в эталонах высшего звена. Погрешность, вносимая этими преобразователями, часто доминирует в суммарной погрешности эталона и неопределенности результатов измерений на нем.

Для понимания роли ИП в практической метрологии необходимо иметь четкое представление о выполняемых ими функциях. К сожалению, определения, приведенные в ряде публикаций, в том числе и в НД, содержат ошибочное утверждение, что ИП "преобразуют измеряемую величину в другую". Поэтому необходимо рассмотреть этот вопрос подробнее.

Как известно, величина есть особенность, свойство, общее в качественном отношении многим объектам, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. Понятие "свойство" как философская категория определяется, в свою очередь, так: сторона предмета, обуславливающая его различие или сходство с другими предметами и проявляющаяся во взаимодействии с ними (см. 2.2). Поэтому величина не существует сама по себе, а существует лишь постольку, поскольку существует модель объекта со свойствами, выражаемыми данной величиной. С этой точки зрения утверждение о преобразовании одной величины в другую, т.е. о преобразовании философской категории (абстрактного понятия), представляется ошибочным, вызывающим ассоциацию "материализации" свойств в отрыве от объектов материального мира. Поэтому говорить о преобразовании одной величины в другую некорректно. Не слишком удачно и часто встречающееся утверждение, что измерительный преобразователь преобразует измеряемую величину в измерительный сигнал (сигнал измерительной информации), т.к. трудно себе представить преобразование абстрактного понятия "величина" в материальный объект "сигнал" (некий процесс или явление), к тому же здесь возникает неопределенность понятия "сигнал".

На самом деле основная функция ИП – получение и передача информации об измеряемой величине. Выполнение этой функции осуществляется на основе физических закономерностей, положенных в основу конструктивного исполнения ИП. С физической точки зрения процесс преобразования, происходящий в ИП, есть процесс энергетический, в основе которого лежит закон сохранения энергии. ИП преобразует часть энергии (а в некоторых случаях и всю энергию), получаемую им от объекта измерений, в другой вид энергии, удобный для регистрации, дальнейшего преобразования или передачи и т.д. В ИП используют и то обстоятельство, что часто различные величины функционально связаны друг с другом (приведем в качестве примера основное уравнение термодинамики $PV = RT$). На первый взгляд, многие ИП "действительно как бы преобразуют" одну величину в другую, например, жидкостный термометр – температуру в длину, термометр сопротивления – температуру в омическое сопротивление, стрелочный электроизмерительный прибор – силу тока в угловые градусы и т.д. Но тогда, если буквально следовать определениям, температура должна измеряться в единицах длины или омического сопротивления, сила тока в угловых единицах и т.д. В действительности, если углубиться в сущность процессов и явлений, происходящих в ИП, их следует считать устройствами, автоматически выполняющими процесс косвенных измерений, когда измеряемая величина находится на основании известной (функциональной) зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Так, например, в жидкостном термометре используется известная зависимость между температурой и объемом тела, а результат измерений температуры находится из прямых измерений длины (объема) столба жидкости в капилляре, проградуированном в градусах. В термометре сопротивления используется зависимость электропроводности материалов от температуры. В стрелочных электроизмерительных приборах использован эффект взаимодействия между электрическим током, протекающим по проводнику, и магнитным полем, а результат измерений силы тока прямо отсчитывается по шкале, имеющей соответствующую градуировку. Отсчетные шкалы средств измерений сами являются своеобразными ИП, переводящими, например, длину столба жидкости в градусы температуры, угол поворота стрелки электроизмерительного прибора в соответствующие электрические величины. Таким образом, ИП, снабженные отсчетными шкалами, проградуированными в единицах измеряемой величины, превращаются в средства измерений прямого действия (для прямых измерений), а все операции косвенных измерений, несущие информацию об измеряемой величине, скрыты в цепи измерительных преобразований, определяемых функциональными зависимостями, положенными в конструкцию этого средства измерений. Число примеров можно было бы увеличить, но и рассмотренных, очевидно, достаточно, чтобы подтвердить тот факт, что в ИП не происходит (и не может происходить) "преобразование величин".

Наиболее адекватным является следующее определение: "Измерительный преобразователь – средство измерений или его часть, служащая для получения и преобразования информации об измеряемой величине (измеряемом свойстве) в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи".

5.4. Средства сравнения, компараторы

Средства сравнения и их наиболее распространенная категория – компараторы – применяются в измерительной технике и метрологии с незапамятных времен. Достаточно вспомнить равноплечие весы.

Компараторы, точнее компарирующие узлы, ячейки и т.п., входят в состав практически всех измерительных приборов. Для наглядности рассмотрим несколько примеров, начав с классического стрелочного гальванометра. Когда стрелка гальванометра останавливается в некото-

ром положении, это означает, что крутящий момент, возникающий от взаимодействия магнитных полей рамки и магнита, в точности равен противоположному крутящему моменту, развиваемому пружинкой (многозначной мерой) на оси рамки. То есть, на сравнении крутящих моментов реализован классический нулевой метод. Правда, стрелка гальванометра в зависимости от значения силы тока останавливается в разных местах шкалы, но можно вообразить себе гальванометр с регулируемой упругостью пружинки (и соответствующим индикатором). Тогда стрелка всегда будет останавливаться в одном положении, которое можно обозначить как нулевое. Такой гальванометр будет полностью аналогичен мосту Уинстона с реохордом, имеющим кроме индикатора нуля в диагонали и индикатор соотношения длин (сопротивлений) плеч реохорда. Другой пример – цифровой вольтметр, со встроенной мерой напряжения – опорным стабилитроном. Нетрудно понять, что его табло на самом деле показывает не напряжение в измеряемой цепи, а значение коэффициента деления (умножения) делителя, при котором поделенное (или умноженное) в данное число раз напряжение на стабилитроне равно измеряемому. Разница с предыдущим примером только в том, что нуль-индикатор в виде прибора или отдельного табло за ненадобностью отсутствует (хотя схема сравнения имеется). Совершенно аналогичный процесс осуществляется в весах с цифровым табло, указывающим массу.

Совокупность разнообразных компараторов можно разделить на четыре основные группы.

Первая группа – это классические компараторы, однозначно относимые к средствам измерений, содержащим меру. К ним относятся, например, равноплечие, десятичные, сотенные и другие рычажные бесшкальные весы, все они имеют встроенные меры в виде безразмерного коэффициента деления (умножения), а также пружинные весы (мерой является пружина).

Вторая группа компараторов – это соответствующие функциональные узлы любых измерительных приборов, выполняющие сравнение измеряемой величины с мерой, встроенной в СИ.

Третья группа компараторов – естественные биологические системы – органы чувств человека, его глаза (сравнение цветности и яркости объектов) и органы слуха (сравнение громкости и высоты звуков) и т.д.

По мере внедрения автоматизации их роль постепенно снижается, хотя в недавнем прошлом, она была значительной. Не случайно в классическом труде М.Ф. Маликова "Основы метрологии" глава, названная "Органы чувств как участники измерений", является самой большой по объему.

К четвертой группе компараторов относятся компарирующие факторы (это могут быть среды, процессы, явления), которые, в свою очередь, подразделяются на естественные и создаваемые с помощью технических устройств (называть их "искусственными" не вполне корректно).

Примером естественных компарирующих факторов являются излучение Солнца, гравитационное поле Земли, используемое при сличении мер массы, силы, грузопоршневых манометров и т.д.

К создаваемым с помощью технических устройств компарирующим факторам относятся, например, генерируемые техническими устройствами электромагнитные поля, напряжения и токи как в открытом пространстве, так и в проводниках или волноводах (сличение практически всех электро-радиоизмерительных устройств); нейтронные, фотонные и другие поля, генерируемые реакторами, ускорителями, источниками радиоактивных излучений (эти источники можно отнести и к первой подгруппе), акустические и гидроакустические поля и т.д.

Это свойство компараторов (использование сред, процессов явлений для сравнения) хорошо согласуется со сформулированными в 5.2 требованиями к условиям применения пассивных мер – присутствием дополнительных факторов – физических полей, т.е. в терминах этого раздела – наличием компарирующих сред, процессов или явлений.

В большинстве случаев от всех этих факторов требуется лишь стабильность во времени и однородность в объеме (для полей), достаточном для размещения сличаемых средств измерений. Абсолютные значения величин, характеризующих эти факторы, менее существенны. Необходимо лишь, чтобы они обеспечивали функционирование сличаемых средств измерений в их диапазонах измерений. Но бывают и исключения. Так, при измерениях силы весовым методом, тарировке грузопоршневых манометров необходимо знать значение ускорения свободного падения (ускорения силы тяжести) в месте расположения соответствующих эталонов (а иногда, если требования к точности измерений чрезвычайно высоки, и в месте эксплуатации аттестованных измерителей). Значение силы тяжести не остается строго постоянным, оно подвержено некоторым изменениям во времени. Поэтому измерения ускорения силы тяжести для метрологических целей приходится время от времени повторять.

5.5. Характеристики средств измерений

Технические устройства относятся к средствам измерений, если, во-первых, они предназначены и действительно способны выполнять операции измерений, т. е. обеспечивают нахождение соотношения измеряемой величины с единицей или шкалой измерений и отражают (в явном или неявном виде) значение этой величины и, во-вторых, нормируют его точностные характеристики – совокупность метрологических характеристик, влияющих на погрешность измерений.

Основными метрологическими характеристиками средств измерений являются: назначение, диапазон измерений, погрешность, влияющие величины. Остановимся несколько подробнее на этих характеристиках.

Назначение средств измерений – указание, какие величины и в каких единицах или шкалах измеряет данное средство. Чаще всего назначение СИ ясно из его названия, например, вольтметр, твердомер и т. д. Некоторые СИ предназначены для измерений нескольких различных величин, что также отражено в их названии, например, авометр – ампер-вольт-ом-метр и т.д. Встречаются СИ, названия которых традиционно сохраняются на иностранном языке, например, штангенциркуль, буссоль и др.

Диапазон измерений – область значений величины или, точнее, участок шкалы измерений, в пределах которых нормированы погрешности средства измерений.

Погрешность средства измерений – разность между показанием средства измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины. Поскольку истинное значение измеряемой величины неизвестно, на практике пользуются ее действительным значением, полученным экспериментальным путем и настолько близким к истинному, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Заметим, что понятие "неопределенность" характеризует не СИ, а результат измерений с помощью СИ (см. гл. 4).

Номенклатура нормируемых метрологических характеристик СИ, определяющих погрешности средств измерений, правила их выбора для конкретных типов СИ и способы нормирования установлены ГОСТ 8.009, а для измерительных систем – МИ 2439.

Влияющие величины – величины, которые не являются предметом измерений данного средства измерений, не используются для передачи размера измеряемой величины, но влияют на показания средства измерений.

Такими влияющими величинами являются неизмеряемые данным СИ характеристики (иногда их называют неинформативными параметрами) измеряемой величины. Так, например, при измерении напряжения переменного тока таким параметром является частота или диапазон частот, и наоборот при измерении частоты переменного тока в качестве неинформативного параметра может рассматриваться значение напряжения. Другими величинами, влияющими на показания СИ, являются величины, характеризующие условия эксплуатации СИ. Это температура окружающей среды, атмосферное давление, влажность, магнитные и электрические поля и т. д. Здесь следует различать два случая задания значений влияющих величин:

- нормальные условия – области значений влияющих величин, при которых изменениями результата измерений вследствие их малости можно пренебречь;
- рабочие области значений влияющих величин, в пределах которых нормируют дополнительные погрешности или изменения показаний СИ.

5.6. Выбор методов измерений

Метод измерений – это совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Все без исключения методы измерений являются разновидностями одного единственного метода – метода сравнений со шкалой измерений, при котором измеряемое свойство (величину) сравнивают со свойством (величиной), воспроизводимым мерой (однозначной или многозначной) количественных или качественных свойств. Приведем встречающиеся в метрологической литературе разновидности методов измерений.

Метод непосредственной оценки, в котором значение измеряемой величины определяют по отсчетному устройству многозначной меры, на которую непосредственно действует сигнал измерительной информации, например, измерение электрического напряжения вольтметром. В этом случае сигнал с помощью электромагнитной системы воздействует на заранее проградуированную многозначную меру — спиральную пружинку или упругие растяжки, воспринимающие усилия, поворачивающие рамку, а стрелка вольтметра индицирует угол закручивания пружинки (растяжки). Если применяется цифровой вольтметр, мерой служит, например, стабилитрон с делителем напряжения.

Метод противопоставления, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения (компаратор), с помощью которого

устанавливается соотношение между этими величинами, например, измерение массы на равноплечих весах.

Дифференциальный метод, в котором на прибор сравнения воздействует разность измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой, например, сравнение меры длины с эталонной на компараторе.

Нулевой метод, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения равен нулю.

Метод замещения, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой, например, взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов.

Метод совпадений, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения меток шкал или периодических сигналов, например, измерение длины с помощью штангенциркуля с нониусом и частоты вращения стробоскопом.

Выбор метода измерений определяется принятой моделью объекта измерения и доступными СИ. При выборе метода измерений добиваются того, чтобы погрешность метода измерений, т.е. составляющая систематической погрешности измерений, обусловленная несовершенством принятых модели и метода измерений (иначе, теоретическая погрешность), не сказывалась заметно на результирующей погрешности измерения. Различные методы измерений требуют разных затрат времени на выполнение наблюдений. Поэтому необходимо учитывать и временные зависимости измеряемых величин. Изменения измеряемых параметров в течение времени измерения (выполнения цикла наблюдений), как правило, не должны превышать заданной доли от допустимого предела погрешности измерения. Если возможны альтернативы, учитывают и экономические соображения: ненужное завышение точности модели и метода измерения приводят к необоснованным затратам. То же относится и к выбору СИ. Иными словами, метролог сталкивается с решением распространенной в науке и технике задачей на поиск оптимума. Таким образом, выбор метода измерений и СИ практически происходит одновременно.

Выбор СИ определяется измеряемым свойством (величиной), принятым методом измерений и допускаемой границей погрешности Δ_r . Измерения с применением СИ недостаточной точности малоценны (даже бессмысленны), так как могут быть причиной неправильных выводов. Применение излишне точных СИ экономически невыгодно. Учитывают также диапазон изменений измеряемой величины, условия измерений, эксплуатационные качества СИ, их стоимость. Основное внимание уделяют погрешностям СИ. При этом добиваются выполнения условия:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{мод}} + \Delta_{\text{м}} + \Delta_{\text{си}} + \Delta_{\text{усл}} + \Delta_{\text{о}} \leq \Delta_{\text{д}},$$

где предельные погрешности: $\Delta_{\text{мод}}$ – погрешность, вызванная неадекватностью контролируемого объекту модели, параметры которой принимаются в качестве измеряемой величины, $\Delta_{\text{м}}$ – метода измерений, $\Delta_{\text{си}}$ – средства измерений, $\Delta_{\text{усл}}$ – дополнительные погрешности, обусловленные воздействием влияющих факторов условий измерений, $\Delta_{\text{о}}$ – оператора, $\Delta_{\text{д}}$ – предельно допускаемая погрешность результатов измерений. Этот критерий выбора СИ достаточно надежен, но дает завышенную на 20 – 30 % оценку реальных границ суммарной погрешности измерения.

Для правильной организации измерений необходимо также подобрать: комплект СИ для контроля условий измерений; комплект технических устройств, обеспечивающих условия измерений или испытаний, например указанные в МВИ; комплект устройств и материалов, необходимых для подготовки ОИ (выбора объекта испытаний); выполнения вспомогательных операций при измерениях; регистрации и оформления результатов наблюдений и измерений. Например, для выбора методов и средств измерений при разработке МВИ существует общая рекомендация МИ 1967-89.

Сохранение указанных в эксплуатационной документации (ЭД) на СИ метрологических характеристик гарантируется для нормальных условий измерений. В ЭД на СИ указывают пределы нормальной области значений влияющих величин, выходить за которые при выполнении измерений не рекомендуется из-за возникновения дополнительной погрешности СИ. Рекомендуется выделить (определить) рабочую область, действием влияющих величин внутри которой можно пренебречь. СИ влияющих величин выбирают такими, чтобы их погрешность не превышала хотя бы 30 % от допустимых изменений влияющих величин. Например, если температура должна находиться в пределах (293 ± 5) К, погрешность термометра не должна превышать $\pm 1,5$ К. Соблюдение условий измерений контролируется периодически и каждый раз, когда возникают сомнения в результате наблюдения (измерения). Особенно опасны неожиданные, кратковременные измене-

ния влияющих величин (например, появление электромагнитных наводок). Они могут остаться незамеченными и исказить результаты. Обязателен также контроль выполнения требований безопасности и экологии по всем опасным и вредным факторам (физическим, химическим, биологическим, психофизиологическим).

Не следует отождествлять термины «измерение» и «наблюдение при измерениях». Наблюдение при измерении – экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение величины (отсчет) – результат наблюдения, подлежащий обработке для получения результата измерения. Разделение этих понятий необходимо для однозначного изложения измерительных процедур.

Различают измерения с однократными и многократными наблюдениями. Наиболее распространены (в производстве) измерения с однократными наблюдениями, что обусловлено следующими обстоятельствами: экспериментальной или производственной необходимостью (разрушение ОИ в процессе наблюдения, невозможность повторения наблюдения, экономической целесообразностью и т.д.); возможностью пренебречь случайными погрешностями; ситуациями, когда случайные погрешности доминируют, но доверительная граница погрешности результата измерения с однократным наблюдением не превышает допускаемую погрешность измерений. Случайную погрешность считают пренебрежимо малой по сравнению с неисключенной, если $\Theta/S(x) > 8$, где Θ — граница НСП результата измерения, $S(x)$ — СКО отдельных наблюдений. Иногда, для повышения надежности таких измерений (исключения промахов) делают все-таки два или три наблюдения, и за результат измерения принимают среднее арифметическое значение результатов этих наблюдений (см. ГОСТ Р ИСО 5725-2002).

Измерение с числом наблюдений $n \geq 4$ относят (условно) к измерениям с многократными наблюдениями и выполняют статистическую обработку ряда результатов наблюдений для получения информации о результате измерений и о случайной составляющей погрешности этого результата (см. ГОСТ 8.207-76).

При увеличении n СКО случайной погрешности результата измерений $S(x)$ уменьшается по закону обратной пропорциональности \sqrt{n} . Этим руководствуются при выборе n для разумного уменьшения $S(x)$, например, по сравнению с НСП результата измерений Θ , не зависящей от n (до выполнения условия $\Theta/S(x) \geq 8$ дальнейшее увеличение n не имеет смысла). Как правило, выбор числа наблюдений производится при разработке МВИ.

К сожалению, часто в НД встречаются выражения, в которых путаются и не различаются по смыслу понятия «погрешность» и «характеристика погрешностей». В разделе 4.3.3. показано, что характеристики погрешности не соответствуют исходному определению погрешности и фактически характеризуют не погрешность, а возможное рассеяние значений результатов измерений аналогично неопределенности. Более того, в МИ 2552-99 наглядно показана количественная близость оценок неопределенностей и соответствующих характеристик погрешностей. Для устранения неправильного (не соответствующего определению) применения понятия «погрешность» представляется целесообразной постепенная замена в НД характеристик погрешности результатов измерений на неопределенности результатов измерений. Такая замена не исключает применение норм погрешности и показателей точности по ГОСТ Р ИСО 5725.

Заканчивая параграф, вернемся к вопросу о методиках поверки и калибровки СИ. Разработка НД на методики поверки регламентирована в МИ 2526-99 и РМГ 51-2002, а требования к выполнению калибровочных работ изложены в ПР 50.2.016-94. Поверка и калибровка (см. раздел 4.3.4 и 8.3) являются различными по смыслу особыми видами испытаний средств измерений. Однако в них содержится одинаковая обязательная экспериментальная операция: выполнение измерений с использованием достаточно точных эталонов. Поэтому вполне возможно (и целесообразно) использование экспериментальной части методик поверки СИ при выполнении их калибровки.

Литература к главе 5

1. Брянский Л.Н., Дойников А.С. От меры к единице измерений // Законодательная и прикладная метрология. – 2000. – №4. – С. 63
2. РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения
3. МИ 2334-95. ГСИ. Смеси аттестованные. Общие требования к разработке
4. Маликов М.Ф. Основы метрологии. – М.: Комитет по делам мер и измерительных приборов при СМ СССР. – 1949. – 497 с.

5. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Кнорринг В.Г. Реализация передачи размера единиц и шкал измерений // Измерительная техника.– 1992.– №11.– С. 8–9
6. ГОСТ 8.315-97. ГСИ. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Общие положения
7. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. О функциях измерительных преобразователей // Законодательная и прикладная метрология.– 1996.– №3.– С.43–45
8. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. О метрологическом статусе компараторов // Законодательная и прикладная метрология.– 1998.– №2.– С. 26–28
9. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Меры количественных и качественных свойств // Измерительная техника.– 2002.– № 10.– С. 58-60

Глава 6 ЭТАЛОНЫ

6.1. Общая характеристика эталонов

Совокупность государственных и рабочих эталонов, т.е. эталонная база страны, является материальной, технической базой, обеспечивающей единство измерений.

Различают следующие юридические категории эталонов. Международные – эталоны, принятые по международным соглашениям в качестве первичных международных и служащие для согласования с ними шкал и размеров единиц, воспроизводимых и (или) хранимых национальными эталонами. Международным эталоном является эталон килограмма МБМВ. После образования СНГ национальные (государственные) эталоны России стали межгосударственными эталонами СНГ. Национальные (государственные) – используемые в качестве исходных для воспроизведения и (или) хранения шкал и единиц величин с целью передачи их размеров всем средствам измерений данных величин на всей территории государства (в нашем случае – на территории Российской Федерации) посредством вторичных и рабочих эталонов.

Ряд руководств подразделяет государственные эталоны на первичные и специальные. Первичные имеют более широкий круг применения. Нередко они возглавляют группу эталонов единиц одной и той же величины, используемых в различных поддиапазонах ее значений. Остальные эталоны такой группы называют специальными эталонами или просто эталонами. Специальные государственные эталоны могут быть и самостоятельными (не связанными с первичными). Как правило, они используются в отдельных областях науки и техники.

Вторичные – получающие шкалу или размер единицы измерения путем сличений с государственными эталонами.

Эталон-свидетели – вторичные эталоны, предназначенные для проверки сохранности государственных эталонов и замены их в случае порчи или утраты. Применяется также термин эталоны-дублиеры.

Эталон-копии – вторичные эталоны, предназначенные, наряду с государственными эталонами, для передачи размеров шкал и единиц измерений рабочим эталонам в случаях большого объема поверочных работ с целью предохранения аппаратуры государственного эталона от преждевременного износа. Эталон-копии применяются редко.

Эталон сравнения (эталон-переносчики) – вторичные эталоны, применяемые для сличения эталонов, которые по разным причинам не могут сличаться непосредственно.

Рабочие эталоны (ранее в СССР назывались образцовыми средствами измерений) – предназначены для поверки подчиненных (по поверочным схемам) рабочих эталонов и рабочих средств измерений. Рабочие эталоны могут быть разных разрядов. Наиболее точные эталоны, используемые в данном регионе, в данном органе государственной метрологической службы, на данном предприятии, называют “исходными”.

Наряду с государственными эталонами в России широко используются установки высшей точности – УВТ. По своим свойствам и назначению они близки к специальным государственным эталонам. В соответствии с ГОСТ 8.525-85 УВТ рекомендуется создавать в случаях, когда:

централизованное воспроизведение единицы величины не является необходимым и экономически целесообразным;

единицы, которые воспроизводятся УВТ, являются, как правило, безразмерными, например, относительные величины, коэффициенты;

граничные условия, в которых воспроизводится единица величины, имеют узкоспецифичный диапазон или область распространения;

рабочие средства в данной области измерений применяют в двух или более министерствах (ведомствах), но общее количество их незначительно.

Таким образом, УВТ можно создавать не только в метрологических институтах Госстандарта России, но и в ведомственных метрологических учреждениях. Многие УВТ играют роль исходных для страны государственных эталонов в соответствующих видах и областях измерений.

Перейдем теперь к функциям эталонов и к их классификации уже не по назначению (юридическому), а по принципу построения и действия. В широком смысле термина, эталон – это образец для сравнения. Все определения понятия эталон, которые можно встретить в российской энциклопедической и метрологической литературе (их более пятнадцати), практически однотипны. Мы приведем лишь два из них. Первое приведено в отмененном ГОСТ 16263-70: "Эталон единицы – средство измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона". Второе – в законе РФ "Об обеспечении единства измерений": "Эталон единицы величины" – средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных, либо дольных значений единицы величины) с целью передачи ее размера другим средствам измерений данной величины". Первое определение можно трактовать как приоритетное с момента утверждения стандарта, хотя сам ГОСТ 16263-70 является рекомендательным и заменен на РМГ 29-99. Определением, изложенным в законе "Об обеспечении единства измерений", надлежит пользоваться впредь до внесения изменений или дополнений в закон. Нетрудно заметить, что эти определения восходят ко времени принятия метрической конвенции, соответствуют тогдашнему эталону метра и эталону килограмма и не учитывают наличие шкал измерений. Покажем, что современные государственные эталоны не вполне соответствуют приведенным выше определениям.

Действительно, все государственные эталоны и установки высшей точности являются средствами измерений, и процесс передачи размера единицы или шкалы измерений включает выполнение измерений.

Все государственные эталоны осуществляют функцию передачи размера единицы или шкалы измерений, любое средство измерений, не включающее эту функцию, не может называться эталоном. Многие (если не большинство) из современных эталонов хранят не только размеры единиц величин, но и шкалы измерений (или их отдельные точки). Эталоны, как правило, не хранят и не воспроизводят номинальное, кратное или дольное значение единицы измеряемой величины. Воспроизводимое эталоном значение – почти всегда ни номинальное, ни десятичное кратное или дольное значение единицы. Эталоны, формально отвечающие этому положению, являются скорее исключением, чем нормой. К ним относятся: международный эталон единицы массы (в дальнейшем, для краткости будем опускать слово "единица") и государственный эталон – ГЭТ 3-78, имеющий близкую к единице (килограмму) массу; государственный эталон времени и частоты – ГЭТ 1-83, воспроизводящий в ряду интервалов времени и интервал, равный одной секунде; эталон эдс (на основе перехода Джозефсона); эталон электрической емкости на повышенных частотах – ГЭТ 107-77 и немногие другие.

С большой степенью условности к этой группе можно отнести эталоны, воспроизводящие значения величин в некотором диапазоне (участке шкалы измерений), поскольку в этом диапазоне не есть точки, совпадающие с дольными, десятичными значениями единицы.

Ряд эталонов воспроизводят одно значение величины (точку шкалы), не равное ни единице, ни ее кратному или дольному значению. Например: эталон ампера (ГЭТ 4-68) долгие годы воспроизводил значение 1,018646 А; эталон электрического сопротивления – ома (ГЭТ 14-86) 1,00000024 Ом; эталон емкости (ГЭТ 25-79) – 0,2 пФ; эталон индуктивности (ГЭТ 15-79) воспроизводит значение 0,010000333 Гн; эталон относительной диэлектрической проницаемости (ГЭТ 129-80) – 1,0006.

И, наконец, цезиевый репер частоты воспроизводит интервал времени, равный 1/9122631770 части секунды, и аналогично стабилизированный гелий-неоновый лазер эталона длины (входящего в состав объединенного эталона времени, частоты и длины) – 1/173452614 часть метра.

Можно ли эти обстоятельства квалифицировать как недостатки всех этих эталонов. Безусловно, нет. Эталон может воспроизводить любое значение величины (любую точку или часть шкалы), лишь бы эти значения были известны с требуемой точностью и стабильно воспроизводились раз от раза.

Наиболее сложен ответ на вопрос: все ли эталоны хранят и воспроизводят единицу величины (шкалу измерений).

В НД определение термина “хранение единицы” отсутствует. В РМГ 29-99 термин “воспроизведение” трактуется следующим образом: “Воспроизведение единицы – совокупность операций по материализации единицы физической величины с помощью государственного первичного эталона”. Даже мистики, считающие мысль материальной, едва ли согласятся с таким определением. Достаточно задать вопрос, как можно материализовать абстрактные понятия о единицах измерений (секунде, кельвине, паскале звукового давления и т.п.). Кстати, РМГ 29-99 в этом плане непоследовательна. Другой термин этой рекомендации гласит: “Воспроизведение основной единицы – воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру физической величины в соответствии с определением единицы”. Здесь уже не говорится о “материализации”, зато введен еще более неудачный термин “создание физической величины”. Можно создать меру величины, но не саму величину.

Что хранит стабилизированный лазер эталона метра, когда он выключен? Очевидно, лишь свойство при каждом включении генерировать (воспроизводить) с высокой точностью и стабильностью оптическое излучение известной частоты. Абсолютно то же самое можно сказать о цезиевом репере эталона времени и частоты. Группы платиновых и железо-родиевых термометров эталона термодинамической температуры в криогенной области сами по себе не могут ни хранить, ни воспроизводить кельвин. Они “хранят” функцию преобразования, т.е. сохраняют зависимость их омического сопротивления от температуры. А конкретные значения температуры, при которых происходит передача ее значений СИ, задаются активным компаратором – криостатом.

Прежний эталон силы тока (ампер-весы) вообще не хранил меру силы тока (такие меры просто не существуют). В его состав входили меры массы, эдс и электрического сопротивления. Современный государственный эталон ампера, основанный на вычислении значения силы тока по закону Ома (причем напряжение измеряется с использованием эффекта Джозефсона, а сопротивление – в долях квантового сопротивления Холла) также не хранит меру силы тока. В этой ситуации трудно даже говорить о воспроизведении ампера.

Резюме из вышесказанного следующее:

1. Любой эталон – это средство измерений (или комплекс средств измерений), содержащее меру (или комплекс мер), различным способом связывающую его с другими эталонами. Он в любом виде выполняет функцию измерений либо значения (значений) величины, либо оценку свойства (количественного или качественного) по шкале измерения в некоторой ее точке (точках).

2. Измеряемые эталоном значения могут быть любыми, а не обязательно равными единице величины или ее кратному или дольному десятичному значению.

3. Любой эталон в обязательном порядке передает значение (значения) величины (точку, участок или всю шкалу измерений) другим средствам измерений. Невыполнение этой функции несовместимо с самим термином “эталон”. Необходимо подчеркнуть, что эталон обязан передавать размер единицы или шкалу, а не значение величины, равное принятой единице. Передаваемый размер может соответствовать любой части этой единицы или любой точке шкалы.

4. Функция хранения единицы измерений или шкалы свойственна не всем эталонам и не является решающей (обязательной) для его функционирования.

5. Самой трудной является интерпретация термина “воспроизведение” единиц и шкал измерений. Часто трудно разделить функции “воспроизведения” и “измерения”. По-видимому, единственный выход – в правилах хранения и применения каждого эталона указывать, что в данном конкретном случае понимается под терминами “воспроизведение” и “хранение”.

С учетом всего изложенного и в соответствии с теорией шкал измерений нами предложено определение понятия “эталон”, не противоречащее закону Российской Федерации “Об обеспечении единства измерений” и свободное от большинства отмеченных недостатков других формулировок: “Эталон (шкалы или единицы измерений) – средство измерений, предназначенное и утвержденное для воспроизведения и (или) хранения и передачи шкалы или размера единицы измерений (или любой его части) средствам измерений.

Вернемся к “функциональной” классификации эталонов. Все эталоны содержат в качестве основного структурного элемента меру (или комплекс мер различных свойств величин), хранящую (воспроизводящую) одну или несколько точек шкал измерений этих свойств (величин), и почти все – первичный или иной измерительный преобразователь (ИП) и компаратор. Подчеркнем, что речь идет о мерах, которые, кроме функции хранения шкалы и (или) значения величины (свойства), обеспечивают связь конкретного эталона с другими эталонами основных и производных единиц международной системы единиц (СИ) или соответствующих шкал или сами являются мерами основных единиц (рис. 6.1).

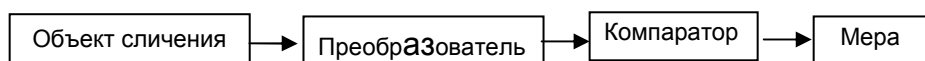


Рис. 6.1. Обобщенная функциональная схема эталона (с объектом сличения)

Эталоны, так же как меры, можно разделить на две группы – пассивные и активные.

Первая группа – эталоны, содержащие пассивные меры, хранящие шкалу или значение величины и применяемые для сравнения с ними поступающего извне сигнала – носителя измерительной информации. Такие эталоны можно назвать эталонами-приемниками.

Здесь и далее понятие "сигнал измерительной информации" используется в предельно широком смысле. Это может быть любое физическое поле или процесс, несущие сведения (информацию) о местоположении значения измеряемой величины на соответствующей шкале измерений.

Вторая группа – эталоны, имеющие в своем составе активные меры, воспроизводящие шкалы или значения величин либо пассивные меры и некоторые источники сигнала измерительной информации, значение которого задается или контролируется мерой. Такие эталоны можно называть эталонами-генераторами.

Встречаются эталоны, которые могут использоваться как в режиме эталона-приемника, так и в режиме эталона-генератора. Они, по существу, представляют собой эталоны-приемники, укомплектованные дополнительными "активными компараторами", имеющими в своем составе источник сигнала измерительной информации, значение которого контролируется (непрерывно или периодически) аппаратурой эталона-приемника и используется для аттестации (поверки) пассивных объектов сличения. Иными словами, в этом случае эталон объединяет в поверочной схеме и собственно эталон, и компаратор для передачи размера шкалы или единицы следующему звену поверочной схемы. Такие эталоны можно отнести к эталонам-приемникам.

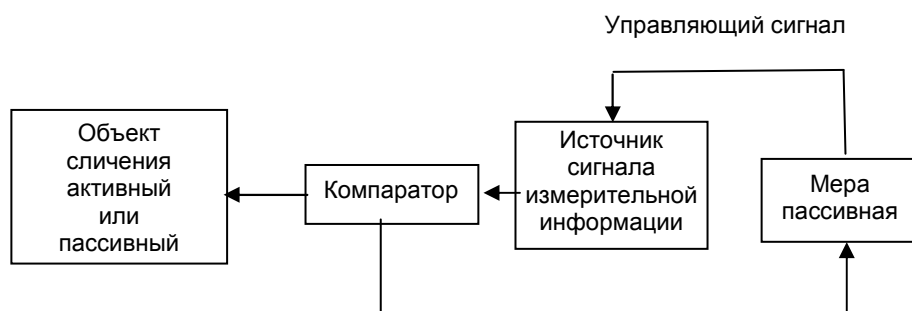


Рис. 6.2. Обобщенная функциональная схема двухрежимного эталона

6.2. Метрологические исследования, сличения и поверки эталонов

Государственные (национальные) эталоны проходят процедуру метрологического исследования. Программы таких исследований индивидуальны и не подлежат детальному регламентированию "сверху". Их содержание и уровень воплощения зависят очень сильно от квалификации авторов эталона. Надо сказать, что способность создать новый эталон и надежно обосновать значения его метрологических характеристик – свидетельство наивысшей квалификации метролога.

Наиболее ответственен, сложен и труден процесс метрологической аттестации эталонов основных единиц. Кроме теоретических предпосылок, используются фундаментальные физические константы, результаты исследования и международных сличений эталона – предшественника (если он был) и т. п. Крайне желательно включать в состав нового эталона отдельные, хорошо исследованные узлы старого. Это позволяет надежнее прогнозировать значения МХ и особенно такую МХ, как долговременная стабильность (нестабильность). Большое значение имеют личные, неформальные связи между метрологами различных стран. Они позволяют, например, провести предварительные (в какой-то мере неофициальные) сличения разрабатываемого эталона с уже действующими.

Несколько проще выполняется исследование вторичных эталонов (ныне весьма немногочисленный класс) и эталонов производных единиц. Здесь, кроме уже сказанного, широко используются результаты измерений, выполняемых на национальных эталонах основных единиц.

Обратим внимание еще на одну сторону процесса метрологических исследований эталонов высшего звена, по каким-то причинам выпадающую из круга интересов авторов публикаций по соответствующим проблемам метрологии. Суть этой стороны в том, что эталон на стадии выполнения им своей основной функции – передачи шкалы или единицы измерения нижестоящим (по поверочной схеме) средствам измерений и на стадии его исследования – может существенно отличаться по конфигурации и даже по составу (особенно по составу эталонов, привлекаемых из других поверочных схем, дополнительных средств измерений и обеспечивающего оборудования).

Современные сложные эталоны зачастую исследуются поблочно, по подсистемам, затем эти блоки комбинируются и рекомбинируются (а отдельные, не нужные для выполнения основной функции, выводятся в резерв или вообще разбираются). Хорошим примером может служить эталон единицы термодинамической температуры в криогенной области (см. главу 3). К сожалению, и в документации на эталоны эти вопросы не всегда излагаются надлежащим образом, что существенно осложняет процесс смены ученого хранителя.

Метрологические исследования рабочих эталонов выполняются на этапе, предшествующем их предъявлению на испытания с целью утверждения типа. Как правило, их основная часть – сопоставление с национальными эталонами (для рабочих эталонов высшего разряда) или с уже утвержденными рабочими эталонами высших разрядов.

После проведения испытаний и занесения в Государственный реестр, рабочие эталоны подвергаются поверке по методикам, апробированным в ходе испытаний с целью утверждения типа.

Сличения национальных эталонов – хорошая метрологическая практика, ведущая свое начало с 1889 г., когда страны, подписавшие Метрическую конвенцию, получили от МБМВ свои национальные эталоны метра и килограмма. Сличения этих эталонов с этого времени проводились более или менее регулярно.

Первая Генеральная конференция по мерам и весам установила периодичность сличения национальных эталонов метра один раз в 25 лет. Первое сличение, назначенное на 1914 г., не состоялось из-за первой мировой войны и было перенесено на 1920-1936 гг. Государственный эталон СССР – метр №28 – прошел первый раз сличение в конце 1935 – начале 1936 гг. То же самое имело место со сличениями эталонов массы – килограммовых гирь.

В процессе разработки международных практических температурных шкал МТШ-27; МПТШ-48; МПТШ-68; МТШ-90 выполнялись сличения национальных эталонов России, Англии, США, Голландии и Австралии. В 1913 г. были выполнены сличения ртутных эталонов в Англии, России, США и Японии. В 1940 г. – сличения нормальных элементов России с английскими.

В то же время в организации международных сличений присутствовал элемент случайности, личной заинтересованности лабораторий и даже лично ученых хранителей эталонов. Не были формализованы процедуры их выполнения, обработки и представления результатов.

Ситуация коренным образом изменилась с подписанием в 1999 г. Соглашения о взаимном признании национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами. Соглашение требует: а) наличия результатов ряда ключевых сличений, проводимых по четко установленным методикам, которые ведут к количественному выражению степени эквивалентности национальных эталонов; б) функционирования соответствующей системы качества; в) успешного участия в соответствующих дополнительных сличениях. Все эти требования призваны содействовать взаимному доверию между участвующими в Соглашении институтами. Степень эквивалентности национальных эталонов выражается количественно в значениях отклонений от опорного значения единицы, полученной при ключевом сличении, и неопределенностей в этих отклонениях.

Соглашение состоит из двух частей: в соответствии с первой частью подписывающие стороны соглашаются признать степень эквивалентности национальных эталонов участвующих национальных метрологических институтов, а в соответствии со второй частью подписывающие стороны соглашаются признать обоснованность сертификатов калибровок, выдаваемых участвующими институтами. Соглашение является техническим соглашением между директорами национальных метрологических институтов, а не дипломатическим договором. Оно составлено МКМВ в соответствии с Метрической конвенцией и не является ни расширением конвенции, ни заменой каким-либо образом каких-либо статей конвенции. Директора, которые должным образом решают подписать соглашение, берут обязательство только на самих себя и свои собственные институты, а не обязательство на какую-либо организацию или орган в их стране. Предполагается, что участие в этом соглашении откроет путь и обеспечит техническую основу для более широ-

ких соглашений, связанных с торговлей и коммерцией, подписываемых компетентными уполномоченными в каждой стране или регионе. В этом его цель.

К тексту Соглашения (его называют также Меморандумом) приложено Руководство по ключевым сличениям эталонов, проводимым консультативными комитетами МКМВ. Прежде чем излагать основные положения Руководства, напомним, что термин "сличение" предполагает сопоставление результатов, полученных на эталонах, близких по своему юридическому статусу и обладающих близкими метрологическими характеристиками.

Руководство предусматривает два основных типа ключевых сличений: в первый тип входят сличения, при которых эталон или техническое средство реализации единицы предполагаются имеющими длительную стабильность (типичными для них являются эталоны на основе квантовых эффектов, а также некоторые другие); во вторую категорию входят сличения тех эталонов, для которых нельзя предположить долгосрочную стабильность. Методики проведения сличений и иногда оценки результатов в двух этих случаях могут отличаться.

Сличения эталонов на основе квантовых эффектов и других стабильных эталонов обычно проводятся в двустороннем порядке и на постоянной основе. Национальные эталоны сличаются с одним конкретным эталоном, как это удобно участвующей лаборатории. Типичными примерами таких сличений являются сличения частот стабилизированных лазеров, сличения эталонов напряжения, использующих эффект Джозефсона и сопротивления на основе квантового эффекта Холла, проводимые МБМВ. Типичными сличениями других стабильных эталонов, но с гораздо большими неопределенностями можно считать сличения МБМВ эталонов единиц в области дозиметрии ионизирующих излучений. Методики, используемые в МБМВ для проведения сличений этого типа, описаны в отдельном документе под названием "Методики, используемые в ключевых сличениях, выполненных МБМВ".

Другие сличения, в которых не предполагается, что эталоны имеют длительную стабильность и которые составляют большинство ключевых сличений, проводятся по четкому временному графику, что позволяет всем участвующим лабораториям проводить свои измерения в установленный период времени. Эти сличения требуют, чтобы транспортируемые эталоны имели хорошую краткосрочную стабильность и стабильность во время транспортировки. Большая часть того, что приведено ниже, относится главным образом к такому типу сличений.

Особым случаем является регулярное вычисление временных шкал Международного атомного времени и Координированного всемирного времени в МБМВ. Они основываются на результатах непрерывной серии сличений часов, проводимых и истолкованных в соответствии с Руководством, согласованным с Консультативным Комитетом времени и частоты. Эквивалентность национальных временных шкал во всем мире обеспечивается принятием системы Координированного всемирного времени. Ничто в данном Руководстве не меняет этот порядок.

Организация ключевого сличения является обязанностью пилотной лаборатории, которой помогают два или три назначенных участника. При этом согласовывается метод вычисления опорного значения ключевого сличения;

перечень основных составляющих совокупной неопределенности, который каждый участник должен оценить, и необходимые рекомендации о том, как оценивать неопределенности на принципах, изложенных в Руководстве по выражению неопределенности в измерении, опубликованном ИСО. В допол-

нение к основным компонентам неопределенности, общим для всех участников, отдельные лаборатории могут добавить любые другие, какие они посчитают необходимыми. Неопределенности оцениваются для коэффициента охвата $k = 1$, и информация должна быть дана по числу эффективных степеней свободы, необходимых для соответствующей оценки уровня доверия.

Пилотная лаборатория несет ответственность за подготовку отчета о сличении в два этапа перед публикацией. Первый проект отчета типа А готовится сразу же после поступления результата от участников. Он включает результаты, переданные участниками, идентифицированными по имени. Проект является конфиденциальным для участников. Второй проект – типа В – последовательно готовится для Консультативного комитета (КК) и содержит приложение по опорному значению и степеням эквивалентности. Рабочую группу по ключевым сличениям обычно уполномочивают проверить проект В до его раздачи всем членам КК для того, чтобы обеспечить соответствие всем требованиям, установленным КК. Обязанностью КК является одобрение окончательного отчета о ключевом сличении для публикации. Обсуждение результатов и окончательного отчета проходит на встрече КК, и никакая публикация невозможна, пока не прошло это обсуждение. Для всех ключевых сличений окончательный отчет, подготовленный пилотной лабораторией служит основой для публикации результатов. В окончательной отчете результаты, которые

первоначально расходились, но впоследствии были исправлены, появляются в тексте с объяснением расхождений, но результаты, которые были изъяты, не появляются и не упоминаются.

Еще одно замечание. В последнее время появляются распределенные территориально национальные эталоны. Примерами служат эталоны единицы напряжения, использующие эффект Джозефсона. Все они равноточны, ни один из них не является главенствующим. Каждый из них в своем регионе возглавляет поверочные схемы. При проведении их сличений могут приниматься за основу рекомендации МБМВ по ключевым сличениям с назначением в качестве пилота одного из ГНМЦ (или его лаборатории) и с соблюдением всех его установлений (за исключением излишних при выполнении на территории одного государства).

Заканчивая главу об эталонах, добавим, что невзирая на все успехи радиоэлектроники, кибернетики, вычислительной техники и т. п., государственные эталоны все же остаются в большой степени персонифицированными устройствами. Они насыщены "ноу-хау" ученого хранителя и его ближайших сподвижников. Работа ученого хранителя – это во многом искусство. Только человек, создавший эталон, способен реализовать весь его технический потенциал.

Идеальной была бы следующая схема. Эталон создается с расчетом на 10-15 лет работы. Все это время работает и его создатель, затем ученый хранитель. Через 5-7 лет начинается разработка эталона нового поколения и "создает" его новый ученый хранитель.

Возможны, конечно, и исключения: преждевременная утрата ученого хранителя и, наоборот, его высокий научный потенциал, позволяющий возглавить и эталон следующего поколения.

6.3. Пути оптимизации национальной эталонной базы

Необходимость постоянной оптимизации эталонной базы любого промышленно развитого государства – следствие процесса увеличения числа основных и производных единиц или шкал действующих систем и, соответственно, числа эталонов, а также параллельного процесса освоения метрологией новых областей ее приложения, освоения неметрических и абсолютных шкал, внесистемных единиц и т. п., который зачастую также приводит к разработке новых исходных эталонов.

Формирование эталонной базы по принципу "каждой единице или шкале – свой эталон" явно приводит к тупиковой ситуации. Уже сегодня такое решение потребовало бы наличия в составе эталонной базы около ста пятидесяти эталонов с тенденцией роста их числа. Поэтому каждое государство в той или иной мере пытается решить вопрос оптимизации эталонной базы безпотери ее эффективности

Факторы, активно влияющие на состав эталонной базы, разнообразны, но, как правило, они являются внешними. Перечислим ряд этих факторов без претензий на полный охват:

финансовое положение государства (полностью независимая эталонная база обходится очень дорого);

уровень научно-промышленного развития, как по объему валового национального продукта, так и по его составу (разнообразию);

наличие или отсутствие признанных научных школ представителей различных специальностей, включая метрологов-теоретиков и практиков;

внешние экономические (торговые) связи, структура экспорта и импорта;

внутри- и внешнеполитическое положение страны (действует ли по отношению к ней режим максимального благоприятствования или какие-нибудь ограничения, запреты (постоянного или временного, разового характера);

наличие или отсутствие устойчивых политических объединений типа ЕС, СНГ и соответственно метрологических организаций (Евромет, КОOMET);

наличие или отсутствие таможенных барьеров, соглашений о взаимном признании результатов калибровки СИ на национальных измерительных эталонах;

возможность или невозможность получать размеры единиц или шкал из-за границы, т. е. провести калибровку или поверку национальных эталонов в какой-либо другой промышленно развитой стране;

актуальность обеспечения технической безопасности и самостоятельности страны во всех аспектах ее деятельности, включая метрологию.

Существенны и необходимы следующие критерии оптимизации эталонной базы любой страны.

1. В непрерывном процессе оптимизации эталонная база должна гарантировать безопасность государства (метрологическую независимость и самодостаточность) независимо от содержания его текущей политики.

2. Любая трансформация эталонной базы в ходе ее оптимизации не должна нарушать (тем

более разрушать) действующую систему единиц и шкал измерений и должна обеспечивать воспроизведение всех употребляемых в стране единиц и шкал измерений.

3. Изменения в эталонной базе не должны отрицательно отражаться на практике выполнения поверочных и калибровочных работ.

4. Взаимосвязанное воспроизведение единиц и шкал в эталонной базе должно быть ориентировано и на основные единицы SI, и на такие исходные эталоны единиц и шкал, совокупность которых позволяет осуществить прослеживаемость (traceability) для всех остальных необходимых эталонов.

5. Возможности международного сотрудничества по приобретению и калибровкам исходных для страны эталонов за границей должны рассматриваться и учитываться в качестве альтернативы организации соответствующих научных коллективов и производств, разработке и изготовлению собственных эталонов.

Оптимизация эталонной базы как единого целого безусловно затруднительна, а возможно, и вообще неосуществима из-за трудностей, связанных в основном с недостаточной изученностью взаимосвязи эталонов разных шкал и единиц. Одно из возможных решений сводится к следующему.

Эталонная база разбивается на ряд блоков (рис. 6.3): базовый блок и блоки по основным видам измерений, оптимизация которых представляется более реальной. После оптимизации базового блока уже можно рассматривать пути оптимизации блоков по видам измерений.

Безусловно, оптимизацию этих блоков (условно их можно назвать блоками второго уровня) следует выполнять в последовательности, вытекающей из числа их связей с базовым и другими блоками. При этом необходимо рассматривать эталоны, воспроизводящие и (или) хранящие не только единицы SI, но и эталоны относительных (безразмерных) величин, описываемых абсолютными шкалами, эталоны качественных свойств, описываемых шкалами наименований, и эталоны неархимедовых величин, описываемых шкалами порядка.

Для решения вопроса и выявления внутренних связей и зависимостей между эталонами основных единиц SI уместно напомнить действующие определения этих единиц, обратив особое внимание на наличие или отсутствие связей между ними.

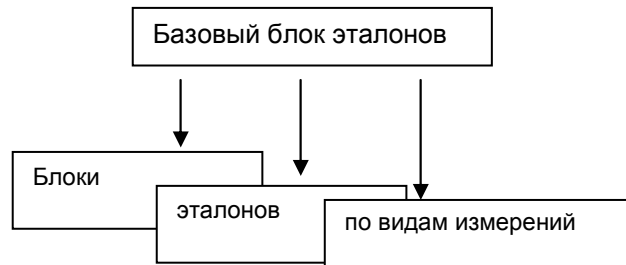


Рис. 6.3. Предлагаемая структура оптимизации эталонной базы страны

Секунда есть интервал, в течение которого совершается 9192631770 периодов электромагнитного излучения, соответствующего переходу ($F = 4, m = 0$) и ($F = 3, m = 0$) между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133. Иными словами, размер секунды определяется только внутриатомными процессами в атоме цезия и не зависит от других единиц SI. Через секунду определен размер метра, значение частоты входит в определение канделы. Джозефсоновы матрицы эталона вольта облучаются СВЧ-сигналом известной частоты и т. д. Этот эталон абсолютно необходим в составе эталонной базы любой страны.

Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды. Таким образом, по определению и способу воспроизведения эталоны метра стали зависимыми, получающими размер единицы от эталона секунды.

Килограмм есть масса международного прототипа килограмма. Определение килограмма не связано ни с какими другими единицами, но с опорой на килограмм определяются многие производные единицы. Наличие эталона килограмма в эталонной базе абсолютно необходимо.

Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н. Уже само определение

связывает ампер не только с основной единицей – метром, но и с производной – ньютон (а через него с секундой, килограммом и опять-таки с метром).

Кельвин есть $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Без эталона кельвина обойтись нельзя. Определение кельвина не содержит упоминаний о других величинах и их единицах, поэтому этот эталон сейчас можно считать достаточно независимым.

Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср. Эталон единицы силы света по определению должен опираться на эталоны и определения единиц частоты, мощности, телесного угла. Таким образом, эталон канделы по воспроизведению зависит от ряда других.

Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12, массой 0,012 кг. Эталон моля не реализован из-за неоднозначности его определения, опирающегося, кроме того, на единицу массы – килограмм.

Итак, для поддержания SI из общей совокупности эталонов ее основных единиц абсолютно необходимы лишь эталоны секунды (и герца), килограмма и кельвина. Иными словами, эталоны только тех основных единиц, в определениях которых не упоминаются другие основные или производные единицы SI. Этот запрет, естественно, не относится к физическим константам, входящим в эти определения. Проиллюстрируем сказанное схемой рис.6.4, на которой обозначены все связи между основными единицами SI, вытекающие из их формальных определений.

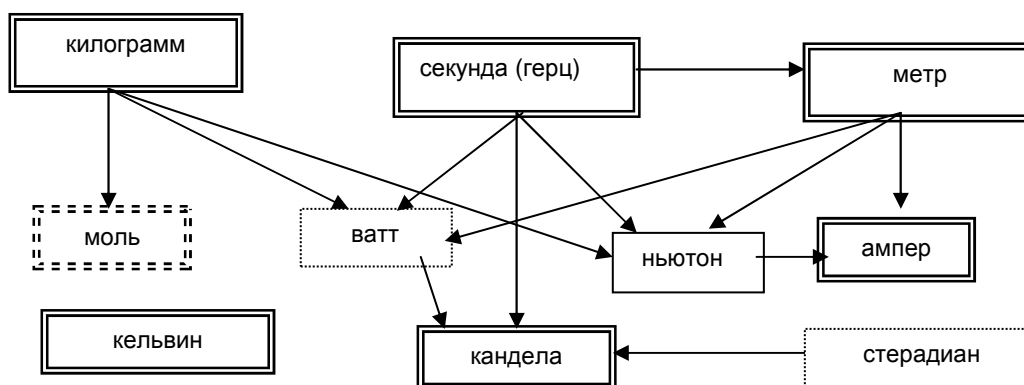


Рис. 6.4. Связь основных единиц SI между собой и с некоторыми производными единицами (двойной рамкой выделены основные единицы, пунктирной – существующие без эталонов единицы, стрелками – направление связей)

Из рис. 6.4 видно, что связи между основными единицами разнообразны, не вполне оптимальны и охватывают и производные единицы. После разработки и ввода в действие «квантовых» эталонов вольт и ома связи существенно упростились. Это показано на рис.6.5.

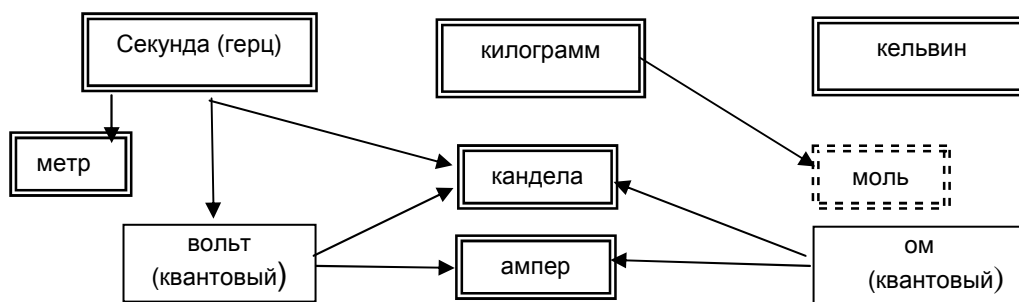


Рис. 6.5. Реальные связи между основными единицами (обозначения те же, что и на рис 6.4)

Осталось сделать последний, логически обоснованный шаг к оптимизации эталонной базы страны на уровне основных единиц SI – разработать и утвердить единый «квантовый» эталон вольт, ома и ампера. Возможный результат представлен на рис. 6.6. Неопределяющие, второстепенные связи, требующие, например, контроля за внешними электрическими и магнитными полями, температурой, уровнем магнитной индукции и т. п., на схемах рис. 6.4 – 6.6 не показаны.

Моль не показан ввиду отсутствия эталона. Кроме уже сказанного, рис. 6.6 иллюстрирует преимущества перехода на "квантовые" эталоны.

Представленную на рис. 6.6 совокупность эталонов базового блока не следует понимать как единственную и завершенную. Скорее всего базовый блок нужно будет дополнить еще несколькими эталонами производных единиц SI. На эту роль, например, мог бы претендовать эталон плоского угла в градусной мере.

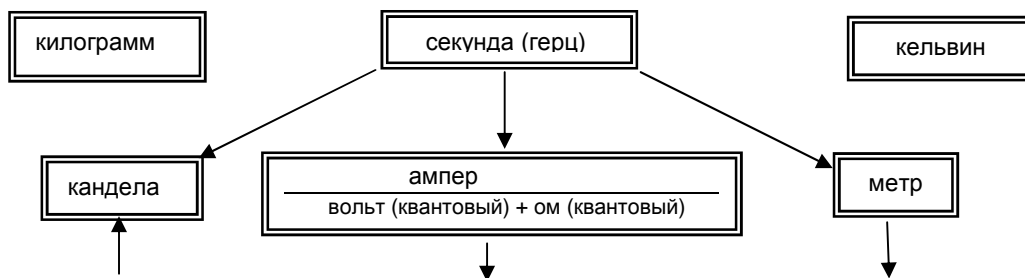


Рис. 6.6. Вариант оптимизации эталонной базы на уровне основных единиц

Оптимизацию эталонной базы на уровне эталонов производных единиц SI рационально, по нашему мнению, более или менее одновременно осуществлять по конкретным областям и видам измерений. Затем, скорее всего, понадобится «стыковка» отдельных «блоков» эталонной базы.

Саму процедуру (точнее, непрерывный процесс) оптимизации эталонной базы наиболее рационально и экономно выполнять, применяя положения теории шкал измерений, определяя необходимость, возможность или ненужность (нецелесообразность) разработки эталонов тех или иных шкал и единиц и всесторонне анализируя и оценивая две альтернативные возможности: создание специального, отдельного эталона или использование нескольких эталонов других шкал или единиц (комплексный или поэлементный подход).

Выбор одного из этих решений, во-первых, зависит от имеющегося в наличии парка средств измерений данной величины (если он велик – экономически выгоден первый вариант, если мал – второй), во-вторых – от результата ранжирования существующих и планируемых к разработке (или приобретению) эталонов.

Литература к главе 6

1. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. О смысле понятия эталон // Законодательная и прикладная метрология. – 1996. – №2. – С.44-47
2. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Необходимость обновления метрологической парадигмы // Измерительная техника. – 1998. – № 8. – С.15–20
3. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Шкалы, единицы и эталоны. // Измерительная техника. – 1992. – №6. – С. 4–6
4. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Опыт классификации государственных эталонов // Законодательная и прикладная метрология. – 1996. – №4. – С. 34–37
5. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Чуйко В.Г. Об оптимизации эталонной базы страны // Измерительная техника. – 2000. – №1. – С. 3–6
6. Квин Т.Дж. Взаимное признание национальных измерительных эталонов и сертификатов калибровки, выдаваемых национальными метрологическими институтами // Измерительная техника. – 1998. – №5. – С. 67-71

Глава 7 ШКАЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ

7.1. Общие вопросы реализации шкал измерений

В этом разделе рассматриваются практические аспекты применения положений и выводов теории шкал измерений. Выяснение, каким типом шкалы описывается то или иное измеряемое свойство или величина, отнюдь не просто формальная классификационная операция. От правильного ответа на этот вопрос зависит очень многое, в том числе решение о возможности (или невозможности) изменения определения (спецификации) величины, возможности ее выражения через единицы SI, возможности (или невозможности) существенного улучшения метрологических характеристик при проектировании эталонов и рабочих СИ нового поколения. Важность сказанно-

го существенно возрастает в случаях (сегодня довольно частых), когда речь идет о метрологическом обеспечении измерений свойств и, в частности, величин, ранее не входивших в круг интересов традиционной метрологии. Ниже рассмотрим конкретные шкалы измерений, описываемые ими свойства и величины, их единицы и символы.

Практическая реализация шкал измерений достигается на основе стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и в необходимых случаях способов и условий (спецификаций) их однозначного воспроизведения.

Однозначность метрических шкал задается определениями единиц измерений в международной системе единиц SI. Однако реализация (воспроизведение) метрических шкал потребовала детализации их спецификаций и даже введения отклоняющихся от метрических, но максимально (на имеющемся уровне знаний) к ним приближенных неметрических шкал. В качестве примера можно привести международную температурную шкалу МТШ-90, которая, строго говоря, не является термодинамической и отклоняется от нее на несколько мК.

Сделаем еще одно важное замечание. При решении вопроса о том, какого вида метрической шкалой (отношений или разностей) описывается та или иная величина, соответствующая единице SI, необходимо руководствоваться исключительно логическим смыслом данной величины, а не типами шкал величин, через которые определяется данная величина (т.е. ее размерностью). Размерность не определяет физическую сущность величины, а является лишь логическим оператором в системе единиц (см. 3.3). Точно так же она не определяет и шкалу измерений, которой описывается та или иная величина. Роль шкалы, ее общность и значимость прямо не связаны с ее статусом в системе единиц. Так, например, энергетические величины в любой системе будут описываться аддитивными шкалами отношений, независимо от их названий, размерностей единиц, а их отношения – абсолютными шкалами; плотность, определяемая отношением массы к объему, т.е. отношением двух величин, описываемых аддитивными шкалами отношений, описывается не аддитивной, а пропорциональной шкалой отношений.

Абсолютные шкалы полностью определяются соответствующими безразмерными единицами (см. 3.6). В детализации спецификаций этих шкал на классификационном уровне нет необходимости. Однако для многих абсолютных шкал существуют варианты их практической реализации для конкретных применений. Например, коэффициенты пропускания света измеряют для различных вариантов геометрической формы падающего на образец и прошедшего сквозь него пучков света. Различают направленно-направленный, направленно-диффузный, диффузно-направленный, диффузно-диффузный и др. коэффициенты пропускания (см. 7.7). Поэтому для многих практически реализуемых абсолютных шкал существуют достаточно подробные спецификации.

Составить полный перечень шкал порядка, применяемых во всех отраслях народного хозяйства и во всех областях знаний, практически затруднительно, и нет практической необходимости стремиться к этому. Значительная часть спецификаций этих шкал приведена в стандартах на методы испытаний продукции. В следующих параграфах этой главы приведен достаточно представительный перечень шкал порядка и наименований, представляющих интерес для сферы государственного метрологического надзора и контроля.

Напомним, что шкалы наименований и порядка могут реализовываться и без эталонов, но если создание эталонов необходимо, то они воспроизводят весь применяемый на практике участок шкалы (пример - эталоны твердости). Внесение любых изменений в спецификацию, определяющую шкалу наименований или порядка, практически означает введение новой шкалы. Шкалы разностей и отношений (метрические шкалы), соответствующие SI, как правило, воспроизводятся эталонами. Эталоны этих шкал измерений могут воспроизводить одну точку шкалы (эталон массы), некоторый участок шкалы (эталон длины) или практически всю шкалу (эталон времени). В метрологических НД обычно говорится только об установлении и воспроизведении единиц измерений. На деле даже для величин, соответствующих основным единицам SI (секунда, кельвин, кандела и др.), эталоны, кроме единиц, хранят и воспроизводят шкалы (атомного и астрономического времени, температурную МТШ-90 и т.д.). При любом варианте построения эталонов поверочными схемами предусматривается воспроизведение всех необходимых для практики участков шкал. Абсолютные шкалы могут опираться на эталоны, воспроизводящие любые их участки (как эталоны метрических шкал), но могут воспроизводиться и без них (КПД, коэффициент усиления).

Логарифмическое преобразование шкал измерений.

Логарифмическое преобразование возможно для величин, описываемых шкалами разностей, отношений и абсолютными шкалами. Диапазоны практически используемых значений многих измеряемых величин весьма велики. Например, коэффициенты усиления и ослабления сиг-

налов в современных радиотехнических устройствах достигают сотен тысяч, воспринимаемые человеком звуковые давления различаются в миллионы раз от порогов слышимости до болевых ощущений. Запоминать, перемножать, делить большие числа, часто выражаемые десятичными дробями, затруднительно. Но если вместо больших чисел использовать их логарифмы, диапазоны измеряемых значений резко сокращаются. Операции умножения и деления заменяются более простыми – сложением и вычитанием.

Логарифмическое преобразование шкал в принципе возможно путем использования логарифмов с любым основанием. Практически получили распространение логарифмические шкалы на основе десятичных и натуральных логарифмов (с основанием, равным числу $e = 2,718284...$), а также логарифмов с основанием, равным числу два. В зависимости от использованного основания логарифма, характера измеряемой величины и области знаний применения логарифмических шкал единицы измерений в этих шкалах исторически получили различные наименования. В таблице 7.1.1 приведены основные наименования единиц измерений в логарифмических шкалах, подробнее о которых сказано в последующих параграфах.

Таблица 7.1.1

Измеряемые величины	Наименования и обозначения единиц измерения при основании логарифма:		
	10	$e=2,718284...$	2
Уровни различных величин	Бел (Б), Децибел (дБ)	Непер (Нп)	–
Уровень громкости звука	Фон	–	–
Частотные интервалы	Декада, савар	–	Октава
Количество информации	Дит	Нат	Бит

Развитие техники проводной связи поставило задачу измерения затухания и усиления мощности в линиях связи (четырёхполюсниках) и выбора удобной единицы измерения. В качестве величины, характеризующей затухание и усиление, или, иначе говоря, соотношение между входной P_1 и выходной P_2 мощностями на входе и выходе линии, был принят десятичный логарифм отношения этих мощностей:

$$X = \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right). \quad (1)$$

При этом логарифмическая единица для значений x получила особое наименование бел (Б). Наибольшее распространение получила дольная белу логарифмическая единица, равная десятой его части – децибел (дБ), т.е.

$$X \text{ (Б)} = 10X \text{ (дБ)} = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \text{ (дБ)}. \quad (2)$$

Логарифмические единицы бел и децибел допущены к применению наравне с единицами SI.

Практически одновременно с введением единиц бел и децибел в проводной связи, также для описания усиления или ослабления сигналов (напряжений U , силы токов I или мощностей P) использовалась логарифмическая единица непер. Значение N (в неперах) выражается натуральным логарифмом отношения выходных (U_2, I_2, P_2) и входных (U_1, I_1, P_1) значений величин по формуле

$$N = \ln \left(\frac{U_2}{U_1} \right) = \ln \left(\frac{I_2}{I_1} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right).$$

Неперу соответствует усиление (или ослабление) в $e = 2,718284...$ раза. Хотя единица непер менее удобна в десятичной системе счисления, на которой основана SI, она также допущена к применению наравне с единицами SI. Переход от непера к децибелам и обратно осуществляется по следующим соотношениям:

$$1 \text{ непер} = 8,68 \text{ децибела}, \quad 1 \text{ децибел} = 0,115 \text{ непера}.$$

После введения логарифмической единицы децибел в проводной связи она вскоре нашла применение практически во всех разделах радиотехники, а затем и в других областях науки и техники. И хотя логарифмическая единица дБ применяется в технике уже около века, часто ее практическое применение вызывает затруднения, поэтому остановимся на логарифмически преобразованных шкалах несколько подробнее.

Прежде всего следует помнить, что по определению (1) бел, а следовательно и децибел (2), есть логарифм отношения энергетических величин (мощности, энергии), тем не менее в дБ

можно, и на практике часто, выражать и отношения силовых величин (напряжения, силы тока, давления и др.), нужно только не забывать физическую связь этих величин с энергетическими величинами. Так, если, например, на вход электрического четырехполюсника (линии связи) с входным сопротивлением R_1 подана мощность P_1 , а на нагрузке R_2 , подключенной к выходу четырехполюсника, выделяется мощность P_2 , учитывая, что $P = U^2/R = I^2 R$, то по формуле (2) коэффициент усиления (затухания) мощности в четырехполюснике в дБ определяется по формулам:

$$10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 20 \lg \left(\frac{V_2}{V_1} \right) + 10 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

или $10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 20 \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right) - 10 \lg \left(\frac{R_1}{R_2} \right).$ (3)

Если R_1 и R_2 одинаковые, то коэффициенты усиления (затухания), рассчитанные по входным и выходным напряжениям или силам тока, численно будут равны коэффициенту, рассчитанному по отношению мощностей на выходе и входе четырехполюсника:

$$10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 20 \lg \left(\frac{V_2}{V_1} \right) = 20 \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right). \quad (4)$$

Если R_1 и R_2 не одинаковы, то второе слагаемое в правых частях (3), выраженные в дБ, согласуют значения коэффициентов усиления (затухания), рассчитанные по отношению мощностей и по отношению напряжений или силы токов. На практике для удобства часто эти слагаемые опускают. Но в этих случаях, во избежании путаницы, всегда важно в явном виде указывать, отношение каких величин имеется в виду. Например, коэффициент усиления по напряжению или коэффициент ослабления по силе тока.

Логарифмическое преобразование, вообще говоря, изменяет логическую структуру (тип) шкалы. В зависимости от первоначального типа шкал (см. 2.4), в которых измеряются логарифмируемые величины, логарифмические шкалы могут быть двух типов. При логарифмическом преобразовании абсолютных шкал (коэффициентов усиления, ослабления и т.д., см. 3.6) получаются абсолютные логарифмические шкалы. При логарифмическом преобразовании шкал отношений и интервалов в шкалах разностей получаются своеобразные логарифмические шкалы интервалов с фиксированным нулем. Свойства этих шкал существенно различаются, что необходимо учитывать в практическом их применении.

Абсолютные логарифмические шкалы.

При логарифмическом преобразовании абсолютных шкал в формулах (1–4) логарифмируются значения безразмерных величин, абсолютно не связанных с какой-либо системой единиц (см. 3.6), поэтому абсолютные логарифмические шкалы иногда называют логарифмическими шкалами с плавающим нулем. Например, коэффициенты усиления или ослабления сигнала в дБ в каком-либо устройстве по определению оцениваются относительно произвольно выбранного значения входного сигнала; аналогично затухание сигнала на краях полосы пропускания фильтра определяется относительно значения сигнала на среднегеометрической частоте этого фильтра; звукоизоляция перегородки находится относительно интенсивности прошедшего через нее звука и т.д.

В абсолютных логарифмических шкалах возможны, когда это имеет смысл, операции сложения и вычитания. Например, для двух (или более) последовательно включенных четырехполюсников коэффициент усиления (ослабления) в дБ может быть измерен для всей цепочки в целом, либо – отдельно для каждого звена, и затем результаты могут быть просуммированы.

Логарифмические шкалы с фиксированным нулем.

При логарифмическом преобразовании шкал отношений и интервалов в шкалах разностей получается своеобразная логарифмическая шкала интервалов с фиксированным нулем. Нулевые значения таких логарифмических шкал соответствуют опорным (стоящим в знаменателях логарифмируемых отношений) значениям преобразуемых величин (см. 3.6, табл. 3.2). В радиотехнике в качестве опорных значений чаще всего используют 1 мВт, 1 Вт при измерениях мощности; 1 мкВ и 1 В при измерениях напряжения. В некоторых областях знаний опорные значения установлены международными стандартами, например, 10^{-12} Вт/м² при измерениях акустической интенсивности, $2 \cdot 10^{-5}$ Па при измерениях звукового давления и т.д. Величины, выраженные в значениях логарифмических шкал интервалов с фиксированным нулем, принято называть уровнями (L).

В соответствии со стандартом МЭК 27-3 и ГОСТ 8.417-2002 при записи значений в дБ, в логарифмических шкалах с фиксированным нулем, следует помещать опорные значения в скоб-

ках после обозначения логарифмической величины, например: $L(20 \mu\text{Pa}) = 20 \text{ dB}$ или $L(1 \text{ mW}) = 57 \text{ dB}$, а при краткой записи – $20 \text{ dB (re } 20 \mu\text{Pa)}$ и соответственно – $57 \text{ dB (re } 1 \text{ mW)}$.

Здесь "re" – начальные буквы слова "reference", т.е. исходный (опорный). В русской транскрипции в таких записях вместо "re" пишут "отн." – начальные буквы слова "относительно".

К этим шкалам нельзя в общем случае применять ни одно из арифметических действий. Эта особенность логарифмических шкал обусловлена свойствами логарифмической системы счисления. Сложение или вычитание величин, выраженных в логарифмических единицах, математически сводится к задаче определения логарифма суммы или логарифма разности двух величин, логарифмы которых известны. Например, для определения суммарного уровня интенсивности двух одновременно работающих источников звука, создающих порознь уровни интенсивности $L_1 = 43 \text{ dB}$ и $L_2 = 46 \text{ dB}$, необходимо вначале перевести эти уровни в интенсивности звука: $I_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$ и $I_2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$, сложить интенсивности и только тогда определить суммарный уровень: $L_{1+2} = 10 \lg(I_1 + I_2) : I_0 = 48 \text{ dB}$, где I_0 – опорное значение интенсивности (10^{-12} Вт/м^2). Суммарный уровень интенсивности L_{1+2} в приведенном примере не равен сумме L_1 и L_2 , а всего лишь на 2 дБ превышает больший из них. Разность между суммарным уровнем L_{1+2} и L_2 не дает значения L_1 , а только показывает, на сколько дБ суммарный уровень превосходит уровень L_2 ($L_{1+2} - L_2 = 48 - 46 = 2 \text{ dB}$). Если энергетическая величина P_2 в формуле (1) увеличивается в 2 раза, то ее уровень не удваивается, а возрастает только примерно на 3 дБ, т.к.

$$10 \lg(2P_2/P_0) = 10 \lg(P_2/P_0) + 10 \lg 2 = 10 \lg(P_2/P_0) + 3 \text{ dB},$$

а для силовых величин, согласно (3), на 6 дБ. Аналогично при уменьшении в два раза энергетических и силовых величин их значения в логарифмических единицах уменьшаются соответственно на 3 и 6 дБ. Несколько парадоксальным, на первый взгляд, выглядит сложение двух уровней, каждый из которых равен нулю дБ, суммарный уровень будет в этом случае равен 3 дБ для энергетических и 6 дБ для силовых величин. Действительно, уровень в 0 дБ означает, что ему в исходной шкале отношений соответствует опорное значение (например $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$), т.е. не равное нулю значение, отсюда для энергетических величин при $P = P_0$, имеем:

$$10 \lg(P_0/P_0 + P_0/P_0) = 10 \lg 2 = 3 \text{ dB (отн } P_0),$$

а для силовых величин при $X = X_0$, получим:

$$20 \lg(X_0/X_0 + X_0/X_0) = 20 \lg 2 = 6 \text{ dB (отн } X_0).$$

На практике задачи сложения и вычитания величин, выраженных в дБ, решаются путем использования специальных номограмм, графиков, таблиц и других методов, изложенных во многих пособиях, упрощающих процедуру вычисления антилогарифмов, их суммирования (вычитания) и повторного логарифмирования.

Величины, выраженные в дБ, не следует усреднять, кроме случаев, когда нужно найти среднее геометрическое значение. Если разность усредняемых уровней не превышает 4 дБ, средний уровень (среднее геометрическое значение) будет отличаться от уровня усредненного сигнала (среднего арифметического значения) не более чем на 0,2 дБ. При усреднении величин, выраженных в дБ и различающихся на доли дБ, разность между средним геометрическим и средним арифметическим пренебрежимо мала. При усреднении величин, выраженных в дБ, всегда получается заниженное значение уровня.

Биофизические шкалы.

В метрологической практике существует ряд шкал, которыми описываются реакции биологических объектов, прежде всего человека, на воздействующие на них физические факторы. К ним относятся шкалы световых и цветовых измерений, шкалы восприятия звуков, шкалы эквивалентных доз ионизирующих излучений и др. Будем называть такие шкалы биофизическими.

Биофизическая шкала - шкала измерений свойств физического фактора (стимула), модифицированная таким образом, чтобы по результатам измерений этих свойств можно было прогнозировать уровень или характер реакции биологического объекта на действие этого фактора. Такие шкалы строятся по моделям, так модифицирующим (трансформирующим) измеряемые свойства стимула, чтобы имелось достаточно однозначное для практики соответствие между результатом измерений и характеристикой биологической реакции (гомоморфное отображение множества стимулов на множество реакций). При этом некоторому подклассу множества стимулов могут соответствовать эквивалентные реакции. Такая модифицированная шкала стимулов, естественно, по логической структуре приближается к структуре шкалы реакций и приобретает некоторую прогностическую ценность. Однако, как правило, биофизическая шкала стимулов и шкала соответствующих реакций являются шкалами разных типов, поэтому на прогностические суждения о реакциях, вызываемых стимулами, нельзя прямо переносить логические соотношения шкалы стимулов (см. главу 2). Так, например, шкала яркостей с точки зрения стимулов является

неограниченной аддитивной шкалой отношений, а с точки зрения восприятия – шкалой порядка в ограниченном снизу и сверху диапазоне значений стимулов.

Более подробно сведения о некоторых конкретных логарифмических и биофизических шкалах изложены в соответствующих параграфах этой главы.

Шкалы многомерных величин.

В прикладной метрологии существует общее стремление свести измерения многомерных величин к измерениям одномерных скалярных величин. Правомочность и уместность таких практических моделей измерений не вызывает сомнений. Однако при этом часто на прикладном уровне забывают о соответствующих таким моделям измерений упрощениях и допущениях, что порой приводит к неадекватной интерпретации результатов измерений и некорректным формулировкам. Покажем это на некоторых примерах.

На практике нередко трехмерные шкалы векторных величин заменяются одномерными шкалами модулей векторов, т.е. скаляров. При этом сравниваются только коллинеарные (направленные вдоль одной линии) векторы. Отклонения от коллинеарности векторов в таких измерениях являются источниками погрешностей. Такая ситуация имеет место, например, в государственном эталоне силы. Сила является векторной величиной, описываемой в выбранной системе координат, либо тремя проекциями силы на оси координат, либо модулем (длиной вектора) и двумя плоскими углами, характеризующими направление вектора в системе координат. Реально существующий государственный эталон единицы силы на самом деле является эталоном модуля силы, так же как единица измерения силы ньютон по логической сути – единица модуля силы. Большинство средств измерения силы (динамометры) измеряют только модуль силы и не содержат в своем составе устройств для определения направлений измеряемых сил. Такая замена сил их модулями является потенциальным источником неопределенности измерений. Заметим, что реально существуют и средства одновременного измерения модуля и направления вектора силы. Так, например, в аэродинамических испытаниях моделей летательных аппаратов давно применяются измерительные установки и устройства (трехкомпонентные весы, шестикомпонентные силоизмерители), которыми одновременно измеряются все составляющие суммарных векторов силы и крутящего момента (в лабораторной системе координат), действующих на обдуваемую в аэродинамической трубе модель.

Схожая ситуация и с измерениями векторов скорости движения в пространстве. Единица скорости – метр в секунду – является единицей модуля скорости, и многие измерители скорости (спидометры) измеряют только модуль скорости движения.

Приведенные здесь примеры предостерегают от ошибочных суждений и действий при измерениях различных многомерных величин (двухмерных, векторов, тензоров, матриц).

Реализация шкал в необходимом диапазоне измерений.

Для реализации стандартизованных определений шкал измерений и, в частности, единиц измерений в средствах измерений используется большое разнообразие экспериментальных методов, способов, приемов, накопленных естественными науками. Описать здесь весь этот богатый арсенал метрологической культуры невозможно. К тому же многие метрологические приемы остаются неопубликованным достоянием узкого круга специалистов по видам измерений и, конечно, ученых-хранителей национальных (государственных) эталонов. Однако можно выделить некоторые общие характерные для метрологических экспериментов положения по реализации шкал измерений.

Основой практической метрологии были и остаются меры. Поэтому создание мер величин и качественных свойств является, как правило, исходным этапом реализации шкал измерений. Далее возникает вопрос, как от одного или нескольких значений величины или качественного свойства, воспроизводимых эталонными мерами или другими средствами измерений, перейти к воспроизведению средствами измерений всего необходимого на практике непрерывного или дискретного множества значений измеряемого свойства, т.е. всего диапазона измерений. Существуют методические возможности для решения этой задачи с учетом в каждом конкретном случае логической структуры измеряемого свойства (см. 2.2) и установленных зависимостей между свойствами.

Так, например, широко используется в метрологических экспериментах теоретическая зависимость значений соответствующих величин от расстояния до точечного источника какого-либо излучения (электромагнитного в широком диапазоне частот – гамма, рентгеновского, оптического, радиотехнического диапазона; звукового, корпускулярных ионизирующих излучений). В акустических и радиоэлектронных измерениях часто используется известный принцип взаимности, уста-

навливающий взаимосвязь параметров обратимых четырехполюсников при их применении в качестве источников или приемников излучения.

Для реализации аддитивных шкал отношений и аддитивных абсолютных шкал прежде всего используется возможность экспериментального сложения двух или более значений измеряемых величин. Таким способом строят процедуры установления линейности показаний средств измерений (линейность градуировочных характеристик средств измерений массы, освещенности, электрического сопротивления и т.п.). Хорошо известна такого рода процедура в виде совокупных измерений массы, при которой значение массы отдельных гирь набора определяют по известному значению массы одной из гирь и по результатам сравнений масс различных сочетаний гирь. Экспериментально реализуема и процедура сложения плоских углов, описываемых абсолютными шкалами (см. 3.6). Однако смысл аддитивности применительно к шкалам конкретных величин различен. Например, в шкале массы аддитивность носит общий характер: массы тел арифметически складываются при любом пространственном объединении их, но электрическое сопротивление резисторов суммируется только при последовательном соединении их, а электрическая емкость конденсаторов суммируется, наоборот, при параллельном их соединении.

Для реализации шкал разностей также используется аддитивность, но не самих значений, а интервалов величин (времени, расстояний).

Реализация пропорциональных шкал отношений и пропорциональных абсолютных шкал осуществляется с использованием возможности изменения соответствующих величин в известное число раз (процедурного умножения или деления на определенное число). Значения многих безразмерных величин, описываемых абсолютными шкалами, можно в эксперименте перемножать. Например, коэффициент отражения системы из двух зеркал равен произведению коэффициентов отражения от каждого из зеркал системы.

Реализация неметрических шкал порядка и наименований осуществляется путем максимально точного воплощения в соответствующих средствах измерений спецификаций (определений) этих шкал. Здесь имеется в виду то, что спецификация конкретной шкалы содержит сведения, необходимые для воспроизведения шкалы во всем практическом диапазоне измерений и изготовления соответствующих устройств, образцов, веществ, достаточно идентичных по принципу действия и техническим параметрам. При этом для обеспечения единства измерений параметры задаются с допустимыми отклонениями в узаконенных единицах измерений. Например, при реализации шкал твердости фигурируют параметры размеров, формы и массы инденторов, силы и длительности надавливания на инденторы, глубина погружения индентора или размеры его отпечатков на объектах измерений и др.

Спецификации неметрических шкал, как правило, тщательно прорабатываются в процессе их разработки и стандартизации. Их последующее совершенствование направлено на уменьшение погрешностей измерений и на устранение влияния второстепенных мешающих факторов. Поэтому метрологические характеристики эталонов соответствующих свойств и величин меняются медленно и незначительно.

Смены спецификаций и даже определений единиц метрических шкал, наоборот, преследуют целью существенное улучшение метрологических характеристик эталонов. Так, например, трехкратная смена определений секунды позволила снизить погрешность эталонов времени и частоты на 6-7 порядков.

Шкалы измерений при испытаниях продукции.

Особое внимание метрологи уделяют испытаниям средств измерений с целью утверждения типа, аккредитации испытательных и измерительных лабораторий, разработке и аттестации методик выполнения измерений. Эти направления деятельности достаточно полно обеспечены методическими нормативными документами (НД), чего не скажешь о специфических вопросах выполнения измерений при испытаниях продукции различных видов. Во-первых, часто вызывает затруднение классификация средств испытаний на средства измерений и испытательное оборудование (см.5.1) и зависящая от этой классификации форма представления результатов испытаний. Во-вторых, необходимо обратить внимание на то, что в сфере внимания метрологов при этом оказываются величины и качественные свойства, описываемые не только метрическими шкалами разностей и отношений, но и шкалами порядка, наименований и абсолютными.

Единицы абсолютных шкал являются безразмерными. К неметрическим шкалам порядка и наименований понятие "единица измерения" вообще не применимо; при оценке результатов измерений по этим шкалам нельзя использовать понятия относительной погрешности, среднего арифметического и СКО.

К сожалению, в некоторых стандартах имеются неточности, которые желательно устранять при их пересмотре. Например, в некоторых стандартах по шкалам твердости неуместно говорится об условных или относительных единицах или результаты измерений сопровождаются обозначениями МПа, Н/мм² или кгс/мм², понимаемыми как единицы измерений; часто за результат измерений принимается не медиана, как это следует делать в шкалах порядка, а среднее арифметическое наблюдений. В устранении указанных и других недостатков НД по шкалам порядка полезна рекомендация МИ 2365-96.

Шкалами порядка описываются, например, такие широко распространенные и практически значимые величины, как: твердость материалов и минералов, октановые, цетановые, кислотные, йодные и бромные числа топлив и нефтепродуктов; кислотные, йодные и гидроксильные числа лакокрасочных материалов и синтетических смол, кислотные и эфирные числа эфирных масел; кислотные, йодные и перекисные числа растительных масел, числа омыления и эфирные числа синтетических жирных кислот; морозостойкость бетона и т.д.

Большинство шкал порядка метрологически обеспечены. Существуют государственные эталоны шкал твердости и соответствующие государственные поверочные схемы. В необходимых случаях средства измерений проходят испытания с целью утверждения типа и заносятся в государственный реестр средств измерений. Так, например, за последние годы прошли испытания и занесены в государственный реестр несколько моделей прибора для измерения числа падения - одной из характеристик качества муки. Измерительные процедуры по многим шкалам выполняются с использованием заимствуемых из других видов измерений узаконенных средств измерений. Некоторые шкалы порядка не интересны для инструментальной метрологии, однако необходимы для осуществления государственного метрологического надзора, например, шкала размеров фигур военнослужащих (ГОСТ 20881-91) или шкала устойчивости шерстяных тканей к повреждению молью и т.д.

Сказанное не исключает необходимости повышенного внимания ко всем метрологическим процедурам, связанным с применением неметрических шкал, от разработки эталонов до разработки МВИ и выполнения надзорных процедур.

В следующих параграфах этой главы приведены краткие сведения о некоторых наиболее значимых спецификациях и реализациях практически применяемых шкалах измерений, сгруппированных в основном по видам измерений.

7.2. Шкалы времени, частоты и больших длин

Эти шкалы образуют компактную группу с явными функциональными связями. Единицы времени и частоты и национальная шкала времени воспроизводятся одним эталоном. Единица длины воспроизводится по определению через единицу времени (см. 3.4. и 6.1).

Шкалы времени – типичные шкалы разностей. Счисление времени в них ведется от условных нулей. Интервалы времени обладают признаками аддитивных шкал отношений – их можно складывать, если в этом есть смысл и необходимость. Однако моменты времени суммировать нельзя. В настоящее время действует несколько разновидностей шкал времени.

Основная шкала, хранимая эталоном, шкала равномерного атомного времени – ТА. Это равномерная шкала разностей с фиксированным нулем отсчета. Размер секунды соответствует определению 1967 г. Шкала никак не связана с вращением Земли, с ее положением в пространстве. Шкала, принятая для гражданского времени, должна быть близка к солнечной шкале времени. Поэтому существует группа неравномерных шкал времени, связанных с положением Земли в пространстве и корректируемых по результатам астрономических и радиоастрономических наблюдений.

Шкала всемирного времени UT0, длительность секунды в которой равна средней солнечной секунде. Начало счета времени (начало суток) ведется от момента нижней кульминации среднего Солнца на меридиане Гринвича (среднее Солнце – идеализированное Солнце, равномерно движущееся в плоскости небесного экватора, т.е. Солнце, которое наблюдалось бы с Земли, если бы она равномерно двигалась вокруг Солнца по круговой орбите).

Шкала всемирного времени UT1 отличается от UT0 поправкой $\Delta\lambda$ на перемещения полюсов Земли: $UT1 = UT0 + \Delta\lambda$.

Шкала всемирного времени UT2 отличается от UT1 поправкой на сезонную неравномерность вращения Земли: $UT2 = UT1 + \Delta T_s$. В 12 ч всемирного времени 1 января 1964 г. шкала ТА была совмещена со шкалой UT2.

К сожалению, размеры секунды в шкалах ТА и UT2 (UT1) отличаются друг от друга. Имеются две основные причины этого расхождения: замедление скорости вращения Земли вокруг

своей оси и наличие систематической погрешности в эксперименте, по результатам которого секунда получила свое современное определение. Оно явилось результатом астрономических наблюдений с погрешностью порядка $1 \cdot 10^{-10}$. В результате секунда UT2 (UT 1) длиннее секунды ТА. Разница между ними меняется от месяца к месяцу, от года к году. Приблизительно ее можно считать близкой к $2 \cdot 10^{-8}$ с. Поэтому шкалы ТА и UT постепенно расходятся, но скорость этого расхождения не остается постоянной. За 2000-2002 гг. расхождение практически не увеличилось.

Чтобы максимально устранить последствия этого, введена шкала координированного времени UTC. Секунда UTC равна секунде ТА, а начало счета может меняться ровно на 1 секунду с первого числа любого месяца (предпочтительно 1 января или 1 июня) в 0 часов по шкале UT2 с тем, чтобы расхождения между UTC и UT2 не превышали бы 0,9 секунды. Практически поправка вводится один раз в году – 1 января. В 2000-2002 гг. поправка не вводилась. Шкала UTC (точнее, ее национальная версия UTC-SU) также поддерживается эталоном времени и частоты России. Она является равномерной шкалой разностей в течение времени между двумя коррекциями. В шкале UTC – SU ведутся передачи сигналов времени через радио- и телевизионные каналы России. Эти сигналы являются своеобразными виртуальными мерами – рабочими эталонами моментов времени в шкале UTC-SU. Действующее в России "декретное время" является той же шкалой UTC, смещенной на 1 ч вперед. Ежегодно вводимое "летнее время" также смещает шкалу UTC еще на 1 ч.

Кроме этих шкал, существует своеобразная, широко распространенная группа шкал времени, ориентированных на текущие события и имеющих условный (принятый по соглашению) ноль отсчета. Это календари. Календарь – это шкала для исчисления продолжительных интервалов времени, в основе которой лежат периодические явления природы, связанные с движением небесных тел. В них используются такие астрономические явления, как смена дня и ночи, изменения фаз Луны, смена времен года. Трудности составления удобных календарей связаны с тем, что отношения длительности года и лунного месяца к длительности суток не выражаются целыми числами. С погрешностью до 0,1 с длительность тропического года составляет 365,2422 суток, лунного месяца – 29,5306 суток. Последовательный счет лет во всех системах календарей ведется от какого-нибудь исторического или легендарного события.

Существуют три системы календарей: солнечные, согласующие продолжительность года с периодическими процессами, происходящими в природе (временами года, днями весеннего и осеннего равноденствия и т.п.); лунные – согласующие календарный месяц с фазами Луны; солнечно-лунные, согласующие и то, и другое. Построение солнечно-лунных календарей базируется на существовании девятнадцатилетнего цикла, по истечению которого повторяется взаимное расположение Солнца и Луны, т.е. 19 тропических лет равняются 235 синодическим (лунным) месяцам. Действительно, $19 \times 365,24220 = 6939,60180$ суток; $235 \times 29,53059 = 6939,68865$ суток. Погрешность этого цикла, называемого циклом Метона, по имени греческого астронома, открывшего его в 432 г. до н. э., составляет всего 2,09 часа за 19 лет.

Рассмотрим более подробно некоторые, широко распространенные сейчас и в недалеком прошлом календари.

Юлианский солнечный календарь. Начало отсчета – от Рождества Христова. Начало года – 1 января. Продолжительность обычного года 365 суток, високосного (каждого четвертого года, две последние цифры которого образуют число, делящееся на 4) – 366 суток. Средняя продолжительность года равна 365 суткам и 6 часам, а тропического года (года обращения Земли вокруг Солнца) равна в среднем 365 суткам, 5 часам, 48 минутам и 46,1 секундам. Средний юлианский год длиннее тропического на 11 минут 13,9 секунды, т.е. отстает от тропического на 1 сутки за 128 лет и 68 дней. В XX веке это отставание составило 13 суток. Счет по юлианскому календарю называют «старым стилем».

Григорианский солнечный календарь («новый стиль»), которым сейчас пользуются в большинстве стран мира. Отличается от юлианского только тем, что годы столетий, за исключением тех, у которых число, образующееся при мысленном зачеркивании двух последних нулей делится на четыре, не являются високосными. Т.е. годы 1700, 1800, 1900, 2100 – простые, 1600 и 2000 – високосные. Продолжительность среднего года в григорианском календаре больше тропического на 26 с; погрешность в 1 сутки накапливается, примерно, за 2800 лет. Даты юлианского календаря переводятся в григорианские прибавлением n дней по формуле: $n = C - (C_1/4) - 2$, где C – число полных прошедших столетий, C_1 – ближайшее меньшее число столетий, кратное четырем. Поправка действует с 1 марта первого года по 29 февраля сотого года столетия по старому стилю. При переходе со "старого стиля" на "новый" день недели сохраняется. В России григорианский календарь был введен декретом СНК РСФСР от 25 января 1918 г. "О введении Западно-

Европейского календаря". Первый день после 31 января 1918 г. было предписано считать 14-м февраля.

Мусульманский лунный календарь. Счет лет ведется от "хиджры" – переселения пророка Мухаммеда и его сподвижников из Мекки в Ясриб-Медину. Дата этого события приходится на 16 июня 622 г. по юлианскому календарю. В году 12 лунных месяцев, содержащих поочередно по 29 суток (пустые месяцы) и по 30 суток (полные месяцы). Начало каждого месяца должно по возможности совпадать с появлением на западе узкого серпа молодой Луны. Длительность года – 354 суток, т.е. он в среднем короче тропического на 11 суток. Для того чтобы фазы Луны приходились на одни и те же числа месяцев, вводятся високосные годы с одним добавочным днем.

Солнечно-лунный календарь. Этот календарь используется христианскими церквями при вычислении дат Пасхи и связанных с ней подвижных церковных праздников - пасхалий. В этом календаре год состоит из 12 лунных месяцев по 29 и 30 дней в каждом, а для учета движения Солнца периодически вводятся "високосные" годы, содержащие добавочный 13-й месяц, который вводится так, чтобы начало каждого года по возможности совпадало бы с равноденствием. Простые годы содержат по 353, 354 и 355 дней, а високосные по 383, 384 и 385 дней. Первое число каждого месяца, как в лунном календаре, почти точно совпадает с новолунием, а средняя продолжительность года близка к продолжительности тропического года.

Формы представления дат. Как и в каком порядке правильно писать день, месяц и год в дате? В ГОСТ 8.567-99 установлены обязательные для применения термины (момент, события, интервал времени, начальный момент, шкала времени, календарь, дата, Всемирное время, атомное время, координированные шкалы времени, часовой пояс и т.д.), относящиеся к области измерений времени и частоты. В частности, термин "дата" определен так: форма записи во всех документах, фиксирующая числовое выражение момента события в соответствии с установленными для данного календаря правилами. К этому термину сделано пояснение (запись состоит из порядкового номера текущего года от начала летоисчисления, порядкового номера текущего месяца и порядкового номера текущих от начала месяца суток) и приведен пример (2000.06.01). У некоторых пользователей этим стандартом возникает вопрос о рекомендательном или обязательном характере формы записи даты в указанном примере. ГОСТ 8.567-99 не распространяется на формы представления дат. В области распространения этого стандарта четко указано: "Термины, установленные настоящим стандартом, обязательны для применения во всех видах документации и рекомендуются для применения в учебниках, учебных пособиях, технической и справочной литературе". Таким образом, обязательны только термины "дата" и другие, установленные стандартом, а приведенные примеры записи даты в данном стандарте не является обязательным.

Различные принятые формы представления дат установлены в других специализированных стандартах. В ГОСТ Р 6.30, распространяющемся на организационно-распорядительные документы (постановления, распоряжения, приказы, решения, протоколы, акты, письма и др.), даны следующие формы датирования документов: «Дата документа оформляется арабскими цифрами в следующей последовательности: день месяца, месяц, год. День месяца и месяц оформляются двумя парами арабских цифр, разделенными точкой; год – четырьмя арабскими цифрами. Например, дату 5 января 2000 г. следует оформлять: 05.01.2000. Допускается словесно-цифровой способ оформления даты, например: 5 января 2000 г., а также оформление даты в следующей последовательности: год, месяц, день месяца, например: 2000.01.05». При этом сказано, что «датой документа является дата его подписания или утверждения, для протокола – дата заседания (принятия решения), для акта – дата события».

В ГОСТ 7.64-90, полностью соответствующем международному стандарту ИСО 8601-88, установлены общие требования к представлению дат и времени дня в научно-технических документах. Эти требования распространяются на автоматизированные системы научно-технической информации и соблюдение их обязательно для представления любой даты григорианского календаря и времени дня. Этим стандартом установлены форматы представления: календарной даты, выражаемой годом, месяцем и днем месяца; порядковой даты, выражаемой годом и номером дня в году; порядковой даты, выражаемой годом, номером недели в году и номером дня недели; времени дня, исчисляемого по 24-часовой системе времени, выражаемого часами, минутами и секундами; разности поясного и Всемирного времени; совместного обозначения календарной даты и времени дня; периода времени.

Элементы даты и времени дня должны быть приведены в одной строке арабскими цифрами без пробелов. Предусмотрен расширенный формат с использованием разделителей: (-) дефис – для элементов дат; (:) двоеточие – для элементов времени дня; (/) косая черта – для деления в представлении периода времени. Возможно также представление даты с уменьшенной точ-

ностью (опускается день месяца) и сокращенный формат. При совместном представлении даты и времени дня между ними ставится указатель «Т». В стандарте имеются подробные инструкции с примерами для однозначного представления и понимания различных форматов дат, времени дня, периодов времени и др.

Шкала частоты – пропорциональная и в некоторых случаях аддитивная шкала отношений. Ее единица – герц – связана с секундой простым соотношением $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$. Шкала частоты и ее единица также, как шкала и единица времени, одинакова для всех применяемых систем единиц. Шкала имеет естественный нуль и не ограничена в сторону больших частот.

Очень важным для физиков и метрологов является то обстоятельство, что значение частоты какого-либо источника (сигнала) не зависит от свойств среды, в которой распространяются электромагнитные или звуковые волны. Этим частота отличается от связанной с ней величины – длины волны, значение которой зависит как от свойств среды (например, от значения ее диэлектрической постоянной), так и от конструкции линии передачи (например, волновода).

Не меньшим преимуществом является возможность передачи сигналов с точно известными значениями частот (эталонных частот) по радио- и телевизионным каналам от эталонов достаточно высокого ранга, без потери точности. В некоторых случаях применяют шкалы частоты, опирающиеся на другие, кроме герца, единицы частоты. Например, в механике используют единицы частоты оборот в секунду, минуту, час и сутки. В оптике используется своеобразная шкала частот – шкала волновых чисел $k = 1/\lambda$, где λ – длина волны. Шкалы частот применяются не только к гармоническим колебаниям, но и к любым периодическим процессам, например, к периодически повторяющимся импульсам любой формы.

Шкала длин. Забегая немного вперед (см. 7.3), заметим, что определение метра связывает его с секундой и скоростью света, что дает возможность определять (измерять) большие расстояния, просто фиксируя соответствующие интервалы времени. Этот способ особенно удобен для определения расстояний до сравнительно близких небесных тел (Луна, Венера, Марс и т.д.), а также для нужд наземной и космической навигаций. На этом принципе работают координатно-навигационные системы GPS и ГЛОНАСС.

7.3. Шкалы пространственных свойств

Трехмерные множества пространственных протяженностей и расположения точек в пространстве являются основой для образования большого многообразия пространственных моделей, характеризующихся количественными и качественными свойствами, классификация которых представлена в 2.2. Рассмотреть здесь все шкалы измерений пространственных свойств невозможно, поэтому рассмотрим только некоторые из них.

Шкалы длин (интервалов в шкале разностей) обладают свойствами аддитивной шкалы отношений. Единица шкалы – метр, связана с секундой. Значения измеряемых интервалов длин не ограничены. Строго, по действующему определению метра, измеряют большие и сверхбольшие расстояния, которым соответствуют достаточно длительные интервалы времени, например, в навигации и астронавигации.

Сравнительно небольшие длины, включая и метр, определяют косвенными методами. Предварительно, с помощью специальной аппаратуры («классических» радиооптических мостов или фемтосекундных лазеров), измеряют частоты стабилизированных лазеров (чаще всего гелий-неоновых).

В метрологии используется математическая модель неограниченного трехмерного евклидова пространства, для измерений в котором, как правило, задаются системы координат. Естественно, что арифметическое суммирование длин пространственных интервалов возможно только вдоль одной прямой линии в пространстве (одного направления). Алгоритм сложения разнонаправленных отрезков (векторов) другой. Кроме того, понятие длины отрезков распространено и на кривые линии, и существуют соответствующие специализированные шкалы (виды) измерений длин, например, отрезков эвольвентных кривых. Линейные размеры неровностей на поверхностях характеризуются специализированными шкалами шероховатости, классов чистоты поверхностей металлических, оптических и др. деталей (ГОСТ 11141), гладкости (бумаги и картона по ГОСТ 12795).

Шкалы площади плоской поверхности являются аддитивными шкалами отношений и в основном определяются стандартизацией единиц измерения площади. В СИ единицы измерения площади – квадратный метр, м^2 . Широко применяются и другие единицы измерения площади: гектар, га; квадратный километр, км^2 и др.

В физике применяется единица площади барн, $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$. Понятие площади поверхности также распространено на поверхности произвольной формы, на общую поверхность совокуп-

ности частиц, пор и капилляров в телах. Обеспечение единства измерений площади осуществляется косвенными методами измерений с опорой на эталоны длины, а собственно эталона площади поверхности и единой поверочной схемы для средств измерения площади не существует.

Шкалы пространственного объема являются аддитивными шкалами отношений, определяемыми стандартизацией единиц измерений. В SI единицей измерения объема является кубический метр, м^3 . Для измерения внутреннего объема (емкости) сосудов и резервуаров используют и другие единицы измерения: литр ($1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3$); декалитр ($1 \text{ дал} = 10 \text{ л}$); гектолитр ($1 \text{ гл} = 100 \text{ л}$). Существуют эталоны размера единиц объема газов, жидкостей, сыпучих и твердых тел.

Шкала плоских углов – абсолютная аддитивная ограниченная, периодическая (все значения углов повторяются через целый оборот). Естественной единицей плоского угла является оборот – угол, при повороте на который все точки тела занимают прежнее положение. В радианной мере один оборот равен 2π радиан, в градусной – 360° .

Наибольшее применение имеет градусная шкала плоских углов. Именно ее воспроизводит государственный эталон России. Это объясняется тем, что СИ, градуированные в радианах, не выпускаются, а наиболее часто применяемые углы: 30° ; 60° ; 75° ; 90° – не выражаются целочисленно в радианной мере. Кроме радиана и углового градуса, применяются (с соответствующими абсолютными шкалами) град (гон), или метрический градус, $1/400$ оборота и румб – $1/32$ (в навигации) или $1/16$ (в метеорологии) часть оборота. В артиллерии применяют тысячную (дистанции): $1/(2\pi \cdot 10^3)$ полного угла (оборота).

Шкала телесных углов – абсолютная, аддитивная, ограниченная. Максимальное значение телесного угла 4π ср – естественная единица. Не существует средств измерений телесных углов. Их значения определяют, измеряя плоские углы и выполняя стандартные расчеты. В частности, для телесных углов с осевой симметрией пользуются формулой: $\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha/2)$,

где Ω – телесный угол в с; α – плоский угол при вершине конуса.

Пространственные качественные свойства взаимоположения, направления, ориентации, формы, симметрии, структуры, поляризации (см. 2.2) описываются различными шкалами наименований, построенными чаще всего с использованием двухмерных или трехмерных систем координат, а также шкал измерений длины и плоских углов. Такие сложные модели измерений позволяют структурировать качественные пространственные свойства с введением совокупности характеризующих их количественных параметров.

Наиболее универсальное описание пространственных свойств осуществляется введением трехмерных шкал – систем координат, в которых расположение точки в пространстве однозначно определяется радиусом – вектором, исходящим из начала координат. Чаще всего используются либо прямоугольные (декартовы) системы координат (положение точки в пространстве определяется значениями трех координат), либо полярные системы координат (положение точки в пространстве определяется модулем радиуса-вектора и двумя плоскими углами, характеризующими его направление).

Для измерения взаимного расположения и формы элементов деталей и изделий в машиностроении применяются трехкоординатные и двухкоординатные измерительные машины.

Существуют и другие упрощенные специализированные шкалы измерений формы, например, для измерения отступлений от прямолинейности и плоскостности путем измерения локальных зазоров между соприкасающимися эталоном формы и объектом измерений. Отклонения формы поверхностей оптических деталей, например, характеризуют числом интерференционных полос, наблюдаемых при наложении эталонных стекол на контролируемые поверхности деталей. Так контролируется не только плоскостность, но и кривизна поверхностей деталей.

Особый интерес представляют шкалы измерений формы объектов сложной нерегулярной формы. Например, существует шкала определения формы частиц металлических порошков по ГОСТ 25849. Для описания формы частиц используют факторы формы, представляющие собой отношения: максимального линейного размера проекции частицы к ее минимальному размеру; расстояния между касательными к крайним точкам проекции, параллельного направлению перемещения предметного столика микроскопа, к хорде, делящей площадь проекции частицы на две равные части и параллельной направлению перемещения предметного столика микроскопа; периметра проекции частицы к площади ее проекции. Результатами измерений являются значения факторов формы, соответствующие максимумам их частотного распределения. Кроме того, частицы классифицируются по типовым формам, рисунки которых приведены в стандарте. Эта классификационная шкала содержит следующие типовые формы частиц: сферическую, округлую, уг-

ловатую, стержневую, игольчатую, пластинчатую, брызгообразную, дендритную, губчатую, пористую, полую.

Особую группу составляют геодезические шкалы измерений. Геодезические координаты (трехмерная шкала положения точки на поверхности Земли) – совокупность трех величин, две из которых являются углами, характеризующими направление нормали к поверхности земного эллипсоида в данной точке пространства относительно плоскостей его экватора и начального меридиана, а третья является высотой точки над поверхностью земного эллипсоида, который характеризует фигуру и размеры Земли. Эти величины имеют названия: географическая широта, долгота и высота.

Астрономические координаты – астрономическая широта и долгота характеризуют направление отвесной линии в данной точке пространства относительно плоскости, перпендикулярной к оси вращения Земли, и плоскости начального астрономического меридиана. Пользуются также понятием: географические координаты – обобщенное понятие об астрономических и геодезических координатах, когда не учитывают отклонения отвесных линий – углы между отвесными линиями и нормалью к поверхности земного эллипсоида в конкретных точках. Геоцентрические координаты – геоцентрическая широта и долгота – определяют положение точки в системе координат, у которой начало совпадает с центром масс Земли.

Плоские прямоугольные геодезические координаты – прямоугольные координаты на плоскости, на которую отображена по определенному математическому закону поверхность земного эллипсоида. Топоцентрические координаты – координаты, началом отсчета которых является точка местности. Горизонтальные координаты – топоцентрические координаты, одной из осей системы которых является отвесная линия или нормаль к поверхности земного эллипсоида.

Направление в пространстве – качественное свойство, описываемое шкалами наименований. Модели измерения направлений включают в себя фиксированные в пространстве системы координат. В таких системах, для описания направлений по отношению к Земле, используются следующие основные понятия: горизонтальная плоскость – плоскость, перпендикулярная к отвесной линии, проходящей через данную точку; вертикальная плоскость – плоскость, проходящая через отвесную линию в данной точке; астрономическое и геодезическое зенитное расстояние – угол между отвесной линией или нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке и направлением на другую точку; астрономический и геодезический азимут – отсчитываемый от направления на север по ходу часовой стрелки угол между плоскостью астрономического или геодезического меридиана данной точки и вертикальной плоскостью или плоскостью, проходящей через нормаль в ней и содержащей данное направление.

Особую шкалу измерений составляет совокупность параметров, характеризующих вращение Земли: два угловых параметра определяют положение оси вращения в теле Земли (или движение полюсов по поверхности Земли); два других угловых параметра определяют направление оси вращения Земли в системе координат, связанной с наиболее удаленными космическими объектами (квазарами), и еще один параметр характеризует изменения угловой скорости вращения Земли. Определением и прогнозированием значений этих параметров занимается в России государственная служба времени и частоты и определения параметров вращения Земли, возглавляемая ВНИИФТРИ.

Реализация геодезических измерений в перечисленных шкалах осуществляется с использованием геодезической сети – совокупности обозначенных точек земной поверхности (геодезических пунктов и знаков), положение которых определено в общей для них системе геодезических координат. Государственная геодезическая сеть, по метрологической функции является своеобразным распределенным национальным эталоном, для обеспечения единства геодезических измерений. Кроме того, в последние десятилетия получили широкое развитие геодезические координатные и навигационные измерения с использованием глобальных спутниковых систем и большого ассортимента соответствующей приемной аппаратуры, располагаемой в месте измерения координат. Заметим, что любые координатные измерения нельзя считать просто традиционными линейно-угловыми измерениями.

Шкалы измерений пространственной симметрии тоже являются шкалами наименований, классами эквивалентности в которых являются группы симметрии, характеризующиеся рядом показателей (см. 2.2). Результатом измерения в таких шкалах является установление группы симметрии для объекта, например, кристалла. Измеряют также параметры, характеризующие отклонения от полной симметрии.

7.4. Шкалы механических величин

Шкала масс. Шкала является аддитивной шкалой отношений и имеет естественный ноль. Так как международный и национальный эталоны воспроизводят только одну точку шкалы – 1 кг – все остальные значения (больше и меньше 1 кг) воспроизводятся путем выполнения совокупных измерений. Точность воспроизведения шкалы массы максимальна в точке, соответствующей ее значению в 1 кг, и убывает в обе стороны от этой точки.

Наиболее распространенный способ измерения массы основан на гравитационном взаимодействии тела с Землей, т.е. сводится к взвешиванию тела на весах. Нижний предел применимости весового метода находится в области значений $(3-7) \cdot 10^{-8}$ кг.

Для измерения масс микроскопических объектов пользуются шкалой атомных масс, в которой за атомную единицу массы (а.е.м.) принята $1/12$ массы изотопа углерода ^{12}C , т.е. 1 а.е.м. = $1,66053873(13) \cdot 10^{-27}$ кг. Относительное СКО оценено в $7,9 \cdot 10^{-8}$ этого значения.

Массы до десятков и сотен тонн определяют, суммируя массы гирь, применяя и сотенные веса, и специальные методы. Относительная погрешность таких взвешиваний находится в пределах $2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-2}$. Большие массы (до десятков тысяч тонн) определяют комбинированными методами: отдельные составляющие определяют весовыми, другие – расчетными, исходя, например, из геометрических размеров и плотности материалов; применяют также гидростатические методы. Погрешности таких определений массы, как правило, превышают 10^{-2} и зависят от конкретных условий.

Массы, измеряющиеся сотнями тысяч и миллионами тонн (как правило, это массы жидкостей, например, нефти), часто определяют, опираясь на измерения объема и плотности.

Массы космических объектов определяют (оценивают) различными расчетными методами с привлечением значительного объема астрофизической информации, использованием теоретических положений, значений различных физических констант. Точность оценки зависит от полноты и надежности имеющихся данных, от наличия или отсутствия у звезды (планеты) спутников и т.п. Обычно точность относительных оценок (например, значений масс Солнца и планет в единицах массы Земли) выше точности абсолютных оценок в тоннах. Оценки различных лет часто значительно отличаются друг от друга (по мере увеличения объема информации).

Шкалы силы. Сила – это мера воздействия на данное материальное тело других тел, вектор, характеризуемый модулем и направлением. Единица модуля силы устанавливается на основании второго закона Ньютона. Единица модуля силы в СИ – ньютон (Н). $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг м/с}^2$. В системе СГС единица силы – дина (дин). $1 \text{ дин} = 1 \text{ г см/с}^2$: $1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дин}$.

С учетом ограничений, рассмотренных в главе 2 (в данном случае – измерения модуля силы или одной компоненты по направлению ее действия) шкалу силы можно считать аддитивной шкалой отношений. В общем случае сила описывается трехмерной шкалой компонент или шкалой модуля силы в сочетании с двумя углами, характеризующими ее направление в выбранной системе пространственных координат.

Шкала момента силы. Момент силы описывается аксиальным вектором (псевдовектором) – векторным произведением вектора силы на радиус-вектор. Единица измерения модуля вектора момента силы – ньютон-метр (Н·м). Шкала этого модуля является аддитивной шкалой отношений. В общем случае момент силы, как и сила, описывается трехмерными шкалами.

Шкалы скоростей. Линейная скорость описывается вектором, а угловая скорость вращения – аксиальным вектором. Им соответствуют трехмерные шкалы, опирающиеся на выбранные системы пространственных координат. Единица измерения модуля вектора линейной скорости – м/с, а модуля вектора угловой скорости – рад/с. В области малых скоростей, далеких от релятивистских, шкалы модулей скоростей можно считать аддитивными шкалами отношений.

Шкалы ускорений. Линейное ускорение описывается вектором, а угловое ускорение – аксиальным вектором. Им соответствуют трехмерные шкалы. Единица измерения модуля линейного ускорения – м/с², а модуля углового ускорения – рад/с². Шкалы модулей ускорений являются аддитивными шкалами отношений.

Шкалы измерения давлений. Различают измерения: абсолютных давлений, вакуума, избыточных давлений, разности давлений, переменных составляющих давлений. Первые два случая описываются пропорциональными шкалами отношений. Остальные – шкалами разностей (интервалов). Единица давления в СИ – паскаль – Па, (Pa) – ньютон на метр квадратный.

Временно допускается к применению внесистемная единица давления бар = $10^5 \text{ Па} = 10^6 \text{ дин/см}^2$ – единица, размер которой лежит между физической и технической атмосферой; она удобна для практических измерений невысокой точности. В литературе прошлых лет баром называли 1 дин/см^2 . В системе СГС единица давления – дина на квадратный сантиметр. 1 Па ра-

вен 10 дин/см^2 . Порой еще находят применение внесистемные единицы давления: физическая атмосфера, $1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$; и техническая атмосфера, $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$; а также единица торр равная 1 мм рт. ст. , что соответствует $133,3 \text{ Па}$.

Шкалы абсолютных давлений вакуума имеют естественный нуль – отсутствие давления (полный вакуум). В технике (в отличие от физики) под вакуумом понимают состояние газа (в ограниченном объеме) при давлении ниже атмосферного. Различают четыре класса вакуума:

низкий – давление от 760 до 1 мм рт. ст.

средний – давление от 1 до $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$

высокий – давление от 10^{-3} до $10^{-7} \text{ мм рт. ст.}$

сверхвысокий – давление меньше $10^{-8} \text{ мм рт. ст.}$

Шкалы избыточных давлений имеют условный нуль – одну физическую атмосферу (если не указано иное). При точных измерениях сравнительно небольших избыточных давлений за условный нуль может быть принято реально существующее давление воздуха на месте и в момент выполнения измерения давления.

Выделение шкалы разности давлений в отдельную шкалу со своими специфическими методами измерений объясняется тем, что если вычислять разность давления по результатам измерения абсолютного или избыточного давления на входе и на выходе некоего устройства, то при больших значениях этих давлений и малых разностях между ними погрешность результата получается недопустимо высокой. Напротив, при измерении больших разностей давлений до единиц МПа и более, сравнимых с давлениями на входе и выходе систем, нет нужды в применении специальных методов измерений. Достаточная для практики точность достигается при непосредственном измерении этих давлений и вычислении их разности.

Шкалы переменных составляющих давлений применяются для измерений гармонической или импульсной составляющей давления на фоне значительно большего (в 5 и более раз) постоянного давления. В некоторых областях техники существует потребность в измерении переменной составляющей давления при практическом отсутствии постоянной составляющей. Пример – распределение давлений в канале ствола артиллерийского орудия при выстреле.

Шкалы твердости материалов. Твердость есть особое свойство, которым в различной степени обладают реальные твердые тела и которое проявляется в их способности оказывать сопротивление упругому и пластическому деформированию поверхности тела, или отрыву частиц вещества с поверхности, или одновременной комбинации из этих трех действий. Все шкалы твердости являются шкалами порядка. Методы измерения твердости делятся на две группы: определения твердости по размерам царапины на его поверхности и методы определения твердости тела по размеру вмятины на его поверхности. К первой группе, не связанной с применением технических средств, относятся шкалы относительной твердости минералов Мооса, Брейтгаупта, Хрущева. В этих шкалах эталонными мерами служат сами обозначенные в спецификации шкал минералы. Процедура определения твердости в баллах сводится к нахождению пары известных (см. табл. 7.4.1) минералов, один из которых царапает определенный минерал, а другой – им царапается.

Таблица 7.4.1

Минералы	Показатели твердости по:		
	Моосу	Брейтгаупту	Хрущеву
Тальк	1	1	0,9
Гипс	2	2	2,3
Слюда	–	3	–
Известковый шпат	3	4	3,3
Плавленый шпат (флюорит)	4	5	4,0
Апатит	5	6	5,7
Роговая обманка	–	7	–
Полевой шпат	6	8	6,5
Кварц	7	9	7,3
Топаз	8	10	7,9
Корунд	9	11	8,9
Алмаз	10	12	15,1

Эти шкалы, несмотря на невысокую точность, удобны для предварительной оценки твердости различных минералов непосредственно в полевых условиях, в геологоразведке. Ко второй группе относятся широко применяемые в технике шкалы, основанные либо на внедрении в испы-

туемый материал стандартного индентора, либо на царапании его поверхности стандартным наконечником, либо на использовании упругих свойств материала. Наиболее распространенные шкалы твердости основаны на измерении геометрических размеров (диаметра, диагонали, глубины) отпечатка индентора, полученного под воздействием определенной нагрузки. Это шкалы Бринелля, Виккерса и Роквелла.

Твердость по Бринеллю определяют по измерению диаметра отпечатка, оставленного на поверхности испытуемого материала твердосплавным шариком (индентором) при вдавливании его в материал нормированной силой. После снятия усилия по формулам или таблицам находят число (значение) твердости.

Вторая шкала – шкала Виккерса – отличается от шкалы Бринелля тем, что индентором служит не шарик, а алмазный наконечник в виде правильной четырехгранной пирамиды (причем обязательно из южноафриканского алмаза, поскольку твердость алмазов из различных месторождений несколько отличается друг от друга), и измеряется не диаметр, а диагональ отпечатка.

По шкале Роквелла фиксируется глубина погружения индентора в материал под воздействием двух последовательно прикладываемых нагрузок, предварительной и основной. В качестве индентора используется закаленный шарик либо алмазный конус. Несколько позднее появились приборы, воспроизводящие шкалы Супер-Роквелла. Они применяются для определения твердости образцов малой толщины и тонких поверхностных слоев.

Твердость закаленных и упругих материалов (шкала Шора D) определяется методом измерений высоты отскока бойка от поверхности материала. Для металлов, стекла, резины и т. д. применяются разные варианты шкал Шора.

Шкалы Бринелля, Виккерса, Роквелла и Супер-Роквелла, Шора D представлены в эталонной базе России соответствующими эталонами. Все четыре эталона шкал твердости хранятся и применяются во ВНИИФТРИ. Имеются модификации шкал Роквелла для измерений твердости пластмасс, твердых сплавов, абразивного инструмента и т. п. Существуют и другие шкалы твердости, применяемые несколько реже. Упомянем очень кратко наиболее известные из них: шкала измерений твердости металлов на пределе текучести вдавливанием шара; международные шкалы твердости резины. Твердость широкой номенклатуры твердых материалов (включая лакокрасочные покрытия) определяется методом разрушения по узкому следу (царапанием алмазным наконечником). Сводка названий и обозначений измеряемых величин в шкалах твердости представлена в таблице 7.4.2.

Сведения о шкалах твердости

Таблица 7.4.2

Объект измерений	Наименование измеряемой величины	Обозначение
Металлы и сплавы	Числа твердости по шкалам: Бринелля Роквелла Виккерса Шора Твердость на пределе текучести по ГОСТ 22762-77	HB HRC HV HSD H _{0,2}
Минералы	Числа твердости (баллы) по шкале Мооса	–
Резина	Числа твердости по международной шкале Твердость по шкале Шора А (ГОСТ 263-75)	IRHD –
Металлы	Числа микротвердости царапанием по ГОСТ 21318	H _{0,01} и H _{0,05}
Лакокрасочные покрытия	Твердость по ГОСТ 5233-89	–
Древесностружечные плиты	Твердость по ГОСТ 11843-76	H
Каменные угли и антрациты	Числа микротвердости по ГОСТ 21206-75	H
Абразивные материалы	Степень твердости в дискретной шкале по ГОСТ 19202	–
Пластмассы	Твердость по шкалам Роквелла по ГОСТ 24622-91 По шкале Шора А, ГОСТ 24621-81 Твердость по ГОСТ 4670-91	H _R HSA HK

Напомним, что к любым шкалам твердости – шкалам порядка – не применимы понятия: единица измерения, размерность, среднее арифметическое ряда наблюдения, СКО. Результаты измерений в этих шкалах выражаются числами твердости и другими числовыми показателями твердости, которые являются неархимедовыми величинами (см. 2.2). Нет необходимости сопровождать эти числа какими-либо символами, имитирующими единицы измерений. Также беспочвенны какие-либо рассуждения о размерности чисел твердости. В документах, к сожалению, довольно часто обозначения чисел твердости (HB, HRC, HV и др.) пишут после их численных значе-

ний, да еще с добавлением «ед» (единиц !). Правильная запись, например, HRC = (не именованное число).

За результат измерений чисел твердости нужно принимать не среднее арифметическое, а медиану ряда наблюдений, и в качестве неопределенности результата измерений использовать размах ряда наблюдений (см. 4.4).

Шкалы массового и объемного расхода жидкостей и газов. Расход – количество жидкости или газа, протекающее в единицу времени. Объемный расход – Q – измеряется в $\text{м}^3/\text{с}$. Массовый – M – измеряется в $\text{кг}/\text{с}$. $M = \rho Q$, где ρ – плотность вещества. $Q = v_{\text{ср}} S$, где $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока, S – площадь его поперечного сечения. Измеряют мгновенный, средний и пиковый (максимальный) расходы. Шкалы расхода являются аддитивными шкалами отношений.

Шкалы интенсивностей землетрясений.

Шкалы оценки силы землетрясений делится на две группы: шкалы магнитуд и шкалы внешних проявлений последствий землетрясений на поверхности Земли.

Шкалы магнитуд. Магнитуда – величина, характеризующая общую энергию упругих колебаний, вызываемых землетрясениями или взрывами. Шкала магнитуд определяет землетрясение стандартного масштаба и оценивает другие землетрясения по их абсолютным амплитудам относительно этого стандартного масштаба при идентичных условиях наблюдения. Шкала магнитуд является относительной логарифмической шкалой. Она опирается на определение Ч. Рихтера:

$$M = \lg [A(D) / A_0(D)] = \lg A(D) - \lg A_0(D),$$

где M – магнитуда, D – эпицентральное расстояние, A_0 и A – максимальная амплитуда записи для стандартного и измеряемого события.

Стандартное землетрясение, соответствующее $M = 0$ по формуле Рихтера, – это землетрясение, при котором максимальная амплитуда записи на сейсмографе Вуда-Андерсона равна 1 мкм при $D = 100$ км. Сейсмограф Вуда-Андерсона представляет собой небольшой цилиндр, ось которого вертикальна, соединенный вдоль образующей с тонкой проволочкой, которая, в свою очередь, смонтирована на раме, жестко связанной с почвой. В состоянии покоя равновесие цилиндра поддерживается, благодаря жесткости проволочки на кручение. Резкие колебания почвы приводят к закручиванию проволочки. Отсчетное устройство состоит из зеркальца, отбрасывающего сфокусированный луч света на движущуюся с постоянной скоростью, перпендикулярно плоскости зеркальца, фотобумагу.

Уравнение связи магнитуды с амплитудой движения грунта a (мкм) имеет вид: $M = \lg a + 3 \lg D - 2,92$. Его можно использовать при любом типе сейсмографа, если точно известна a .

Наиболее сильные известные землетрясения имеют по шкале Рихтера $M = 8,5$. Шкала магнитуд дает относительную оценку масштаба землетрясения, но не дает информации о причинах возникновения землетрясений. Существует формула, связывающая магнитуду с энергией очага землетрясения. Эта связь магнитуды M и энергии E (эрг) имеет вид: $\lg E = 11,8 + 1,5 M$.

Результаты расчетов по этой формуле приведены в таблице 7.4.3.

Таблица 7.4.3

Магнитуда	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
E , эрг	$6,3 \cdot 10^{17}$	$3,6 \cdot 10^{18}$	$2,0 \cdot 10^{19}$	$1,1 \cdot 10^{20}$	$6,3 \cdot 10^{20}$	$3,6 \cdot 10^{21}$	$2,0 \cdot 10^{22}$	$1,1 \cdot 10^{23}$	$6,3 \cdot 10^{23}$	$3,6 \cdot 10^{24}$
E , Дж	$6,3 \cdot 10^{10}$	$3,6 \cdot 10^{11}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	$1,1 \cdot 10^{13}$	$6,3 \cdot 10^{13}$	$3,6 \cdot 10^{14}$	$2,0 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$6,3 \cdot 10^{16}$	$3,6 \cdot 10^{17}$

Увеличение магнитуды на 1 единицу соответствует увеличению E в $10^{1,5}$ раз, т. е. в 32 раза. Наряду со шкалой магнитуд в ряде случаев используют энергетический класс землетрясения – K . Это десятичный логарифм сейсмической энергии, измеренной в джоулях. Например, $K = 16$ соответствует энергии $E = 10^{16}$ Дж = 10^{23} эрг.

Как уже было сказано, магнитуда и энергия характеризуют силу землетрясения в очаге. Значения магнитуд определяются с двумя значащими цифрами (с дискретностью в 0,1 магнитуды). Такова, примерно, и точность шкалы магнитуд.

Шкалы интенсивности сейсмических колебаний на поверхности Земли – шкалы балльности землетрясений. Шкалы балльности землетрясений являются шкалами порядка. Прямая, однозначная связь между шкалами балльности и шкалой магнитуд отсутствует. В зависимости от глубины очага и характера грунта балльность землетрясения в эпицентре может быть большей при меньшей магнитуде и наоборот. Еще сложнее зависимость в случаях, когда населенный пункт или промышленный объект находятся в стороне от эпицентра (наиболее часто встречающийся случай).

В настоящее время применяется ряд шкал балльности землетрясений.

Шкала по ГОСТ 6249-59 действует до настоящего времени. Она охватывает участок 6-9 баллов и служит руководством для строителей.

Шкала МКС–64 также на участок 6-9 баллов.

Российская 12-и балльная шкала (шкала Рихтера).

Сейсмическая 12-и балльная шкала Меркалли-Конканы.

Заметим, что все эти шкалы так или иначе связаны с объективными инструментальными показателями. Шкала ГОСТ 6249-52 связана с максимальным относительным смещением сферического упругого маятника сейсмографа X_0 в мм; шкала МКС-64 с интервалами максимальных ускорений сдвига грунта (см/с^2) и интервалами максимальных скоростей колебаний грунта (см/с); шкала Меркалли-Конканы с ускорением колебаний почвы в мм/с^2 и в долях ускорения силы тяжести – g . Однако все вводимые связи лишь подчеркивают нелинейность этих шкал и подтверждают их принадлежность к шкалам порядка.

Все эти шкалы похожи друг на друга. Они содержат описание реакции людей, повреждений и разрушений различных построек и сооружений, деформации грунта, повреждений подземных источников воды и т.д.

Дискретность этих шкал – 1 балл. Встречающиеся в печати оценки с дискретностью в 0,5 и даже 0,1 балла сомнительны из-за большой доли субъективности этих оценок. Различные шкалы часто учитывают различные факторы: и механические, и даже психологические (страх, стресс, паника). Поэтому необходимо, кроме балла, указывать и шкалу.

Шкалы силы ветра и состояния поверхности моря.

Двенадцатибалльная шкала силы ветра была предложена адмиралом Бофортом в 1805 г. и возведена в ранг международной в 1874 г. В 1946 г. были установлены соотношения между баллами Бофорта и средней скоростью ветра в м/с, а шкала расширена до 17 баллов в сторону больших скоростей ветра.

Шкала Бофорта (табл. 7.4.4) – типичная шкала порядка. Полное название шкалы – шкала силы ветра у земной поверхности, на стандартной высоте 10 м над открытой ровной поверхностью, т. е. она применяется и на суше и на море. Зависимость скорости ветра до 12 баллов не сильно отличается от линейной. Однако, по-видимому, вообще невозможно свести шкалу силы ветра Бофорта просто к шкале скорости ветра, и ее название не случайно.

Ветер чаще всего непостоянное, пульсирующее движение воздуха. Порывы ветра существенно влияют на уровень волнения, на высоту, форму и длину волн. Степень воздействия на объекты: корабли, здания, сооружения и т. п. – также сильно зависит от этих динамических составляющих. При силе ветра более 8 баллов действует еще один фактор: водяная пыль и брызги. Поэтому привязку шкалы силы ветра к шкале его скорости следует считать приближенной.

О погрешностях такого рода шкал трудно сказать что-нибудь определенное. Даже при использовании анемометра сила ветра, в лучшем случае, идентифицируется с дискретностью в целый балл. А неопытный наблюдатель может ошибиться и больше, произведя измерения в неудачный момент (затишья или одиночного порыва). Поэтому в помощь морякам в США был создан альбом (атлас) фотографий состояния моря по шкале Бофорта.

Шкала силы ветра по Бофорту

Таблица 7.4.4

Баллы	Характеристика ветра	Скорость ветра, м/с	Состояние поверхности моря	Действие ветра на суше
0	Штиль	0 – 0,5	Зеркально-гладкое	Дым из труб поднимается вертикально
1	Тихий	0,6 – 1,7	Рябь	Дым из труб поднимается не совсем вертикально
2	Легкий	1,8 – 3,3	Появляются небольшие гребни волн	Движение воздуха ощущается лицом. Шелестят листья
3	Слабый	3,4 – 5,2	Небольшие гребни волн начинают опрокидываться, но пена не белая, а стекловидная	Колеблются листья и небольшие сучья. Развеваются легкие флаги
4	Умеренный	5,3 – 7,4	Хорошо заметны небольшие волны, гребни некоторых из них опрокидываются, образуя местами белую пену – "барашки"	Колеблются тонкие ветки деревьев. Ветер поднимает пыль и клочки бумаги
5	Свежий	7,5 – 9,8	Волны принимают хорошо выраженную форму, повсюду образуются "барашки"	Колеблются большие сучья
6	Сильный	9,9 – 12,4	Появляются гребни большой высоты, их пенящиеся вершины занимают большие площади, ветер начинает срывать пену с гребней волн	Сильно колеблются большие ветки. Гудят телефонные провода
7	Крепкий	12,5 – 15,2	Гребни очерчивают длинные валы ветровых волн; пена, срываемая ветром с гребней волн, начинает вытягиваться полосами по склонам волн	Качаются небольшие стволы деревьев
8	Очень крепкий	15,3 – 18,2	Длинные полосы пены, срываемой ветром, покрывают склоны волн и, местами сливаясь, достигают их подошв	Ломаются ветки деревьев. Трудно идти против ветра
9	Шторм	18,3 – 21,5	Пена широкими плотными сливающимися полосами покрывает склоны волн, отчего поверхность становится белой, только местами во впадинах волн видны свободные от пены участки	Небольшие разрушения. Срываются дымовые трубы и черепица
10	Сильный шторм	21,6 – 25,1	Поверхность моря покрыта слоем пены, воздух наполнен водной пылью и брызгами, видимость значительно уменьшена	Значительные разрушения. Деревья вырываются с корнем
11	Жесткий шторм	25,2 – 29,0	Поверхность моря покрыта плотным слоем пены. Горизонтальная видимость ничтожна	Большие разрушения
12	Ураган	Св. 29,0	То же	Производит опустошительные действия

Кроме шкалы Бофорта, в морской практике применяются и другие шкалы. Шкала состояния поверхности моря – десятибалльная шкала порядка, в отличие от шкалы Бофорта, не связана с явлениями, происходящими на суше. Шкала степени волнения моря. Особенность этой десятибалльной шкалы порядка – обозначение балльности римскими цифрами от 0 (волнение отсутствует) до IX (высота волн 11 и больше м).

7.5. Шкалы температуры и теплофизических величин

Шкалы температуры.

В науке и технике применяются термодинамические пропорциональные шкалы отношений, приближенные к ним практические шкалы и практические шкалы разностей (интервальные). Термодинамические шкалы имеют естественную начальную точку – абсолютный ноль температуры. Температура по такой шкале, определяемая как производная от энергии тела в целом по его энтропии, всегда положительна. Единица термодинамической температуры в SI – кельвин (K). Кельвин равен $1/273,16$ термодинамической температуры тройной точки воды, т.е. температуры, при которой твердое, жидкое и газообразное фазовые состояния находятся в равновесии. Термодинамическая шкала Ренкина отличается от шкалы Кельвина размером ее единицы. Один

градус Ренкина ($^{\circ}\text{Ra}$) равен $5/9 \text{ K}$ и равен градусу Фаренгейта. Перевод температуры t_{Ra} по шкале Ренкина в температуру t_{K} по шкале Кельвина выполняется по уравнению: $t_{\text{K}} = 5/9 t_{\text{Ra}}$.

Непосредственное применение термодинамических шкал связано с большими трудностями и обеспечивает несколько худшую воспроизводимость результатов, чем практические шкалы (не путать с практическими бытовыми шкалами, см. ниже). Практические шкалы базируются, как правило, на ряде реперных точек, в качестве которых используются тройные точки, точки плавления и затвердевания различных веществ.

В настоящее время действует максимально приближенная к термодинамической международная шкала МТШ-90, принятая на 17-ой сессией Консультативного комитета по термометрии (ККТ) в 1989 г. и утвержденная МКМВ. Шкала осуществлена с точки $0,65 \text{ K}$, сверху не ограничена. Расхождения между МТШ-90 и термодинамической шкалой не превышают $1...12 \text{ мK}$. Как и все предыдущие практические шкалы, она опирается на ряд реперных точек (табл. 7.5.1).

Основные реперные точки МТШ-90

Таблица 7.5.1

№	Температура		Вещество*	Тип точки**
	T_{90}/K	$t_{90}/^{\circ}\text{C}$		
1	от 3 до 5	от $-270,15$ до $-268,15$	He	V
2	13,8033	$-259,3467$	e-H ₂	T
3	$\approx 17,0$	$\approx -256,15$	e-H ₂ (или He)	V (или G)
4	$\approx 20,3$	$\approx -252,85$	e-H ₂ (или He)	V (или G)
5	24,5561	$-248,5939$	Ne	T
6	54,3584	$-218,7916$	O ₂	T
7	83,8058	$-189,3442$	Ar	T
8	234,3156	$-38,8344$	Hg	T
9	273,16	0,01	H ₂ O	T
10	302,9146	29,7646	Ga	F
11	429,7485	156,5985	In	C
12	505,078	231,928	Sn	C
13	692,677	419,527	Zn	C
14	933,473	660,323	Al	C
15	1234,93	961,78	Ag	C
16	1337,33	1064,18	Au	C
17	1357,77	1084,62	Cu	C

* Естественный изотопный состав за исключением ^3He ; e-H₂ в равновесном составе молекулярных модификаций орто и пара;
 ** Способ реализации: V – давление насыщенного пара; T – тройная точка (температура равновесия между твердой, жидкой фазами и паром);
 G – газовый термометр;
 C, F – точка затвердевания, точка плавления (температура равновесия жидкой и твердой фаз при давлении 101325 Па)

Практическое совпадение этой шкалы с термодинамической позволило назвать ее не МПТШ, как все предыдущие практические шкалы, а МТШ. Шкала МТШ остается объектом постоянных метрологических исследований, уточняющих ее в различных диапазонах температур.

Введению термодинамических температур предшествовал длительный период применения практических шкал разностей, базировавшихся на двух произвольно выбранных характерных температурных точках:

– шкала Фаренгейта, 1714 г. (96° – температура человеческого тела, 32° – точка таяния льда);

– шкала Реомюра, 1730 г. (0° – точка таяния льда, 80° – точка кипения воды);

– шкала Цельсия, 1742 г. (0° – точка таяния льда, 100° – точка кипения воды), размер градуса Цельсия приравнен кельвину.

Шкалы Цельсия и Фаренгейта по-прежнему широко применяются в практической жизни. Шкала Реомюра практически перестала применяться. Перевод значений температур по шкалам Фаренгейта, Реомюра и Цельсия друг в друга и в термодинамическую осуществляется по формулам:

Шкала Цельсия: $1^{\circ}\text{C} = 1 \text{ K}$; $t_{\text{K}} = t_{\text{C}} + 273,15$, где t_{K} – температура Кельвина, t_{C} – температура Цельсия.

Шкала Реомюра: $1^{\circ}\text{R}=1,25^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ц}}=1,25t_{\text{R}}$, где t_{R} – температура Реомюра; $t_{\text{К}}=1,25t_{\text{R}}+273,15$.

Шкала Фаренгейта: $1^{\circ}\text{F}=5/9^{\circ}\text{C}=5/9\text{K}$; $t_{\text{ц}}=5/9(t_{\text{F}}-32)$, где t_{F} – температура Фаренгейта; $t_{\text{К}}=5/9(t_{\text{F}}-32)+273,15$.

Здесь еще раз уместно напомнить, что при представлении результатов измерений в шкалах разностей Цельсия и Фаренгейта бессмысленны попытки выражать погрешность или неопределенность измерений в относительной форме (см. 4.4). Также бессмысленны суждения об изменении, например, температуры Цельсия в какое-либо число раз или на сколько-то процентов: 10°C и 15°C отличаются на 5°C , но не в 1,5 раза.

Функционально связаны со шкалой термодинамической температуры шкалы яркостной, радиационной и цветовой температур, температуры распределения радиошумовой и радиояркостной температур. Приборы для измерения температуры плавления и кипения веществ градуируются в МТШ-90 или в шкале Цельсия.

Теплофизические шкалы.

Шкала количества теплоты. Теплота (количество теплоты) – количество энергии, получаемой системой при теплообмене (при неизменных внешних параметрах системы). Единица измерения – джоуль – Дж. Шкала количества теплоты является аддитивной шкалой отношений.

Шкалы удельной теплоемкости. Теплоемкость – это количество теплоты, поглощаемой телом при нагревании на 1 К, точнее, отношение количества теплоты, поглощаемой телом при бесконечно малом изменении (приращении) температуры к этому изменению.

Таблица 7.5.2

Вещество		C_p
Твердые тела	Свинец	26,44
	Серебро	25,49
	Медь	24,52
	Железо	25,02
	Графит	8,53
	Алмаз	6,12
	Соль	50,79
	Алюминий	24,35
Газы	Аргон	20,79
	Неон	20,79
	Криптон	20,79
	Азот	29,12
	Кислород	29,36
	Водород	29,83
	Воздух	29,20
Жидкости	Ртуть	27,98
	Бензол	136,1
	Серная кислота	138,9
	Ацетон	125,0
	Вода	75,15

лом при нагревании на 1 К, точнее, отношение количества теплоты, поглощаемой телом при бесконечно малом изменении (приращении) температуры к этому изменению.

Теплоемкость единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью, одного моля вещества – молярной теплоемкостью, единицы объема вещества – объемной теплоемкостью. Соответствующие единицы: Дж/К, Дж/(кг·К), Дж/(моль·К), Дж/(м³·К). Обычно различают удельную теплоемкость при постоянном объеме C_v и удельную теплоемкость при постоянном давлении C_p . Для идеальных газов $C_p - C_v = R$, где R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К). Для жидкостей и твердых тел $C_p \approx C_v$. Удельная теплоемкость зависит от многих факторов – агрегатного состояния вещества, его атомно-молекулярной структуры, температуры, давления. В таблице приведены значения теплоемкости некоторых веществ (в Дж/(моль·К)) при атмосферном давлении и температуре 298,15 К.

Шкала теплоемкости, а также шкалы удельной, молярной и объемной теплоемкости являются пропорциональными шкалами отношений.

Шкала температурного коэффициента линейного расширения. Все твердые и жидкие тела при изобарическом нагреве увеличивают свой объем и линейные размеры. Знание температурного коэффициента линейного расширения – ТКЛР – необходимо для грамотного конструирования и правильной эксплуатации устройств, претерпевающих большие изменения и градиенты температуры. Единица ТКЛР – K^{-1} . Как правило, значения ТКЛР определяют с помощью дилатометров – приборов, измеряющих изменения размеров тел. Градуировка средств измерений, определяющих ТКЛР, производится обычно с помощью образцовых мер из химически чистой меди, кварца и др. материалов. Шкала ТКЛР является пропорциональной шкалой отношений.

Шкала теплопроводности. Теплопроводность – один из видов переноса теплоты от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры. Если относительное изменение температуры T на расстоянии средней длины свободного пробега частиц мало, выполняется закон Фурье, и тогда плотность теплового потока – q пропорциональна градиенту температуры: $q = \lambda \cdot \text{grad } T$, где λ – теплопроводность, зависящая от агрегатного состояния вещества, его атомно-молекулярного строения, состава, температуры, давления и т.п. Единица измерения теплопроводности – Вт/(м·К). Шкала теплопроводности является пропорциональной шкалой отношений.

7.6. Шкалы электрических, магнитных и электромагнитных величин

Измерения перечисленных величин занимают ведущее место в технике измерений. Максимален по номенклатуре (числу типов) и численности и парк соответствующих СИ. В то же вре-

мя, с точки зрения шкал измерений, вся эта совокупность довольно однородна и, практически, описывается аддитивными и пропорциональными шкалами отношений, абсолютными шкалами. В соответствии с положениями, изложенными в начале главы, мы, с некоторой долей условности, не будем считать зависимость большинства этих величин от частоты дополнительной мерностью шкалы.

К аддитивным шкалам отношений относятся шкалы следующих величин: электрической мощности, силы электрического тока, электрического напряжения, электродвижущей силы, электрического сопротивления (для последовательного соединения резисторов), электрической емкости (для параллельного соединения конденсаторов), индуктивности, спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения (СПМШ), девиации частоты, плотности потока энергии электромагнитного поля, спектральной плотности энергетической яркости и яркостной температуры электромагнитного излучения радиодиапазона, мощности электромагнитных колебаний в трактах.

Пропорциональными шкалами отношений являются шкалы следующих величин: магнитной индукции; магнитного момента; магнитного потока; электрического сопротивления при параллельном соединении резисторов; электрической емкости при последовательном соединении конденсаторов.

Абсолютными шкалами являются: ограниченная абсолютная шкала коэффициента амплитудной модуляции; ограниченная абсолютная шкала коэффициента нелинейных искажений; двухмерная ограниченная шкала комплексного коэффициента отражения электромагнитных волн; неограниченная шкала добротности колебательных систем; неограниченные шкалы коэффициентов усиления и ослабления; неограниченные шкалы относительной диэлектрической проницаемости; неограниченная шкала начальной магнитной проницаемости; ограниченная (периодическая) фазовая шкала. Фаза может выступать не только в роли компоненты двухмерных шкал, но и в роли самостоятельной величины – фазового сдвига (угла сдвига фаз).

Многие из этих, перечисленных выше, шкал на практике модифицируются в логарифмические и обычные шкалы условно-безразмерных величин (см. 3.6 и 7.1) с опорными значениями соответствующих величин, например, шкалы уровней электрической мощности и электрического напряжения, шкала относительной диэлектрической проницаемости.

В этом виде измерений применяются и многомерные шкалы. Среди них: двухмерные шкалы комплексной диэлектрической проницаемости и импеданса – полного сопротивления (совокупности активного и реактивного сопротивлений или совокупности модуля и фазы полного сопротивления). Трехмерными шкалами описываются потенциальные векторы (градиенты скалярного поля) напряженности электрического и магнитного полей, а диэлектрическая проницаемость анизотропных материалов описывается девятимерной шкалой (тензором). Кроме того, величины, характеризующие перенос энергии электромагнитного поля, например, плотность потока энергии электромагнитного поля, в общем случае зависят от положения и направления в пространстве, т.е. могут быть описаны только в трехмерных системах координат, являющихся многомерными шкалами наименований.

7.7. Фотометрические, колориметрические, сенситометрические и оптические шкалы

Существует значительное число (более 100) фотометрических величин, термины и определения которых стандартизованы (см. ГОСТ 7601-78 и ГОСТ 26148-84). Такое множество фотометрических величин обусловлено тем, что для описания распространения оптического излучения в пространстве и взаимодействия его с различными объектами необходимо учитывать пространственные, спектральные и временные аспекты. Фотометрические величины получаются путем дифференцирования и интегрирования потока (мощности) оптического излучения по параметрам, характеризующим эти аспекты. Многие фотометрические величины зависят от направления в пространстве, и некоторые из них могут быть представлены векторами. Естественно, невозможно описать шкалы измерений всех фотометрических величин с их модификациями. Здесь представлены только некоторые примеры фотометрических и опирающихся на них шкал измерений.

Шкалы световых величин.

Световые величины X_v описываются стандартизованной Международной комиссией по освещению (МКО) математической моделью линейного спектрально-аддитивного приемника излучений, по формуле:

$$X_v = K \cdot \int_0^{\infty} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $K = 683 \text{ лм} \cdot \text{Вт}^{-1}$ – метрологическая константа, зафиксированная в определении основной световой единицы – канделы (см. 3.4); $X_{e,\lambda}(\lambda)$ – спектральное распределение энергетической фотометрической величины; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения для дневного зрения – стандартизованная МКО в виде таблицы функция (см. график $\bar{y}(\lambda)$ на рис. 7.7.1 и ГОСТ 8.332-78). Эта модель позволяет определять (с некоторыми указанными ниже принципиальными ограничениями) значения световых величин для оптического излучения с любым спектральным распределением. Шкалы световых величин являются аддитивными шкалами отношений. Однако надо иметь в виду, что эмпирическая связь световых величин с уровнем светового ощущения (светлотой) нелинейна – близка к логарифмической (закон Вебера-Фехнера). Кроме того, модель световых измерений подразумевает ряд допущений и ограничений. Яркости, измеренные обычными методами (физическими фотометрами, скорректированными на $V(\lambda)$), будут согласовываться со зрительным восприятием только при определенных условиях. Так, для дневного зрения измеряемый свет должен иметь уровень яркости $\geq 3 \text{ кд/м}^2$, угол поля зрения должен быть $\sim 2^\circ$, источник света должен быть широкополосным излучателем, рассматривать этот источник необходимо центральным зрением, световая эффективность наблюдателя не должна существенно отличаться от световой эффективности стандартного наблюдателя. При других условиях, если измеренные яркости должны согласовываться со зрительным восприятием, необходимо использовать кривые, отличные от кривой $V(\lambda)$ МКО для стандартного наблюдателя. К этим условиям относятся использование больших полей зрения, измерение цветных источников, а также измерения света при малых интенсивностях. Для фотометрии это означает, что результаты, основанные на $V(\lambda)$, т.е. аддитивной системе, не всегда будут характеризовать ощущаемую яркость или видимость. Вносимая за счет неверного использования $V(\lambda)$ погрешность колеблется от пренебрежимо малых до ощутимых значений в зависимости от конкретных условий. Для цветных и монохроматических излучателей часто эти различия существенны. Например, синий светодиод окажется недооцененным в два раза по сравнению с желтым при равной измеряемой фотометром яркости.

МКО стандартизована также аналогичная $V(\lambda)$ функция для полной адаптации человека, однако на инструментальном уровне такие измерения не получили развития. Еще МКО введено в 1963 г. понятие эквивалентной яркости, предназначенное для оценки яркости с учетом особенностей смешанного дневного и ночного зрения (сумеречное зрение).

Шкалы измерений цвета.

Существующие шкалы измерений цвета (колориметрия, цветовые измерения, цветоведение) предназначены для идентификации и предсказания зрительных впечатлений (мыслеобразов), возникающих у человека с нормальным цветовым зрением при восприятии световых стимулов, испускаемых источниками или отражаемого (пропускаемого) телами (объектами) оптического излучения. Сразу отметим, что цветные мыслеобразы могут возникать у человека и при отсутствии световых стимулов, например, цветные сны – результат работы воображения и др.

Обычно суждения строятся так, что цвет приписывается материальным объектам. Например, говорят «лампа синего света», «красное платье», «бежевая краска», «рыжий кот» и т.п. Однако, в действительности сами по себе излучающие, отражающие и пропускающие свет (электромагнитное излучение) объекты имеют только спектральные характеристики излучения, отражения и пропускания, а цветовое ощущение возникает у человека при восприятии оптических изображений объектов на сетчатке глаз. Поэтому воспринимаемый цвет несамосветящихся объектов зависит еще от спектрального распределения освещающего излучения. Цветовые ощущения также зависят от предварительной адаптации зрения, окружающего цветового фона, уровней яркости в сумеречной области зрения, угловых размеров объектов и др. В дальнейшем изложении будем иметь в виду все эти обстоятельства, раскрывающие смысл понятия и термина «цвет».

Цвета отличаются, прежде всего, качественно (бессмысленно, например, утверждать, что красный цвет больше синего). Поэтому шкалы измерений цвета являются шкалами наименований, однако упорядоченными по признаку близости (сходства) цветов. Кроме того, качественно неразличимые цвета (одинаковой цветности) могут отличаться количественно по светлоте (яркости).

Множество всевозможных цветов гораздо многообразнее подмножеств спектральных цветов (соответствующих монохроматическому свету с различными длинами волн и наблюдаемых в радуге) и ахроматических цветов (серых, включая белый и черный). Смешение двух или более цветов дает новый цвет, причем получение многих цветов возможно в результате использования различных композиций смешиваемых цветов (метамеризм). Все наблюдаемые цвета можно полу-

чить путем смешения в соответствующих пропорциях трех определенно выбранных цветов. Под смешением цветов понимают какой-либо способ объединения цветовых стимулов, например, освещение белого отражающего экрана двумя или более цветными излучениями.

Воспринимаемый цвет объектов зависит от многих факторов: спектрального распределения излучения источника света; уровней яркости наблюдаемого источника или освещенности объекта; формы, размеров и зависимости от длины волны спектрального коэффициента отражения (пропускания) объекта, расстояния до него; цвета, яркости и размеров фона наблюдения; а также от предшествующей зрительной адаптации и психологического состояния наблюдателя, устойчивых представлений об определенном цвете объектов. Поэтому в моделях, используемых для построения шкал измерения цвета, используются привычные для человека четко оговоренные условия наблюдения. При описании воспринимаемого цвета выделяют три его взаимосвязанных атрибута: цветовой тон (оттенок цвета), насыщенность (уровень проявления цветового тона) и светлота (уровень яркости).

Основой математических моделей описания множества цветов является экспериментально установленный факт: любой цвет можно представить как смесь определенных количеств трех линейно независимых цветов (цветов, каждый из которых не может быть получен смешением каких-либо количеств двух других цветов). Таких систем линейно независимых цветов существует много, но для построения шкал измерения цвета (в колориметрии) используются лишь некоторые, стандартизованные на государственных или международном уровнях. Три таких стандартных цвета называются основными цветами, определяющими цветовую координатную систему, в которой каждому цвету соответствует три числа (координаты), являющиеся количествами основных цветов в эквивалентной по цвету смеси. Цветовой координатной системой определяется абстрактное неевклидово трехкоординатное цветовое пространство, в котором каждому цвету соответствует вектор, идущий из начала координат в точку с соответствующими координатами. Смешиванию цветов соответствует сложение соответствующих им векторов по правилам векторного сложения. Цветовые координатные системы стандартизуются для так называемого среднего стандартного колориметрического наблюдателя в определенных неизменных условиях. Такие системы позволяют построить шкалы измерения цвета стимулов (источников света, предметов и др. объектов), приемлемые для большинства людей с нормальным цветным зрением в обычных условиях наблюдения. Индивидуальные особенности цветочувствительности и изменения цвето-восприятия при изменении условий наблюдения этими системами не учитываются.

За единичные основные цвета принимают такие их количества, которые в смеси дают некоторый заданный (опорный, чаще всего белый) цвет. Линии, соединяющие точки единичных основных цветов, образуют цветовой треугольник, а точки, лежащие в плоскости этого треугольника, характеризуют качественный аспект цвета, называемый цветностью. Положение точки цветности в треугольнике определяется любыми двумя (из трех) координатами цветности, так как каждая из них по определению равна частному от деления одной из цветовых координат на сумму всех трех цветовых координат. Таким образом, сумма трех координат цветности всегда равна единице.

Координаты цветов монохроматических излучений одинаковой мощности в любой цветовой координатной системе называются ординатами кривых сложения (удельными координатами), а совокупность этих координат определяет три функции сложения цветов. Функции сложения взаимосвязаны с функциями спектральной чувствительности рецепторов (колбочек) в сетчатке глаза человека.

Цвет несамосветящихся объектов зависит от условий освещения, и одинакового цвета объекты, например, при освещении лампой накаливания могут оказаться разноцветными на дневном свете. Поэтому для однозначного толкования результатов цветовых измерений в колориметрии пользуются стандартизованными по спектральному распределению излучения источниками. Международная комиссия по освещению (МКО) рекомендует стандартные излучения А, В, С и D₆₅. Источник света А по спектральному распределению излучения соответствует излучению черного тела при термодинамической температуре 2856 К. Источник света В имитирует прямое солнечное излучение с коррелированной цветовой температурой около 4870 К. Источник света С имитирует дневной свет с коррелированной цветовой температурой около 6770 К. Источник света D₆₅ уточненно имитирует среднюю фазу дневного света с коррелированной цветовой температурой 6500 К. Источник А рекомендуется реализовать газонаполненной лампой накаливания с вольфрамовой нитью, источники В и С – так же, как А со специальными светофильтрами. Принятых рекомендаций по реализации источника D₆₅ пока нет.

МКО стандартизовано несколько шкал измерений цвета – колориметрических систем. В стандартной колориметрической системе МКО 1931 г. для полей зрения от 1° до 4° координаты цвета X, Y, Z определяются для источников света формулами:

$$X = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda;$$

для несамосветящихся объектов формулами:

$$X = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda.$$

Здесь: $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ – спектральная плотность потока излучения, $\rho(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения или спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$ для просвечивающих объектов, λ – длина волны, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – стандартизованные функции сложения цветов (см. рис. 7.7.1, ГОСТ 13088-67, публикация МКО №15). Координата Y в этой системе равна яркости наблюдаемого объекта, так как функция сложения $\bar{y}(\lambda)$ совпадает с функцией относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения $V(\lambda)$, основополагающей для световых измерений (см. ГОСТ 8.332-78).

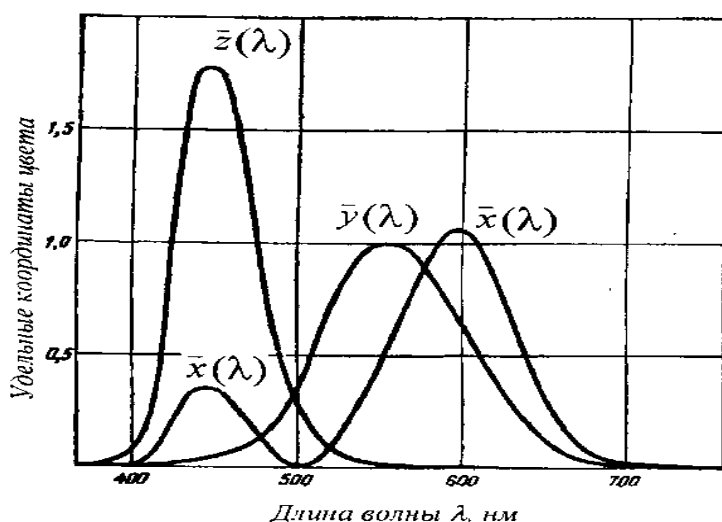


Рис. 7.7.1. Удельные координаты цвета $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ монохроматических стимулов постоянной мощности, рекомендованные МКО (1931г.)

Координаты цветности определяются по формулам:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}.$$

Заметим, что бессмысленно придавать координатам цветности какой-либо количественный смысл, так как они указывают только положение точки на модельном цветовом треугольнике.

Координаты цвета и цветности измеряются с помощью трехканальных колориметров, спектрофотометров и спектрорадиометров. Метрологическое обеспечение колориметрии опирается на государственный эталон координат цвета и координат цветности, который построен на основе спектроколориметра и набора эталонных прозрачных мер цвета.

Существует также дополнительная стандартная колориметрическая система МКО 1964 г. для полей зрения с угловыми размерами более 4°, в которой координаты цвета обозначаются X_{10}, Y_{10}, Z_{10} , а стандартизованные функции сложения цветов, полученные для поля зрения в 10°, – $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ и координаты цветности x_{10}, y_{10}, z_{10} . Эта система рекомендуется для использования в случаях, когда желательна более точная корреляция с визуальным уравниванием по цвету полей с большими угловыми размерами.

Иногда используется более наглядная (по восприятию) колориметрическая система λ_d, p_c, L , основанная на представлении цвета как смеси монохроматического излучения со стандартным

ахроматическим. Здесь λ_d – доминирующая длина волны – длина волны монохроматического излучения (с координатами цветности x_d, y_d), смешивание которого в определенных пропорциях со стандартным ахроматическим излучением (с координатами цветности x_a, y_a) дает рассматриваемый цвет (с координатами цветности x, y);

$$p_c = \frac{y_d(x - x_a)}{y(x_d - x_a)} = \frac{y_d(y - y_a)}{y(y_d - y_a)} - \text{колориметрическая чистота цвета, характеризующая долю}$$

монохроматического излучения в смеси с ахроматическим; L – яркость смеси.

Система XYZ МКО неудобна для оценки различий между цветами. Для этой цели необходима равноконтрастная трехмерная цветовая шкала. Строго равноконтрастную цветовую шкалу создать невозможно, однако имеются рекомендованные МКО приближенно равноконтрастные системы. Равноконтрастный цветовой график (u, v) МКО 1960 г. образован в прямоугольной системе координат u и v , где:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4X}{X + 15Y},$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z}.$$

На основе равноконтрастного цветового графика образовано равноконтрастное цветовое пространство МКО 1964 г. в прямоугольной системе координат U^*, V^*, W^* , определяемых соотношениями:

$$W^* = 25 Y^{1/3} - 17, \quad U^* = 13 W^* (u - u_0), \quad V^* = 13 W^* (v - v_0).$$

Здесь $1 \leq Y \leq 100$, u_0 и v_0 значения u и v для номинального ахроматического цвета.

В данной системе воспринимаемая разница ΔE между цветами U^*_1, V^*_1, W^*_1 и U^*_2, V^*_2, W^*_2 определяется соотношением:

$$\Delta E = [(U^*_1 - U^*_2)^2 + (V^*_1 - V^*_2)^2 + (W^*_1 - W^*_2)^2]^{1/2}.$$

Имеются также рекомендации МКО по использованию других модифицированных равноконтрастных цветовых пространств L^*, u^*, v^* и L^*, a^*, b^* .

Колориметрические характеристики непрозрачных образцов МКО рекомендует приводить при одном из следующих условий освещения и наблюдения:

45/0 – образец освещается пучком лучей света в пределах углов падения $45^\circ \pm 5^\circ$, наблюдение выполняется в пределах углов отражения 10° при угловых размерах обоих пучков не более 10° ;

0/45 – инверсия предыдущего случая по освещающему и наблюдаемому пучкам;

дифф/0 – образец освещается диффузно с помощью интегрирующей сферы, а наблюдение осуществляется по нормали с допустимым отклонением оси пучка 10° при угловом размере его не более 10° ;

0/дифф – инверсия предыдущего случая по освещению и наблюдению.

Источники света обычно характеризуются координатами цветности x и y . Однако существуют несколько приближенных одномерных шкал оценки цвета источников света, основанных на сравнении с излучением черного тела при различных температурах. Температура распределения T_p определяется как температура черного тела, при которой ординаты кривой спектрального распределения его энергетической яркости в видимой области спектра пропорциональны (в пределах допуска) соответствующим ординатам кривой спектрального распределения рассматриваемого излучения. Цветовая температура $T_{цв}$ определяется как температура черного тела, при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение. Коррелированная цветовая температура $T_{цв.к}$ – цветовая температура, полученная путем определения на равноконтрастном цветовом графике точки на линии черного тела, ближайшей к точке, представляющей собой цветность рассматриваемого источника света. Эти шкалы условных температур образованы оговоренными в определениях отображениями на шкалу термодинамических температур. Значения $T_p, T_{цв}, T_{цв.к}$ выражаются в кельвинах, но тем не менее их шкалы являются всего лишь шкалами порядка, а не отношений.

Кроме того, МКО рекомендованы одномерные шкалы общего R_a и специальных (частных) R_i индексов цветопередачи, характеризующие влияние спектрального состава излучения источника света на зрительное восприятие цветных объектов, сознательно или бессознательно сравниваемое с восприятием тех же объектов, освещенных стандартным источником. Эти шкалы опираются на 14 контрольных образцов с фиксированными функциями спектральных коэффициентов яркости.

С библейских времен существуют шкалы цветов, основанные на обозначениях их системами названий или других символов (сочетаний букв и цифр). Чаще всего исходными для образования таких шкал наименований являются семь цветов радуги (красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый) и пурпурный цвет. Комбинации этих и других названий составляют сотни и даже тысячи наименований цветов (человек может различать до 10 миллионов цветов). В таких шкалах цветовое пространство делится на ряд блоков, которые обозначаются в соответствии с общепринятой цветовой терминологией или комбинациями символов (кодом). Так, например, в системе Евроколор код цвета составляет семизначное число (первые три цифры соответствуют цветовому тону, четвертая и пятая – светлоте, шестая и седьмая – насыщенности цвета). В известной системе Манселла код цвета составляется из буквенных символов и цифр. К сожалению, общепринятой на мировом уровне системы названий и символических обозначений цветов пока нет.

Такие символические шкалы наименований цветов воспроизводятся в виде атласов цветов, состоящих из необходимого числа стандартизованных цветных образцов. Разработанный в нашей стране (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева) "Атлас стандартных образцов цвета" предназначен для метрологического обеспечения различных атласов отраслевого назначения. Специализированный для полиграфии атлас цветов содержит 1358 материальных образцов цвета. Кроме того, существует множество специальных цветовых шкал, более низкого уровня общезначимости, примеры которых перечислены в таблице 7.7.1.

Таблица 7.7.1

Назначение шкалы	Нормативный документ
Шкала цвета светлых нефтепродуктов	ГОСТ 2667-82
Шкала цвета нефтепродуктов (смазочных масел, печных и дизельных топлив, парафинов и др.)	ГОСТ 20284-74 СТ ИСО 2049-72
Йодная, бихроматная, платиново-кобальтовая, медь-железо-кобальт-бихроматная шкалы цвета жидких химических реактивов, растворов и продуктов	ГОСТ 14871-76 СТ ИСО 2211-73 ГОСТ 29131-91 ГОСТ 26743.1-91 ГОСТ Р 50568.4-93
Платиново-кобальтовая шкала цвета жидких смол и пластификаторов и их растворов со слабой окраской	ГОСТ 18522-93
Шкала цветности питьевой воды	ГОСТ 3351-74
Шкала цвета воды для контроля природной среды	ГОСТ 4266-79
Йодная и кобальт-хромпиковая шкалы цвета пива	ГОСТ 12789-87
Йодометрическая шкала цвета лакокрасочных материалов (непигментированных лаков, растворов смол, олиф, масел, растворителей и др.)	ГОСТ 19266-79
Шкала цветности растительных масел	ГОСТ 5477-93

Колориметрия применяется для определения:

- цветовых характеристик источников света (ГОСТ 23198-94); цветоустойчивости под воздействием света строительных отделочных полимерных материалов и равномерности окраски ими (ГОСТ 11583-74); цвета и интенсивности печатных красок (ГОСТ 6593-83); цвета неорганических пигментов и наполнителей (ГОСТ 16873-92); устойчивости окрасок текстильных материалов к физико-химическим воздействиям (ГОСТ 9733.0-83 – 9733.27-83); разнооттеночности окрашенных в массу лавсановых волокон и жгутов (ГОСТ 19673-74); неравномерности окрашивания синтетических нитей (ГОСТ 22092-76); цветности расплава технического фталевого ангидрида (ГОСТ 24445.5-80);

- цвета ароматических углеводородов бензольного ряда (ГОСТ 2706.1-74); окраски серной кислоты (ГОСТ 2706.3-74); разнооттеночности текстильных материалов (ГОСТ 18055-72); цветности питьевой воды (ГОСТ 3351-74); цветности сахара – песка и рафинада (ГОСТ 12572-93); цвета консервированных тоματοпродуктов (ГОСТ 8756.8-85); цвета и цветности растительных масел (ГОСТ 5472-50 и ГОСТ 5477-93); цвета жмыхов, шротов и горчичного порошка (ГОСТ 13979.4-68);

- цветности сигнальных светофильтров для транспорта (ГОСТ 9242-59); цветности и неравномерности цветности свечения экранов кинескопов для телевидения (ГОСТ 21059.5-76); красящей способности неорганических пигментов (ГОСТ 16872-78); устойчивости окрасок органическими пигментами и красителями к воздействию света на бумагу и обои (ГОСТ 8702-88); неравномерности окрашивания искусственных нитей (ГОСТ 10088-90); неровности окрашивания нитронового волокна (ГОСТ 19536-74);

– цвета зерна (ГОСТ 10967-90); соответствия цвета пленки покровной краски цвету основной окраски хромовых кож (ГОСТ 938.32-80); светостойкости окраски меховой шкурки и выделанной шубной овчины (ГОСТ 9211-75); устойчивости окраски трикотажных изделий и полотна (ГОСТ 2351-88); устойчивости окраски текстильно-галантерейных изделий (ГОСТ 23627-89); устойчивости окраски хлопчатобумажных и смешанных тканей и штучных изделий (ГОСТ 7913-76); устойчивости окраски льняных и полульняных тканей и штучных изделий (ГОСТ 7780-78); устойчивости окраски тканей и изделий чистошерстяных и полушерстяных (ГОСТ 2846-82, ГОСТ 11151-77 и ГОСТ 13527-78); устойчивости окраски шелковых и полушерстяных тканей и изделий (ГОСТ 7779-75), тканей и изделий из химических волокон (ГОСТ 23433-79).

Цветовые измерения также широко применяются в световой и цветовой сигнализации, в частности на транспорте, в регулировании движения на дорогах, в навигации. На соответствующие методы цветовых измерений существует значительное число национальных и международных стандартов.

Шкалы белизны.

Белизна рассеивающих поверхностей материалов характеризует сходство их по цвету с некоторым стандартным белым цветом или предпочтительным белым цветом, белизна которого обычно принимается за 100 %. Единой для различных видов материалов и изделий шкалы белизны пока не создано, но во всех вариантах применяемых шкал белизны отклонение исследуемого цвета от стандартного белого определяется одномерными критериями, например, цветовым различием (см. шкалы цвета). Шкалы белизны являются одномерными шкалами порядка. Белизна бумаги, картона, целлюлозы, текстильных материалов оценивается по коэффициенту отражения в синей области спектра ($\lambda = 457$ нм).

Конкретные способы определения (шкалы) белизны изложены в следующих стандартах.

Таблица 7.7.2

Обозначение	Наименование стандарта
ГОСТ 7690-76	Целлюлоза, бумага и картон. Методы определения белизны
ГОСТ 15821-70	Материалы белые нелюминесцирующие. Метод измерения показателя белизны и разнотеночности
ГОСТ 18054-72	Материалы текстильные. Метод определения белизны
ГОСТ 22165-76	Рис и продукты его переработки. Метод определения белизны
ГОСТ 26361-84	Мука. Метод определения белизны
ГОСТ 22496-77	Волокна и нити синтетические. Метод определения белизны
ГОСТ 24024.4-80	Фосфор и неорганические соединения фосфора. Метод определения степени белизны
ГОСТ 16873-92	Пигменты и наполнители неорганические. Методы измерения цвета и белизны

Действует стандарт ИСО 2470-1999, устанавливающий методы измерения белизны бумаги, древесины и пульпы.

Метрологическое обеспечение измерений белизны в России опирается на государственные эталоны координат цвета и координат цветности и спектрального коэффициента отражения.

Сенситометрические шкалы.

Шкалы чисел светочувствительности S фотографических материалов образуются по формуле $S = k / H_{кр}$, где k – некоторое постоянное число; $H_{кр}$ – световая или энергетическая экспозиция H от источника со стандартным спектральным распределением излучения, соответствующая определенной точке характеристической кривой – критерию чувствительности $D_{кр}$. Характеристическая кривая фотоматериала – зависимость между оптической плотностью D фотографического почернения, возникающего после проявления в стандартных условиях, и $\lg H$.

Общая светочувствительность фотографических материалов на прозрачной подложке по ГОСТ оценивается по критерию $D_{кр} = 0,1$ выше плотности D_0 фотографической вуали: $S_{станд.} = 0,8 / H_{D_{кр} = 0,1 + D_0}$. Шкала чисел общей светочувствительности по стандарту совпадает с американской шкалой АСА и международной, рекомендованной ИСО. В немецкой системе стандартов DIN $S_{DIN} = 10 \lg (1/H_{D_{кр} = 0,1 + D_0})$.

Кривые спектральной чувствительности фотоматериалов определяются как

$S(\lambda) = 1/H(\lambda)_{\text{Дкр}} = 1,0 + D_0$, где $H(\lambda)$ – энергетическая экспозиция квазимонохроматического излучения с длиной волны λ , выраженная в мДж на квадратный метр. Шкалы чисел светочувствительности являются шкалами порядка.

Шкалы показателя преломления.

Показатель преломления среды n – это отношение скорости электромагнитного излучения (света) в вакууме к фазовой скорости излучения в данной среде или отношения синусов угла падения i и угла преломления φ луча света на границе раздела вакуума и среды: $n = \sin i / \sin \varphi$. В общем случае $n(\lambda)$ зависит от длины волны λ распространяющегося в среде излучения и определяется соотношением $n(\lambda) = \sqrt{\varepsilon(\lambda) \cdot \mu(\lambda)}$, где $\varepsilon(\lambda)$ – диэлектрическая проницаемость, $\mu(\lambda)$ – магнитная проницаемость среды.

Абсолютную неограниченную шкалу показателя преломления n воспроизводит государственный эталон, работающий по принципу самокалибрующегося интерференционного рефрактометра.

Передача шкалы (размера единицы) показателя преломления рабочим средствам измерений осуществляется с использованием рабочих эталонов различных разрядов: гониометров – рефрактометров, образцовых дифференциальных рефрактометров, мер показателя преломления (рефрактометрических призм и пластин), мер разности показателей преломления (рефрактометрических клиньев), рефрактометров. Имеется три группы рабочих средств измерений показателя преломления (рефрактометры типа Пульфриха, Аббе; фотоэлектрические рефрактометры; гониометры для измерения показателя преломления). Средства измерений разности показателей преломления рассчитаны на диапазон разностей $n \cdot 6 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-1}$.

Рефрактометрия (измерение показателя преломления) широко применяется в химической, пищевой, биологической промышленности, в медицине, фармакологии, геологии, аэродинамике и т. д. (для определения строения органических соединений, для контроля чистоты и идентификации веществ, для определения концентрации компонент в системах, для анализа различных сортов бензинов, для анализа непрерывно меняющихся процессов проточными рефрактометрами и др.).

Кроме показателя преломления (абсолютного) n , пользуются относительным показателем преломления – равным отношению n_1 и n_2 двух сред $n_{21} = n_2 / n_1$, а в металлооптике комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n(1 + i\chi)$, где дополнительный член при мнимой единице $\chi = \kappa\lambda / 4\pi$ характеризует поглощение (κ – показатель поглощения, λ – длина волны). Таким образом, \tilde{n} описывается двумерной абсолютной шкалой.

В видимой области спектра для большинства известных сред значения n находятся в диапазоне от 1 до 3 (1,0003 – воздух, 1,33 – вода, 1,36 – этиловый спирт, 1,9 – сероводород, $1,4 \div 1,9$ – стекло, 2,4 алмаз). Для сред, обладающих оптической анизотропией (кристаллы и др.), n зависит от направления распространения излучения и состояния его поляризации, так как диэлектрическая проницаемость анизотропных сред описывается тензором – девятимерной величиной (шкалой).

Шкалы коэффициентов пропускания и отражения.

Коэффициент пропускания – величина, определяемая отношением прошедшего потока излучения к падающему потоку излучения. Коэффициент отражения – величина, определяемая отношением отраженного потока излучения к падающему потоку излучения. Из этих определений понятно, что коэффициенты пропускания и отражения являются безразмерными величинами, описываемыми абсолютными шкалами с диапазонами значений от 0 до 1.

При всей простоте приведенных определений этих коэффициентов существует большое число их специализированных модификаций и соответствующее множество разных шкал их измерений. Модифицирующими факторами являются: геометрические параметры падающих, пропущенных и отраженных объектами пучков оптического излучения; оценка потоков излучения световыми величинами (см. в начале этого параграфа); монохроматичность или спектральный состав излучения. Поэтому различают: спектральные, световые и общие коэффициенты пропускания и отражения; коэффициенты направленного, направленно-диффузного, диффузно-диффузного и др. пропускания; коэффициенты зеркального и диффузного отражения и др.

Величину, обратную коэффициенту пропускания или отражения, называют коэффициентом ослабления, а десятичный логарифм коэффициента ослабления называют оптической плотностью. Коэффициенту ослабления соответствует неограниченная абсолютная шкала (см. 3.6). Метрологическое обеспечение средств измерений ослабления в волоконных световодах осуществляется в соответствии с МИ 1687-87.

Шкалы блеска.

Блеск – это способность поверхности направленно отражать падающие на неё лучи света. Блеск определяется отношением интенсивностей света, отраженного от данной поверхности и от поверхности исходной меры – плоской полированной пластины из черного стекла с показателем преломления $n = 1,567$ ($\lambda = 589,3$ нм). Причем такой мере приписывается 100 единиц блеска при любой геометрии освещения и наблюдения. По определению, различные шкалы измерений блеска являются специализированными абсолютными ограниченными шкалами при трех регламентированных углах измерения (освещения и наблюдения):

20°/20° – для высокоглянцевых поверхностей, у которых блеск более 70 единиц при углах измерения 60°;

60°/60° – для поверхностей с любым значением блеска, но предпочтительно для глянцевых и полуглянцевых поверхностей;

85°/85° – для полуматовых и матовых поверхностей, у которых блеск менее 30 единиц при углах измерения 60°.

Допуски на углы составляют: 20° \pm 0,5°; 60° \pm 0,2°; 85° \pm 0,1°;

регламентированы также угловые размеры (с допусками) апертур отраженных пучков лучей, подлежащих регистрации.

В ГОСТ 896-69 шкала блеска в отличие от международных рекомендаций была установлена для углов измерения 45°/45°, а исходной мере (темному увиолевому стеклу) приписано 65 единиц блеска. В новых разработках не рекомендуется пользоваться этим определением шкалы блеска.

Эти шкалы распространяются на пигментированные лакокрасочные материалы, а также пригодны для измерения блеска пластмасс и других неметаллических поверхностей. Метрологическое обеспечение измерений блеска опирается на УВТ для воспроизведения шкал блеска лакокрасочных и других неметаллических поверхностей от 2 до 100 единиц при углах измерения 20°/20°, 45°/45°, 60°/60° и 85°/85°. Исходной мерой блеска в установке является стеклянная клиновидная призма с показателем преломления $n=1,567$, измеренным с погрешностью не более 10⁻⁴. Клиновидность меры позволяет исключить мешающее отраженное от второй плоскости пластины излучение. В установке используется гониометр, на алидаде которого смонтировано фотоприемное устройство, имеющее спектральную чувствительность, соответствующую функции $V(\lambda)$ – спектральной световой эффективности монохроматического излучения (см. шкалы световых величин). В осветителе установки используется источник типа А (см. шкалы цвета).

Существует также шкала лоска бумаги (ГОСТ 12921-80).

7.8. Акустические шкалы

Механические колебательные процессы, проявляющиеся в газовых средах как акустические звуки, в жидких средах как гидроакустические сигналы, в твердых средах как упругие волны характеризуются многими параметрами, измеряемыми в шкалах: частот (Гц), давлений (Па), мощности (Вт), скорости распространения (м/с), интенсивности (Вт/м²), амплитуды колебаний (м), колебательных скоростей (м/с), ускорений (м/с²) и т.д. Некоторые параметры этих процессов принято измерять в логарифмических шкалах с фиксированным нулем (в дБ), используя общепринятые для них опорные значения.

Звук (акустические колебания) как физическое явление, характеризующееся определенными параметрами – интенсивностью, частотой, спектром частот и т.д., воздействуя на слуховые органы человека, вызывает психофизиологические слуховые ощущения. Физическим параметрам и характеристикам звука или их сочетаниям соответствуют характерные ощущения, такие как громкость, высота тона, тембр и др., которые называются параметрами ощущения. Диапазон воспринимаемых слухом человека звуков по звуковому давлению составляет, примерно, от $2 \cdot 10^{-5}$ Па (порог слышимости) до 200 Па (болевого порог), в частотном диапазоне приблизительно от 20 Гц до 20 кГц. Слух человека подчиняется фундаментальному психофизиологическому закону Вебера-Фехнера, согласно которому уровень ощущения от воспринимаемых звуков пропорционален логарифму величины, характеризующей раздражение (стимул). Экспериментальными и теоретическими исследованиями психофизиологических свойств слуха, выполненными различными исследователями на протяжении многих десятилетий, установлен ряд количественных соотношений между физическими параметрами и характеристиками звуков (стимулов) и параметрами ощущения их человеком. Эти соотношения выражены эмпирическими формулами и специальными акустическими (биофизическими) шкалами измерений.

Отметим, что эти шкалы установлены для отологически нормального лица в возрасте от 18 до 25 лет. Естественно, что для других возрастных групп, а также для лиц, обладающих некоторыми отклонениями слуха от нормы, эти шкалы носят приближенный характер.

Шкалы частотных интервалов в акустике.

Равномерная, практически неограниченная шкала частот (шкала отношений с единицей измерений Гц) колебательных процессов в ряде прикладных дисциплин, в том числе в акустике, музыке, и др., подразделяется на участки — интервалы, последовательности которых образуют, как правило, логарифмические шкалы частотных интервалов. В общем случае единицы измерений (протяженность интервалов по шкале частот) в таких логарифмических шкалах определяются соотношением: $B = \log_a(f_e/f_n) = 1$, где f_n и f_e , соответственно нижняя и верхняя граничные частоты интервала при основании логарифма равном a . При основании логарифма $a = 10$ единица измерений в логарифмической шкале интервалов называется **декадой** — частотный интервал, для которого десятичный логарифм отношения граничных частот равен единице, т.е. $1 \text{ дек} = \lg(f_e/f_n)$ при $f_e = 10f_n$. Декада как единица измерений частотного интервала допущена к применению наравне с единицами SI.

Ранее в акустике применялась устаревшая ныне единица логарифмической шкалы интервалов и высоты тона — **савар** — интервал, десятичный логарифм отношения граничных частот которого равен 0,001, т.е. савар составляет тысячную долю декады.

В акустике и музыке в качестве основной единицы измерений частотного интервала в логарифмической шкале частот принята октава — интервал между двумя частотами, логарифм отношения которых при основании 2 равен единице, что соответствует соотношению $f_e : f_n = 2$. Октавный интервал частот известен человечеству с древних времен, как наименьшая разница по высоте между двумя тонами (частотами), при которых они воспринимаются человеком как схожие на слух; при одновременном их звучании они сливаются. Октава как единица частотного интервала допущена к применению наравне с единицами SI.

В акустических измерениях при нормировании и анализе различных акустических шумов, в том числе с целью охраны здоровья, и во многих других случаях обычно используют октавные и третьоктавные шкалы частотных интервалов, средние геометрические частоты $f_{cp} = (f_n \cdot f_e)^{1/2}$ которых, соответствовали ряду предпочтительных частот, рекомендованных большинством международных стандартов и установленных ГОСТ 12090-80. Практически эти шкалы реализуются наборами октавных и третьоктавных полосовых фильтров по ГОСТ 17168-82. Они удобны тем, что относительный размер интервалов, равный $(f_e - f_n) : (f_n \cdot f_e)^{1/2}$, постоянен по всей шкале частот. Реже, в специальных случаях, применяют частотные интервалы в половину, одну шестую и другие доли октавы.

Октава является основным интервалом, определяющим периодичность музыкального строя, который в диапазоне от 16 до 8000 Гц содержит 9 октав, образующих музыкальную октавную шкалу порядка: субконтроктава, контроктава, большая октава, малая октава, первая октава, вторая октава, третья октава, четвертая октава, пятая октава. Традиционные музыкальные инструменты в отдельности не охватывают всю музыкальную октавную шкалу, это возможно только для электронных или совокупности обычных инструментов, например, большому симфоническому оркестру. Так, клавиатура современного рояля содержит только 7 полных и 2 неполных октавных интервала (субконтроктава и пятая октава рояля содержат соответственно только 3 и 1 звук). Привязка музыкальной октавной шкалы к равномерной шкале частот осуществляется совмещением звука "ЛЯ" первой октавы с частотой 440 Гц (ОСТ ВКС 7710). В музыке октавный интервал подразделяется на ряд меньших интервалов, соответствующих закономерностям восприятия человеком музыкальных тонов внутри октавы. В темперированной (хроматической) гамме, представляющей собой точную логарифмическую шкалу, октава делится на 12 интервалов — полутонов, граничные частоты которых соответствуют семи основным и пяти альтернативным звукам, обозначаемым нотами Ля, Ля[#] (Си^b), Си, До, До[#] (Ре^b), Ре, Ре[#] (Ми^b), Ми, Фа, Фа[#] (Соль^b), Соль, Соль[#] (Ля^b), образующим логарифмическую шкалу музыкальной гаммы (звуковую систему). Наряду с достаточно большими 1/2, 1/3, 1/6 долями октавы для практических музыкальных и измерительных целей применяют также две другие дольные единицы октавы: миллиоктавы (мокт), т.е. интервалы, соответствующие в логарифмическом масштабе тысячной доле октавы, и центы (сотки) при делении октавы на 1200 интервалов. Отношение граничных частот миллиоктавного интервала составляет 1,0006933:1, а для интервала один цент — 1,0005777:1. Использование для музыкальных целей интервалов в центах дает опорные деления октавы несколько точнее, чем интервалы в миллиоктавах, и удобнее тем, что на каждый интервал шкалы музыкальной гаммы

приходится по 100 центов. Шкала музыкальных интервалов музыкальной темперированной гаммы приведена в таблице 7.8.1.

Шкала музыкальных интервалов

Таблица 7.8.1

Шкалы музыкальных интервалов темперированной музыкальной гаммы	Количество полутонов в интервале	Соотношение граничных частот
Унисон	0	1:1
Полутон	1	1,059463:1
Целый тон	2	1,122462:1
Малая терция	3	1,189207:1
Большая терция	4	1,259921:1
Кварта	5	1,334840:1
Уменьшенная квинта	6	1,414214:1
Чистая квинта	7	1,498307:1
Малая секста	8	1,587401:1
Большая секста	9	1,681793:1
Малая септима	10	1,781797:1
Большая септима	11	1,887749:1
Октава	12	2:1

Система логарифмических шкал частотных интервалов, используемых в музыкальной акустике, в пределах одной октавы приведена на рис. 7.8.1. где для простоты все музыкальные интервалы показаны от звука "ЛЯ", хотя практически каждый из них может начинаться от любой ноты.

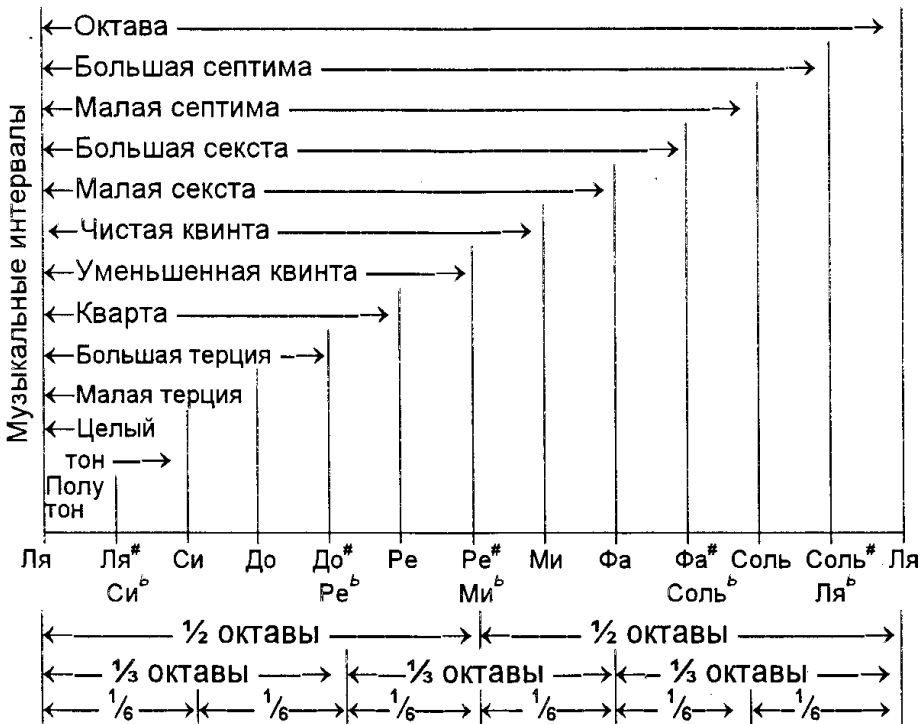


Рис. 7.8.1. Шкалы частотных интервалов в музыке

Численные соотношения между основными логарифмическими единицами частотных интервалов приведены в таблице 7.8.2.

Использование логарифмических шкал частотных интервалов, содержащих сравнительно небольшое число ступеней, вместо равномерной шкалы частот более удобно и позволяет наглядно представить результаты измерений акустических величин, стандартизовать производство и настройку музыкальных инструментов. Весь слышимый диапазон частот (от 20 Гц до 20 кГц) укладывается в 10 октавных или 33 третьоктавных интервала, тогда как в равномерной шкале час-

тот крайние частоты этого диапазона различаются в 1000 раз, а с учетом инфразвуковой и ультразвуковой областей акустического спектра частот – в десятки и сотни тысяч раз.

Соотношения между единицами измерения интервалов Таблица 7.8.2

Единицы интервалов	декада	октава	полу-тон	савар	мокт	цент
декада	1	3,32	39,84	1000	3320	3984
октава	0,301	1	12	301	1000	1200
полутон	0,0251	0,083	1	25,08	100	83,83
савар	0.001	0,00332	0,03984	1	3,320	3,984
милиоктава	0,0003	0,0001	0.012	0,301	1	1,3
цент	0,00025	0,00083	0,01	0,25	0,83	1

Шкалы высоты звука (тона).

Субъективно ощущаемое слухом качество звука, наиболее близко ассоциирующееся с частотой звуковых колебаний и позволяющее расположить звуки на шкале, идущей от "низкого" к "высокому", называется высотой звука. Ощущение высоты звука в определенной мере зависит от интенсивности и состава сложных звуков, но частота в любом случае является основным физическим раздражающим фактором (стимулом), вызывающим у человека субъективное ощущение определенной высоты звука. В музыке, физической акустике, психоакустике используются различные шкалы высоты звука. Ориентировочные соотношения между часто практически используемыми шкалами высоты тона и шкалой частот как параметра раздражения можно видеть на рис. 7.8.2

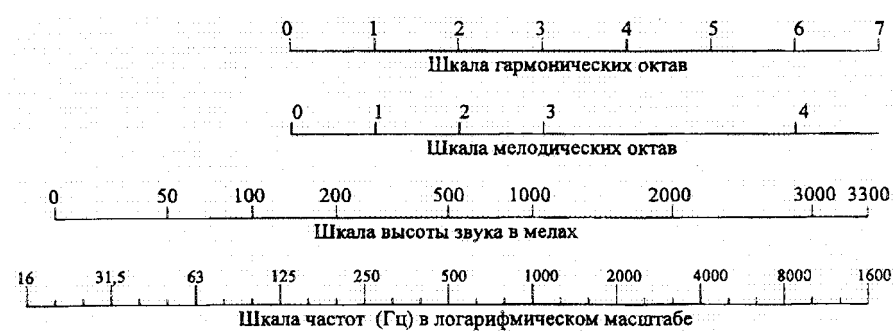


Рис. 7.8.2. Шкалы высоты звуков

В музыке высота того или иного звука определяется или указанием его расположения в шкалах частотных интервалов (музыкальной октавной шкале и шкале музыкальной гаммы, например, "звук До первой октавы") или в шкале гармонической высоты тона. В основу шкалы гармонической высоты тона положена музыкальная октавная шкала. За нулевое значение высоты тона в этой шкале принят звук с частотой 131 Гц (звук До большой октавы). При каждом увеличении частоты на одну октаву (начиная от 131 Гц) высота звука возрастает также на одну гармоническую октаву (одну единицу гармонической высоты тона). Высота N_z звука произвольной частоты в гармонических октавах в этой шкале определяется формулой

$$N_z = \frac{1}{0,301} \lg \frac{f}{131}.$$

Так, например, стандартный тон частотой 440 Гц, используемый для настройки музыкальных инструментов, в шкале гармонической высоты тона имеет высоту 1,75 гармонической октавы. Гармоническая высота тона, математически – логарифм частоты, является объективной характеристикой звука, т.е. параметром стимула (раздражения) и не соответствует, в частности, на верхних частотах слышимого диапазона субъективному восприятию высоты звуков. Статистической обработкой большого числа данных о психофизиологическом восприятии высоты звуков установлено, что на частотах примерно до 1000 Гц ощущение удвоения высоты звука соответствует уд-

воению его частоты, т.е. октавному интервалу. На более высоких частотах при ощущении увеличения высоты звука в два раза соответствующий частотный интервал становится существенно больше октавы.

Для приближенного построения пропорциональной шкалы отношений высоты тона, соответствующей восприятию высоты тона слухом, в качестве условной единицы измерений как параметра ощущения принята единица – **мел**. По определению мела высота звука с частотой 1000 Гц при уровне громкости 40 фон равна 1000 мел, а звук с частотой 20 Гц при том же уровне громкости имеет высоту 0 мел. В области от 50 до 1000 Гц численное значение высоты тона в мелах близко к численному значению частоты в герцах. При частотах звуков выше 1000 Гц такого совпадения нет. Здесь нарастание ощущения высоты звука существенно отстает от роста его частоты.

По аналогии с октавной шкалой гармонической высоты тона построена шкала мелодической высоты тона в мелодических октавах, соответствующая субъективному восприятию эффекта удвоения высоты звука. За нулевое значение этой шкалы также принят звук с частотой 131 Гц, имеющий высоту тона 131 мел. Высота N_m звука в мелодических октавах, имеющего произвольную высоту z мел, определяется по аналогичной формуле

$$N_m = \frac{1}{0,301} \lg \frac{z}{131}.$$

Шкала уровней громкости и шкала громкости.

Интенсивности звука по восприятию соответствует ощущение громкости. Громкость – величина, количественно характеризующая слуховое ощущение воспринимаемого человеком звука. Частотно-амплитудная характеристика слуховой (акустической) чувствительности человека нелинейна: при неизменной частоте ощущение громкости чистого тона (синусоидального сигнала) растет не пропорционально интенсивности звука (звукового давления). В то же время звуки разной частоты, но одинаковой интенсивности могут восприниматься как звуки разной громкости. Сравнением на слух громкости звуков произвольной частоты и интенсивности с громкостью звука чистого тона частотой 1000 Гц, имеющего известный уровень интенсивности (в децибелах относительно среднеквадратического значения звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па, соответствующего порогу слуха на частоте 1000 Гц), получено семейство кривых (рис. 7.8.3), для каждой из которых уровень интенсивности звука сравнения (тона 1000 Гц) остается неизменным, т.е. является параметром кривой.

Звуки разной частоты и уровня, соответствующие какой-либо кривой, на слух воспринимаются как равногромкие. Это семейство кривых, называемых нормальными кривыми равной громкости, образует своеобразную двухмерную шкалу уровней громкости, логарифмической единице измерений, в которой присвоено наименование "фон". Отсюда второе название этих кривых – **изофоны**. Число фонов, обозначающих уровень громкости какого-либо звука заданной частоты, по определению равно числу децибел равногромкого с ним звука чистого тона частотой 1000 Гц.

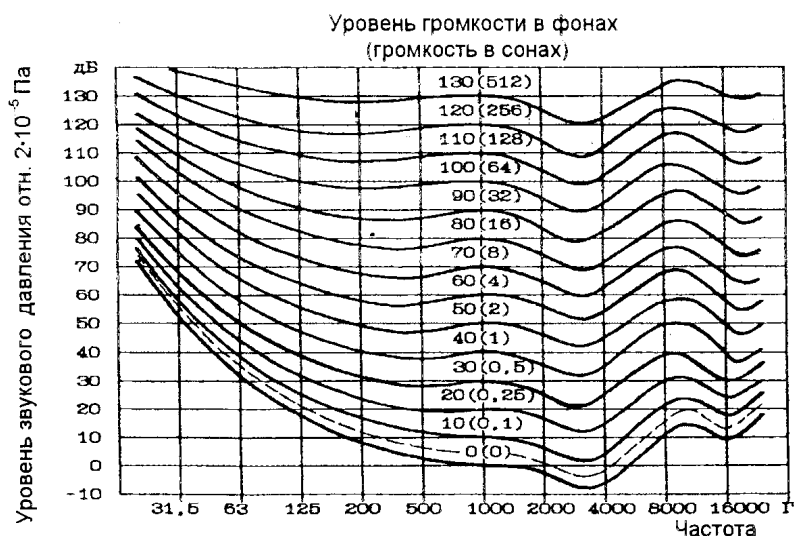


Рис. 7.8.3 Нормальные кривые равной громкости

Эта шкала позволяет определить уровень громкости в фонах любого синусоидального звука, если известны уровень его звукового давления в дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па и частота. Так, например, звук частотой 125 Гц имеет уровень звукового давления 55 дБ. На рис.7.8.3 точка, соответствующая частоте 125 Гц и уровню звукового давления 55 дБ, находится на одной из изофон, перемещаясь по которой к частоте 1000 Гц, находим, что равногромкий звук с частотой 1000 Гц должен иметь уровень звукового давления 50 дБ. Это и есть искомый уровень громкости L , равный 50 фонам. Шкалу уровней громкости приходится считать шкалой порядка, так как уровни громкости в фонах напрямую складывать нельзя и установить пропорциональность уровней громкости невозможно.

Существует более общая экспериментально установленная шкала измерений громкости, позволяющая находить общую громкость нескольких звуков разных частот или шумов. В этой шкале принята единица измерений - сон, равная громкости звука частотой 1000 Гц при уровне 40 дБ (40 фон). Эмпирическое соотношение между значениями L шкалы уровней громкости в фонах и значениями N шкалы громкости в сонах в пределах от 20 до 120 фон определяется зависимостью

$$N = 2^{0,1(L-40)}.$$

Приведенные на рис. 7.8.3 нормальные кривые равной громкости в фонах одновременно являются кривыми постоянной громкости в сонах и справедливы только для чистых тонов. Но через эмпирические алгоритмы (номограммы для сложения шумов в октавных или третьоктавных полосах), регламентированные на международном уровне, эти шкалы положены в основу методов измерений уровней громкости в фонах и громкости в сонах любых сложных звуков (акустических шумов).

У музыкантов исторически сложилась специальная шкала громкости исполнения (шкала порядка) в соответствии с замыслом автора музыки и его указаниями (обозначениями) в нотах:

ppp – пиано-пианиссимо (самое тихое),
pp – пианиссимо (очень тихое),
p – пиано (тихое),
mp – меццо-пиано (умеренно тихое),
mf – меццо-форте (умеренно громкое),
f – форте (громкое),
ff – фортиссимо (очень громкое),
fff – форте-фортиссимо (самое громкое).

Эта шкала, выработанная многовековым музыкальным опытом, свидетельствует о том, что человек способен в какой-то мере производить количественную оценку громкости звука.

Шкалы уровня звука.

При нормировании акустических шумов в целях охраны здоровья человека и ряде других случаев возникает необходимость их оценки одним числом. Простейшей физической характеристикой акустического шума является его полный (суммарный) уровень звукового давления (в дБ относительно среднеквадратического значения звукового давления $2 \cdot 10^{-5}$ Па). Но чувствительность слуха человека зависит как от частоты, так и от интенсивности звука. Поэтому для получения результатов измерений шума, в достаточной для практики мере соответствующих восприятию его человеком, средства измерений должны иметь частотно-амплитудные характеристики, близкие к характеристикам органа слуха. В современных средствах измерений акустических шумов стандартизованы четыре шкалы для измерений уровней звука, обозначаемые индексами А, В, С и D. Соответствующие этим шкалам относительные частотные характеристики средств измерений приведены на рис.7.8.4.

Результаты измерений акустического шума по шкале А соответствуют ощущению при восприятии человеком шумов малой громкости ориентировочно от 20 до 55 фон, по шкалам В – средней 55 – 85 фон и по шкале С – большой громкости 85 – 140 фон и называются уровнями звука А, В и С. Шкала D используется при оценке раздражающего действия на человека шума от пролетающего над ним самолета. Результаты измерений уровня звука по шкалам А, В, С и D обозначаются добавлением в скобках за единицей измерений – децибел – индекса шкалы: дБ(А), дБ(В), дБ(С), дБ(Д). Тем не менее на практике принято упрощено нормировать допустимые уровни акустических шумов в жилых и общественных помещениях, в промышленности и на транспорте независимо от их громкости в значениях уровней звука по шкале А, т.е. в дБ(А), что зафиксировано в ряде международных стандартов.

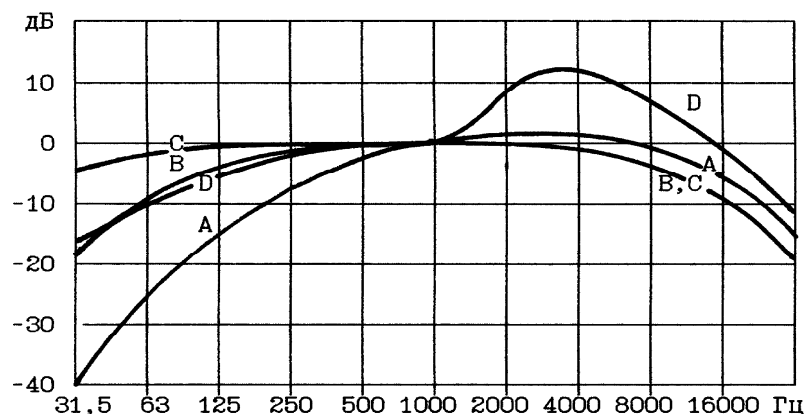


Рис.7.8.4 Относительные частотные характеристики, образующие шкалы A, B, C и D уровней звука

Если сравнить частотные характеристики A, B, C и D с нормальными кривыми равной громкости (рис.7.8.3) для чистых тонов, можно обнаружить некоторое сходство между последними и перевернутыми относительными частотными характеристиками A, B, C и D.

Шкалы измерений раздражающего действия шума.

Акустические шумы разного частотного состава неодинаково воспринимаются человеком. Одни шумы переносятся спокойно, другие неприятны для слуха и вызывают раздражающее действие. Проблема оценки степени раздражающего действия шума на человека возникла в связи с необходимостью нормирования шумов от самолетов в окрестностях аэропортов. По аналогии с измерениями громкости и уровня громкости степень раздражающего действия или неприятности шума оценивается по двум шкалам: шкале шумности и шкале уровней воспринимаемого шума.

В шкале шумности, являющейся приближенной аддитивной шкалой отношений, за единицу измерений принята единица – **ной**, аналогичная сону. Один ной равен шумности белого шума (шума с постоянной спектральной плотностью в шкале частот) в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц при суммарном уровне звукового давления 40 дБ. Результаты измерений шумности в ноях могут складываться, например, шум с воспринимаемой шумностью в 150 ной вдвое более шумный, чем шум в 75 ной. Два одновременно звучащих шума по 80 ной воспринимаются как один суммарный шум в 160 ной. Степень неприятности или раздражающего действия шума от одиночного самолета оценивается по шкале уровней воспринимаемого шума (общепринятое обозначение – PNL). Уровень воспринимаемого шума в дБ равен уровню звукового давления шума сравнения, который при заданных условиях прослушивания оценивается слушателем как одинаково неприятный с данным шумом. За шум сравнения принимают белый шум в октавной полосе со среднегеометрической частотой 1000 Гц, уровень звукового давления которого известен. Изменение уровня воспринимаемого шума PNL на 5 дБ эквивалентно увеличению шумности на 50 %, тоже на 10 дБ - на 100 %, на 20 дБ - на 300 % и т.д.

Сравнением раздражающего (неприятного) действия шума произвольной интенсивности и в произвольных октавных полосах с таким же действием шума сравнения известной интенсивности получено семейство кривых равной шумности (рис.7.8.5).

Расчет уровней воспринимаемого человеком шума PNL в дБ от пролетающего над ним самолета регламентирован стандартом ИСО. Для этого измеряют уровни звукового давления в третьоктавных полосах. Измеренные значения уровней в третьоктавах по кривым равной шумности или по специальным таблицам переводят в значения шумности n (в ноях) и вычисляют общую шумность N по формуле: $N = n_{\max} + 0,15(n_c - n_{\max})$ где n_{\max} – максимальное значение n (в ноях) шумности, полученное при измерениях в третьоктавных полосах; n_c – сумма значений n всех третьоктавных интервалов спектра. Далее, по номограмме, приведенной в правой части рис.7.8.5, находят уровень воспринимаемого шума PNL в дБ. Приближенное значение PNL можно определить шумомером с частотной коррекцией D. Подъем частотной характеристики D в области частот 3000 – 5000 Гц (рис.7.8.4) объясняется тем, что при равных условиях наибольшее раздражающее действие оказывают шумы самолета, содержащие составляющие в этом диапазоне частот. Шкала PNL малоприспособлена для характеристики шумовой обстановки в окрестностях аэропор-

тов при эксплуатации на них самолетов различных типов, поскольку она не учитывает ряд факторов, существенно влияющих на субъективную реакцию населения.

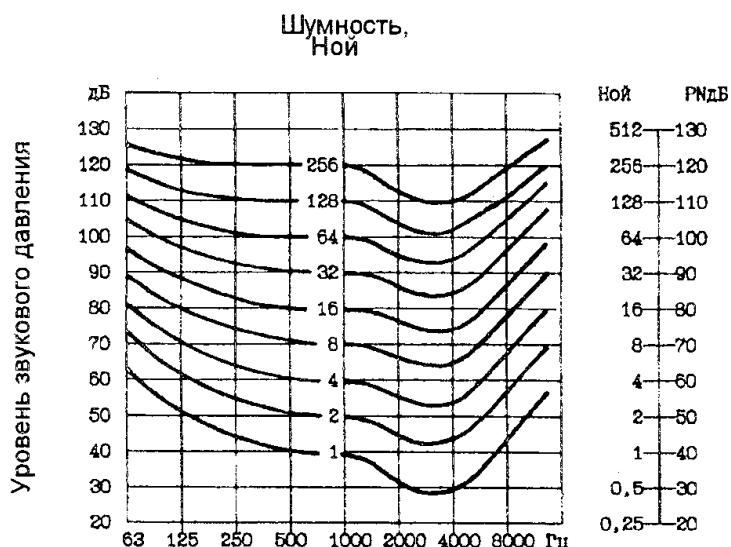


Рис. 7.8.5 Кривые равной неприятности.
Справа номограмма перевода $N_{ой}$ в PNL, дБ

Дальнейшим развитием шкалы измерений раздражающего действия шумов самолетов является шкала эффективного уровня воспринимаемого шума EPNL в дБ. В этой шкале учитывается не только частотный состав шума, но и такие факторы, как продолжительность воздействия шума и наличие дискретных составляющих в его спектре, увеличивающих раздражающее действие шумов самолетов.

Эффективный уровень воспринимаемого шума EPNL определяется через уровень воспринимаемого шума PNL по формуле: $EPNL = PNL + c + d$, где c – поправка, учитывающая дискретные составляющие в спектре шума, d – поправка на продолжительность воздействия шума. Расчет поправок c и d , а также процедура вычисления EPNL проводится по специальным методикам.

Аудиометрические шкалы.

Измерение остроты или степени потери слуха, т.е. отклонения порога слышимости конкретного индивидуума от среднестатистического нормального слушателя, в медицинской практике осуществляется с помощью прибора – аудиометра. Степень остроты или потери слуха на той или иной частоте определяют измерениями порога слышимости исследуемого индивидуума при подаче звукового сигнала непосредственно в ухо с помощью головного телефона (наушника), поэтому среднестатистический нормальный порог слышимости, установленный для чистых тонов стандартом ИСО, в этих условиях несколько отличается от порога в свободном звуковом поле. При аудиометрических измерениях потери слуха на каждой частоте (обычно на частотах октавного ряда в диапазоне от 125 до 8000 Гц) определяют отклонение (в дБ) от стандартизованного нормального порога, т.е. за нулевой уровень на каждой частоте принимают значения нормального порога слышимости, поэтому аудиометрическая шкала потери слуха по воздушной проводимости фактически имеет вид, показанный на рис.7.8.6.

Аудиометры обычно построены так, что при изменении частоты автоматически происходит коррекция (смещение) нуля шкалы измерений потери слуха на значения, соответствующие смещению нормального порога слуха на этой частоте от нулевого уровня $2 \cdot 10^{-5}$ Па.

Поскольку человек способен воспринимать звуки не только ухом (воздушная проводимость), но и через кости черепа (костная проводимость), аудиометры позволяют выполнять измерения потери слуха и по костной проводимости путем возбуждения звуковых колебаний в кости черепа пациента с помощью костного вибратора. Шкала потери слуха по костной проводимости (в дБ относительно $1 \cdot 10^{-6}$ Н) в этом случае имеет такой же вид, как и при воздушной проводимости. Пороги слышимости, от которых отсчитывают потерю слуха при аудиометрических измерениях, по костной проводимости для чистых тонов и по воздушной проводимости при наличии узкополосного маскирующего шума, установлены стандартом ИСО.

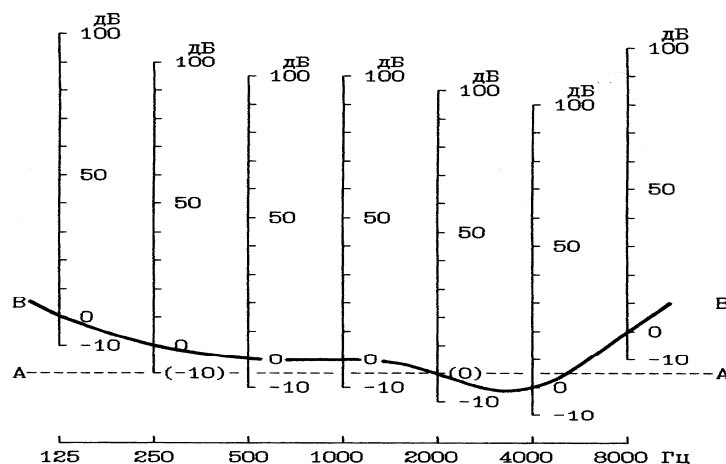


Рис.7.8.6. Аудиометрическая шкала определения потери слуха
(А-А соответствует звуковому давлению $2 \cdot 10^{-5}$ Па,
В-В аудиометрический нормальный порог слуха – 0 дБ)

Таким образом, в аудиометрии применяются три шкалы измерений: шкала потери слуха по воздушной проводимости на чистых тонах, шкала потери слуха по костной проводимости и шкала потери слуха по воздушной проводимости при наличии узкополосных маскирующих шумов. Потеря слуха пациентом во всех трех шкалах измеряется в дБ, но начала отсчетов (плавающие нули шкал) в каждой шкале и на каждой частоте свои.

Псофометрические шкалы.

В телефонных и радиопереводных связях всегда присутствуют широкополосные шумы, мешающие правильному восприятию передаваемой информации (см. 7.12). Шумы линий связи оцениваются суммарным среднеквадратическим напряжением в вольтах (шкала отношений) или суммарным уровнем помех в дБ относительно 0,775 В на согласованном оконечном сопротивлении нагрузки линии при отсутствии полезного сигнала. Степень мешающего действия шума зависит от соотношения его мощности и мощности полезного сигнала, а также от неодинакового восприятия слухом частотных составляющих шума, воспроизводимых телефоном или громкоговорителем. Для системы "ухо – громкоговоритель" максимальное мешающее действие имеют составляющие шума в диапазоне 2-5 кГц, а для систем "ухо – телефон" максимум приходится на частотные составляющие в районе 800 Гц. Международные консультативные комитеты по телефонии и телеграфии (МККТТ) и по радиосвязи (МККР) установили соответствующие весовые или, как их принято называть, "псофометрические" (по-гречески "псофс" – шум) коэффициенты для всех частотных составляющих шума помехи относительно составляющих с частотами 800 Гц для телефонной и 1000 Гц для радиосвязи. Суммарный уровень напряжения шумовых помех с учетом этих весовых коэффициентов называется псофометрическим уровнем напряжения и измеряется на согласованной оконечной нагрузке линии связи с помощью псофометра – широкополосного измерителя уровня, снабженного корректирующими фильтрами в соответствии с псофометрическими коэффициентами.

Гидроакустические шкалы.

Основной шкалой, применяемой в акустических измерениях в водной среде, является логарифмическая шкала давлений. В этой шкале, как и в воздушной акустике, значения среднеквадратических давлений звуковых колебаний в воде выражаются в дБ относительно $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Такие измерения обычно выполняются гидрофонами, преобразующими гидроакустические сигналы в электрические.

В гидроакустике в отличие от воздушной акустики практически не применяются шкалы, предназначенные для восприятия гидроакустических сигналов человеком. На подводных лодках, однако, бывают специалисты по распознаванию на слух по характеру шумов типа источника гидроакустического сигнала, это можно считать простейшим измерением в шкале наименований.

В научных и прикладных исследованиях широко применяются методы анализа спектров гидроакустических сигналов, в которых измеряются зависимости спектральной плотности звука от частоты, описываемых двухмерными шкалами. Существуют также и гидроакустические измерительные системы, которыми измеряются не только звуковое давление, но и направление на ис-

точник гидроакустического сигнала в выбранной системе координат. Таким измерениям соответствует трехмерная комбинированная шкала, компонентами которой являются давление и два плоских угла.

В технологических процессах с использованием ультразвука, а также в медицинской ультразвуковой аппаратуре используются шкалы мощности ультразвука в жидкостях в Вт, интенсивности ультразвука (поверхностной плотности мощности) в Вт/м² и ее распределение по поверхности и др.

Единство измерений акустических и гидроакустических величин обеспечивается государственным первичным эталоном звукового давления в воздушной среде (ГЭТ 19-94) и государственным специальным эталоном единицы звукового давления в воде (ГЭТ 55-91) ВНИИФТРИ.

7.9. Шкалы величин, характеризующих ионизирующие излучения

Эта область измерений с некоторой долей условности подразделяется на несколько групп: шкалы активности радионуклидов; шкалы доз и мощности доз радиоактивного излучения; шкалы потока и плотности потока ионизирующих частиц, потока энергии и плотности потока энергии ионизирующего излучения, флюенса ионизирующих частиц; шкалы массы радионуклида. Условность этой классификации связана с существованием комплексированных эталонов, воспроизводящих значение нескольких единиц измерений.

В практической реализации шкал ряда величин, характеризующих ионизирующие излучения, используется банк стандартизованных и рекомендуемых значений ядерных и атомных физических констант.

Шкалы активности радионуклидов.

Единица активности – беккерель (Бк = с⁻¹). Беккерель – это активность нуклида в радиоактивном источнике, в котором за интервал времени 1 секунду происходит один спонтанный акт распада. По сути дела, это счетная единица. Шкала активности радионуклидов является аддитивной шкалой отношений. На практике используют также удельную активность – Бк/кг и объемную активность – Бк/м³.

Шкалы доз и мощности доз радиоактивного излучения.

Существующие государственные эталоны воспроизводят шкалы следующих величин: поглощенная доза, мощность поглощенной дозы, эквивалентная доза, мощность эквивалентной дозы, экспозиционная доза, мощность экспозиционной дозы. Все соответствующие шкалы являются шкалами отношений.

Единица поглощенной дозы – грей (Гр) – доза ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж (Дж/кг). Единица мощности поглощенной дозы – грей в секунду (Гр/с) – мощность поглощенной дозы излучения, при которой за 1 с в веществе создается доза излучения в 1 Гр. Употребляется также единица керма – (К) – отношение суммы начальных кинетических энергий – (dE_k) – всех заряженных ионизирующих частиц, образующихся в элементарном объеме вещества, к массе вещества в этом объеме $K = dE/dm$.

Керма измеряется также в Гр (1 Гр равен керме, при которой $dE_k = 1$ Дж в веществе массой 1 кг), и мощность кермы измеряется также в Гр/с.

Неблагоприятные биологические последствия хронического облучения человека малыми дозами ионизирующих излучений оцениваются (при контроле степени радиационной опасности) эквивалентной дозой Н (в зивертах). Эквивалентную дозу смешанного ионизирующего излучения определяют по математической модели линейного аддитивного приемника: $H = \sum D_i k_i$, где: D_i – поглощенная доза ионизирующего излучения i-го вида, которая определяется экспериментально, применительно к конкретным условиям работы лиц, подвергающихся во время работы облучению ионизирующим излучением; k_i – коэффициенты качества ионизирующего излучения i-го вида. Значения k_i для различных видов и энергий ионизирующих излучений приведены в РД50-454-84. Они являются основой для шкалы поглощенной дозы. Степень соответствия этой шкалы уровням неблагоприятных биологических эффектов определяется медико-биологическими исследованиями. Поскольку коэффициент качества (таблица 7.9.1 по РД50-454-84) величина безразмерная, размерность зиверта та же, что у грея. Соответственно мощность эквивалентной дозы измеряется в зивертах в секунду – Зв/с.

Экспозиционная доза фотонного (гамма- и рентгеновского) излучения – это отношение суммарного заряда $d\Theta$ всех ионов одного знака в элементарном объеме воздуха, когда все освобожденные фотонами электроны и позитроны полностью остановились в воздухе, к массе dm воздуха в этом объеме – $X = d\Theta/dm$. Единица измерения – кулон на килограмм – Кл/кг. Единица

мощности экспозиционной дозы соответственно – Кл/(кг·с), что соответствует амперу на килограмм – А/кг.

Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р), – связана с единицей SI соотношением: $1\text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ точно. Соответственно $1\text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-7} \text{ А/кг}$ точно.

Таблица 7.9.1

Вид ионизирующего излучения	k_i
Фотон с энергией более 350 кэВ	1,0
Фотон с энергией 150 – 350 кэВ	1,5
Фотон с энергией менее 150 кэВ	2,0
Электроны и позитроны с энергией более 100 кэВ	1,0
Бета-излучение с граничной энергией более 200 кэВ**	1,0
Нейтроны с энергией более 100 МэВ	5,0
Нейтроны с энергией 0,03–100 МэВ	10
Нейтроны с энергией менее 30 кэВ	3,0
Протоны с энергией более 50 МэВ**	2,5
Протоны с энергией более 5 МэВ*	2,5
Альфа-излучение с энергией менее 6 МэВ	20
Тяжелые ядра	20

* При облучении кожи

** При облучении тела на глубину 1 см и более

Шкалы потока и плотности потока ионизирующих частиц, потока энергии и плотности потока энергии ионизирующего излучения и флюенса ионизирующих частиц.

Единица потока ионизирующих частиц – секунда в минус первой степени (с^{-1}) – специального названия не имеет. Она равна потоку ионизирующих частиц, при котором через данную поверхность за 1 с проходит одна частица. Единица плотности потока ионизирующих частиц – секунда в минус первой степени, умноженная на метр в минус второй степени ($\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) – равна плотности потока ионизирующих частиц, при которой в сферу с площадью центрального сечения в 1 м^2 за 1 с проникает одна частица.

Единица потока энергии ионизирующего излучения – ватт (Вт) равна потоку энергии ионизирующего излучения, при котором через данную поверхность за 1 с проходит излучение с энергией 1 Дж.

Единица плотности потока энергии ионизирующего излучения – Вт/м^2 .

Единица флюенса ионизирующих частиц – метр в минус второй степени – м^{-2} – равна флюенсу ионизирующих частиц, при котором в сферу, с площадью центрального сечения 1 м^2 , проникает одна частица.

Единица флюенса энергии ионизирующего излучения (переноса энергии ионизирующего излучения) – джоуль на квадратный метр (Дж/м^2) – равна флюенсу энергии ионизирующего излучения, при котором в сферу с площадью центрального сечения 1 м^2 проникает ионизирующее излучение с энергией 1 Дж.

Все эти шкалы являются шкалами отношений.

Шкала массы радионуклида.

Как и основная шкала массы (см. 7.4), эта шкала является аддитивной шкалой отношений и, с точки зрения теоретической метрологии, не имеет каких-либо особенностей. Техническая особенность связана с радиоактивностью и изменением значения массы во времени из-за процесса распада самого вещества, т.е. с необходимостью применения защитных мер и введения поправочного коэффициента для определения массы радионуклида в момент проведения измерений. Шкала опирается на эталон единицы массы радия.

7.10. Шкалы физико-химического состава и свойств веществ

В физико-химических измерениях используются как метрические и абсолютные шкалы, так и большое число разнообразных неметрических шкал, включая процедуры идентификации в качественном химическом анализе. Особенности представления результатов измерений в неметрических шкалах и в специфических шкалах водородного pH и ионометрических показателей рассмотрены в 4.4.

Шкала pH водных растворов.

Водородный показатель – pH – десятичный логарифм концентрации C_{H^+} (точнее, активности) ионов водорода в растворе, взятый с обратным знаком: $\text{pH} = -\lg C_{\text{H}^+}$, где C_{H^+} выражено в грамм-молях на литр.

Водородный показатель является условно безразмерной величиной и количественно характеризует кислотность или щелочность водных растворов, которые существенно влияют на направление и скорость химических и биохимических процессов. Для кислых растворов ($C_{H^+} > C_{OH^-}$) водородный показатель $pH < 7$; а для щелочных растворов $pH > 7$. При температуре 22 °С водородный показатель чистой воды (нейтральных растворов) $pH = 7$. При повышении температуры диссоциация воды усиливается, концентрация ионов увеличивается, а pH уменьшается, поэтому чистая вода при температуре 100 °С имеет $pH \approx 6$, при температурах менее 22 °С в чистой воде $pH > 7$.

Для обеспечения единства измерения водородного показателя шкала pH стандартизована на международном (Рекомендация МР54, МОЗМ) и государственном (см. ГОСТ 8.134) уровнях. Стандартизованная шкала pH реализована во ВНИИФТРИ в виде государственного эталона и поверочной схемы. Для pH -метрии имеются стандарт-титры для приготовления эталонных буферных растворов (ГОСТ 8.135).

Шкалы ионометрических показателей растворов.

Ионометрический показатель – pX – десятичный логарифм концентрации иона химического элемента X в растворе, взятый с обратным знаком. Для измерения ионометрических показателей используются приборы с ионоселективными электродами, метрологическое обеспечение которых опирается на созданную во ВНИИФТРИ установку высшей точности – исходный для России эталон.

Шкала удельной электрической проводимости (УЭП).

Шкала УЭП является пропорциональной шкалой отношений; единица измерения УЭП в СИ – сименс на метр ($См \cdot м^{-1}$). В принципе, эта шкала относится к электрическим измерениям, однако она наиболее широко используется в методиках измерения состава различных жидкостей (растворов электролитов), обобщенно называемых кондуктометрией, которую традиционно относят к электрохимическим измерениям. Для обеспечения единства измерений УЭП во ВНИИФТРИ создан государственный эталон, воспроизводящий эту шкалу в полном соответствии с определением единицы измерения $См/м$ через единицы электрического сопротивления – ом и длины – метр. Большие значения УЭП (десятки $См/м$) воспроизводятся эталонированными по приготовлению растворами электролитов на находящейся во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева части государственного эталона УЭП.

Измерения УЭП применяются также и для определения свойств твердых тел. Например, приборно реализована специфическая шкала идентификации и сортировки металлов и их сплавов вихретоковыми измерениями их УЭП в диапазоне от 0,6 $МСм/м$ (титан) до 8 $МСм/м$ (серебро). Такая шкала идентификации является шкалой наименований.

Шкала практической солености морской воды.

Измерения абсолютной солености морской воды, определяемой как отношение массы растворенного в ней вещества к массе самой морской воды, затруднительны. При океанографических наблюдениях с целью обеспечения сопоставимости результатов при использовании приборов «электропроводность – температура – глубина» (СТО – система) по международному соглашению введена шкала практической солености морской воды (ШПС-78), на которой базируется Международное уравнение состояния морской воды. Эта шкала разработана объединенной группой экспертов по океанографическим таблицам и стандартам ЮНЕСКО, Международного совета по океанографическим исследованиям (СКОР) и Международной ассоциации физических наук об океане (МАФНО). В России шкала регламентирована ГСССД 77-84 "Морская вода. Шкала практической солености 1978 г."

Практическая соленость S морской воды не может быть измерена непосредственно и определяется через отношение K_{15} – электропроводности пробы морской воды при температуре 15 °С и давлении 101325 Па (1 стандартная атмосфера) к электропроводности раствора KCl , в котором массовая доля KCl составляет $32,4356 \cdot 10^{-3}$, при тех же значениях температуры и давления. Значение K_{15} , в точности равное 1, соответствует значению S , точно равному 35. Практическая соленость связана с отношением K_{15} уравнением:

$$S = 0,0080 - 0,1692 (K_{15})^{1/2} + 25,3851 K_{15} + 14,0941 (K_{15})^{3/2} - 7,0261 (K_{15})^2 + 2,7081 (K_{15})^{5/2}.$$

Зависимости практической солености S от относительной электропроводности, температуры и гидростатического давления сведены в таблицы стандартных справочных данных (ГСССД 77-84).

Шкала окислительных потенциалов водных растворов.

Шкала регламентируется ГОСТ 8.450-81 и устанавливает значения потенциалов окислительно-восстановительных систем в интервале от минус 133 до плюс 1236 мВ при температуре +25 °С. Диапазон температур шкалы от 5 до 95 °С. Соответствующий диапазон значений потенциалов составляет от минус 154 до +1272 мВ. Шкала воспроизводится с помощью четырнадцати поверочных (эталонных) растворов. Значение окислительных потенциалов этих растворов определяются относительно хлорсеребряного насыщенного электрода сравнения, находящегося при температуре 20 °С. В свою очередь, потенциал хлорсеребряного насыщенного электрода сравнения относительно нормального водородного электрода при температуре 20 °С равен 202 мВ. Поэтому шкалу окислительных потенциалов надо считать шкалой интервалов, условный нуль которой реализуется хлорсеребряным электродом, при фиксированной температуре 20 °С, а единица измерения равна 1 мВ.

Шкалы вязкости жидкостей.

Различают динамическую (Па·с) и кинематическую (м²/с) вязкости жидкости или газа. Они связаны соотношением: $\nu = \eta/\rho$, где ν – кинематическая вязкость; η – динамическая вязкость; ρ – плотность жидкости, кг/м³. Шкалы вязкостей – пропорциональные шкалы отношений.

Применяется также шкала кинематической вязкости ν_E в градусах Энглера – °Е в соответствии с эмпирической формулой: $\nu = (\nu_E/13,67) 10^{-4}$.

Существуют также специфические шкалы вязкости неньютоновских жидкостей, которые следует считать шкалами порядка. Такие шкалы обычно стандартизуются через описание методов и устройств для испытаний на вязкость конкретных веществ и продуктов, например сгущенного молока (ГОСТ 27709-88).

Шкалы плотности жидкостей.

Плотность $\rho = m/V$, где m – масса, V – объем. Плотность измеряется в кг/м³. Широко используется относительная плотность – отношение плотности исследуемой жидкости к плотности стандартного вещества – чистой воды при температуре +3,98 °С и атмосферном давлении 101325 Па. Она равна 998,200 кг/м³ с погрешностью $\pm 1,4 \cdot 10^{-6}$. Шкалы плотности газообразных, жидких и твердых тел являются пропорциональными шкалами отношений.

Плотности газов вычисляются (в зависимости от температуры и давления) с использованием экспериментальных данных, объединенных в уравнения состояния. Результаты помещаются в таблицах ГСССД.

Шкалы влажности.

Под влажностью понимают содержание в физических телах воды. Содержание химически связанной (конституционной) и кристаллогидратной воды в понятие «влажность» не входит. Различают абсолютную влажность (влагосодержание) и относительную влажность (просто влажность). Под влагосодержанием – U – понимают количество (массу – M или объем – V) воды, отнесенное соответственно к массе M_0 или объему V_0 сухой части материала:

$$U_M = \frac{M}{M_0}, \quad U_V = \frac{V}{V_0}.$$

Под влажностью (относительной) понимают отношение массы воды M к массе влажного материала – M_1 .

Таким образом, влажность характеризуется не одной, а рядом различных шкал, опирающихся на определения массового и объемного влагосодержания и относительной влажности. И влагосодержание и влажность – величины безразмерные – обычно их выражают в процентах. Шкалы влагосодержания и влажности являются ограниченными абсолютными шкалами.

Шкала влажности воздуха.

Влажность воздуха характеризуется содержанием в воздухе водяного пара. Для количественной оценки влажности воздуха используется упругость (парциальное давление) водяного пара e . Относительная влажность воздуха $f = (e/E) 100 \%$, где E – упругость пара, насыщающего воздух при данной температуре. В метеорологии влажность воздуха часто характеризуется также температурой точки росы – температурой, при которой воздух, если его изобарически охладить, насыщается водяным паром.

Шкалы измерения параметров и характеристик аэрозолей, гидрозолей и порошков.

Эта группа шкал охватывает измерения: счетной концентрации частиц (аддитивная шкала отношений, единица измерения м⁻³); массовой концентрации частиц (аддитивная шкала отношений, единица измерения кг·м⁻³; среднего размера частиц (шкала разностей – длин, единицы измерения м, мкм); функции распределения (производной) счетной концентрации по размеру частиц

(двухмерная шкала с единицами измерения аргумента m и значений функции m^{-4}). Во ВНИИФТРИ создан комплексный государственный эталон дисперсных параметров для обеспечения единства измерений по всем этим шкалам. К этой группе можно также отнести различные шкалы мутности и дымности. Измерение размеров частиц (зерен) крупности сыпучего материала осуществляют также по ситовым шкалам (ситовый анализ), которые опираются на параметры сит. В таких шкалах номер сита связывается с размерами отверстий или числом отверстий на единицу площади сита. В литературе встречается ситовая шкала с характеристикой в мешах. Меш – число отверстий на 1 погонный дюйм сита).

Шкалы содержания и концентрации компонент.

Чаще всего в этой группе применяются шкалы следующих величин применительно к газам, парам, жидкостям и твердым веществам: молярная, массовая и объемная доли компонентов (абсолютные пропорциональные шкалы, единица измерения: % и др.); массовая концентрация компонентов (пропорциональные шкалы отношений, единица измерений – mg/m^3 и др.).

Используется также множество шкал состава веществ и материалов, например, изотопного состава химического элемента (азота, урана и др.) в веществе, состава (долей компонентов) в сплаве металлов (латунь, бронза и др.). Шкалы состава являются своеобразными многомерными шкалами, координатами в которых являются доли компонентов. Диапазон изменения каждой доли – от 0 до 100 %, но сумма значений всех долей в конкретном веществе или материале всегда равна 100 %.

Международная сахарная шкала.

Концентрацию сахарных веществ в растворах определяют по измерению угла вращения плоскости поляризации света, прошедшего через водный раствор этого вещества. В сахариметрии условия измерения стандартизованы, а шкала измерительного прибора (сахариметра) градуирована так, чтобы при измерении получить отсчет концентрации в градусах ($^{\circ}S$) международной сахарной шкалы, являющейся пропорциональной шкалой отношений. В этой шкале ноль градусов соответствует чистой воде, а за $100^{\circ}S$ принят поворот плоскости поляризации белого света на угол $34,620^{\circ}$ раствором 26,000 г чистой сахарозы в 100 мл воды при $20^{\circ}C$ в трубке длиной 200 мм. Международная сахарная шкала для определения концентрации сахаристых веществ в растворах установлена рекомендацией МОЗМ МР14.

Физико-химические шкалы порядка.

Существует большое разнообразие физико-химических свойств, которые описываются шкалами порядка. Результаты измерений в них выражаются неархимедовыми величинами (см. главу 2): числами, баллами, степенями, уровнями и т.д. В табл. 7.10.1 представлены сведения о далеко неполном перечне таких стандартизованных и реально применяемых шкал измерений.

Числа и баллы некоторых физико-химических шкал порядка

Таблица 7.10.1

Объект измерений	Наименование измеряемой величины
1	2
Топливо для двигателей	Октановые числа по ГОСТ 8226-82 и ГОСТ 511-82 (моторным методом)
Топливо дизельное	Цетановое число по ГОСТ 3122-67 и ГОСТ 12525-85 Цетановый индекс по ГОСТ 27768-88
Нефтепродукты	Кислотность и кислотное число по ГОСТ 5985-79 Йодное число по ГОСТ 2070-82
Нефтепродукты и смазочные масла	Число нейтрализации по ГОСТ 29255-91 методом цветного индикаторного титрования Степень чистоты по ГОСТ 12275-66 Смазочная способность масел (интегральный уровень СКЗ)
Топливо остаточное	Бромное число фракции по ГОСТ Р 50837.2-95 Число пептизации по ГОСТ Р 50837.5-95
Парафины и церезины нефтяные	Индекс пенетрации по ГОСТ 25771-83
Углеводы ароматические бензольного ряда	Бромное число по ГОСТ 2706.11-74
Материалы лакокрасочные	Кислотное число по ГОСТ 23955-80 Условная светостойкость по ГОСТ 21903-76

1	2
Смолы лаковые алкидные и полиэфирные	Гидроксильное число по ГОСТ 26194-84
Отвердители ангидридные для эпоксидных смол	Общее кислотное число кислоты по ГОСТ 25523-82
Метанол-яд технический	Перманганатное число по ГОСТ 25742.5-83
Целлюлоза	Медное число по ГОСТ 9418-75 Число Каппа по ГОСТ 10070-74 Хлорное число по ИСО 3260-82
Латекс каучуковый натуральный	Число КОН по ГОСТ 28864-90
Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики	Бентонитовое число по ГОСТ 21282-93
Соки плодовые и овощные	Формольное число по ГОСТ Р 51122-97 потенциометрическим методом
Масла растительные и натуральные жирные кислоты	Кислотное число по ГОСТ 5476-80 Иодное число по ГОСТ 5475-69 Перекисное число по ГОСТ 26593-85 Число омыления по ГОСТ 5478-90
Подсолнечник	Кислотное число по ГОСТ 26597-89 с применением рН-метрии
Спирты высшие жирные	Число омыления и эфирное число по ГОСТ 26549-85 Карбонильное число по ГОСТ 26592-85
Кислоты синтетические жирные	Эфирное число по ГОСТ 22385-94 фотометрическим методом
Зерновые культуры, зерно и продукты его переработки	Число падения по ГОСТ 30498-97 и ГОСТ 27676-88
Кондитерские изделия	Перекисное, кислотное и йодное числа жира по МИ 2586-2000
Пластмассы	Показатель текучести расплава термопластов по ГОСТ 11645-73

Шкалы определения качества воды.

Вода, играющая исключительную роль в биосфере и промышленных технологиях, особенно показательна по разнообразию типов шкал, характеризующих ее свойства и потребительские качества. Измеряют: состав питьевой воды (ГОСТ 2874-82), жесткость (ГОСТ Р 52029-2003), вязкость (ГОСТ 21727-76), мутность (ИСО 7027-84) и др. Ниже приведены только некоторые из существующих шкал и методов измерения показателей, характеризующих качество воды. Нормы погрешности измерений показателей состава и свойств воды установлены в ГОСТ 27384-87

Шкалы жесткости воды. Жесткость воды характеризует содержание в ней ионов кальция ($1/2 \text{ Ca}^{2+}$) и магния ($1/2 \text{ Mg}^{2+}$). Единицей жесткости воды является моль на кубический метр (моль/м^3), соответствующий раствору с массовой концентрации эквивалентов ионов кальция $20,04 \text{ г/м}^3$ и ионов магния $12,153 \text{ г/м}^3$ (ГОСТ 6055-86).

Оценку жесткости пресной воды обычно проводят по шкале порядка:

очень мягкая	до $1,5 \text{ моль/м}^3$
мягкая	от $1,5$ до 3 моль/м^3
умеренно (средне) жесткая	от 3 до 6 моль/м^3
жесткая	от 6 до 9 моль/м^3
очень жесткая	более 9 моль/м^3

В ряде стран жесткость воды принято оценивать в градусах: немецкий градус соответствует 10 мг CaO в 1 л воды; английский градус, соответственно, 10 мг CaCO_3 в $0,7 \text{ л}$ воды; французский – 10 мг CaCO_3 в 1 л воды; американский – 1 мг CaCO_3 в 1 л воды. Соотношение единиц же-

сткости в моль/м³ и в различных градусах приведено в таблице 7.10.2. Такие шкалы жесткости воды являются пропорциональными шкалами отношений.

Таблица 7.10.2

	моль/м ³	Немецкие градусы	Французские градусы	Английские градусы	Американские градусы
1 моль/м ³	1	2,804	5,005	3,511	50,05
1 немецкий градус	0,35663	1	1,7848	1,2521	17,847
1 французский градус	0,19982	0,5603	1	0,7015	10,000
1 английский градус	0,28483	0,7987	1,4255	1	14,253
1 американский градус	0,01998	0,0560	0,1	0,0702	1

Метод определения запаха воды. Запах определяют при температуре воды 20 и 60 °С. Определяют характер и интенсивность запаха, характер запаха воды определяют ощущением воспринимаемого запаха (землистый, хлорный, нефтепродуктов и др. – шкалы наименований). Интенсивность запаха воды оценивают по пятибалльной системе (шкале порядка. Табл. 7.10.3):

Таблица 7.10.3

Интенсивность запаха	Характер проявления запаха	Оценка интенсивности запаха, балл
Нет	Запах не ощущается	0
Очень слабая	Запах не ощущается потребителем, но обнаруживается при лабораторном исследовании	1
Слабая	Запах замечается потребителем, если обратить на это его внимание	2
Заметная	Запах легко замечается и вызывает неодобрительный отзыв о воде	3
Отчетливая	Запах обращает на себя внимание и заставляет воздержаться от питья	4
Очень сильная	Запах настолько сильный, что делает воду непригодной к употреблению	5

Метод определения вкуса воды. Определяют характер и интенсивность вкуса и привкуса. Различают четыре основных вида вкуса (в физико-химической шкале наименований): соленый, кислый, сладкий, горький (шкала наименований). Все другие виды вкусовых ощущений называются привкусами. Характер вкуса или привкуса определяют ощущением воспринимаемого вкуса или привкуса. Испытываемую воду набирают в рот малыми порциями, не проглатывая, задерживая 3-5 с. Интенсивность вкуса и привкуса определяют при 20 °С по пятибалльной системе, полностью аналогичной системе оценивания интенсивности запаха (в таблице слово «запах» заменено на «вкус и привкус»).

Метод определения цветности воды. Цветность воды определяют фотометрически – путем сравнения проб испытуемой жидкости с растворами, имитирующими цвет природной воды. Сравнение выполняется на фотоэлектроколориметре (ФЭК) с синим светофильтром ($\lambda = 413$ нм). ФЭК градуируется в «градусах цветности» по «шкале цветности» – водными растворами солей и серной кислоты, приготовленными по определенному рецепту (шкала порядка).

Метод определения мутности воды. Мутность воды определяют фотометрическим путем сравнения проб исследуемой воды со стандартными суспензиями из каолина или трепела. Сравнение выполняется на ФЭК с зеленым светофильтром ($\lambda = 530$ нм). ФЭК градуируется по приготовленным по рецепту суспензиям с определенными концентрациями в мг/л. Содержание мутности определяют в мг/л.

Шкалы определения свойств и качества пищевых продуктов.

Сведения о таких шкалах представлены в таблицах 7.10.4 – 7.10.7 по видам пищевых продуктов. Многие из этих шкал являются шкалами порядка и наименований.

Молоко и молочные продукты

Таблица 7.10.4

Измеряемое свойство	Нормативный документ
Пастеризация	ГОСТ 3623-73
Кислотность	ГОСТ 3624-67
Содержание влаги и сухого вещества	ГОСТ 3626-73
Содержание жира	ГОСТ 5867-69
Чистота	ГОСТ 8218-89
Содержание общего белка методом Кьельдаля	ГОСТ 23327-78
pH	ГОСТ 26781-85
Вязкость молочных сгущенных консервов	ГОСТ 27709-88
Запах и вкус	ГОСТ 28283-89

Мясо и мясные продукты

Таблица 7.10.5

Измеряемое свойство	Нормативный документ
Свежесть мяса органолептическими методами	ГОСТ 7269-79
Качество мяса птицы органолептическими методами	ГОСТ 7702.0-74
Свежесть мяса птицы методами химического и микроскопического анализа	ГОСТ 7702.1-74
Бактериологический анализ мяса птицы	ГОСТ 7702.2-74
Свежесть органолептическими методами мяса кроликов	ГОСТ 20235.0-74
Свежесть мяса кроликов методами химического и микроскопического анализа	ГОСТ 20235.1-74
Свежесть мяса методами химического и микроскопического анализа	ГОСТ 23392-78
Содержание белка в мясе и мясных продуктах	ГОСТ 25011-81

Масла растительные

Таблица 7.10.6

Измеряемое свойство	Нормативный документ
Запах, цвет и прозрачность	ГОСТ 5472-50
Иодное число	ГОСТ 5475-69
Кислотное число	ГОСТ 5476-80
Цветность	ГОСТ 5477-69
Число омыливания	ГОСТ 5478-64
Перекисное число	ГОСТ 26593-85

Хлеб, хлебобулочные и кондитерские изделия, мука, крупа

Таблица 7.10.7

Измеряемое свойство	Нормативный документ
Пористость хлеба и хлебобулочных изделий	ГОСТ 5669-51
Кислотность хлеба и хлебобулочных изделий	ГОСТ 5670-51
Влажность хлеба и хлебобулочных изделий	ГОСТ 21094-75
Намокаемость кондитерских изделий	ГОСТ 10114-80
Кислотность овсяных хлопьев	ГОСТ 26312.6-84
Влажность муки и отрубей	ГОСТ 9404-88
Белизна муки	ГОСТ 26361-84
Цвет, запах, вкус и хруст муки и отрубей	ГОСТ 27558-87

Шкалы определения свойств бумаги и картона.

В нижеследующей таблице представлены сведения о стандартах, в которых регламентированы шкалы измерений физико-химических свойств бумаги и картона.

Таблица 7.10.8

<i>Измеряемое свойство</i>	Нормативный документ
рН водной вытяжки	ГОСТ 12523-77
Поверхностная впитываемость капельным способом	ГОСТ 12603-67
Впитываемость при полном погружении	ГОСТ 12604-77
Поверхностная впитываемость воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)	ГОСТ 12605-82
Влагопрочность	ГОСТ 13525.7-68
Жиропроницаемость	ГОСТ 13525.13-69
Скручиваемость при одностороннем смачивании	ГОСТ 13525.16-69

Физико-химические шкалы наименований.

К этой группе относятся шкалы идентификации химических элементов, веществ, материалов, видов продукции, объектов (качественный химический анализ и другие процедуры идентификации), шкалы, вкуса и запаха и т.п. Существуют также процедуры идентификации сложных химических неорганических и органических соединений для различных экспертных заключений, например, принадлежность нефти к определенному месторождению, образцов почвы – к определенной местности и т.д.

Особо следует отметить шкалы ощущения вкуса и запаха человеком. Общих принципов стандартизации этих шкал пока не разработано потому, что в отличие от цветовых ощущений, для которых построена структурированная эмпирическая трехмерная модель множества цветовых ощущений, такие модели для ощущений запаха и вкуса не построены. Более того, даже не установлена мерность этих качественных свойств. Однако некоторые классификационные признаки для этих шкал достаточно однозначно установлены. Так, запахи и вкус, с некоторой неопределенностью, делятся на три больших класса: приятные, неприятные и нейтральные (без запаха, безвкусные объекты). Далее различают основные вкусы объектов: сладкий, горький, соленый, кислый, жгучий, пряный, безвкусный. Название запахов чаще всего происходит от названия соответствующих объектов: запах луковый, чесночный, огуречный, рыбный, свежей древесины, жасминовый, сиреневый, черемуховый и т.д. При этом для конкретных запахов и вкусов существуют различные количественные градации их по насыщенности, уровню, силе (шкалы порядка), например, несоленый, слабо соленый, средне соленый, соленый, крепко соленый. Различные специфицированные шкалы вкуса и запаха широко применяются в органолептических методах измерений при контроле качеств и пищевых продуктов, воды, вина, парфюмерных изделий, изделий бытовой химии и др.

7.11. Некоторые специальные шкалы, используемые в науке, технике и производстве

В параграфе приведены сведения о некоторых шкалах, прямо не относящихся к определенным видам измерений, но играющих значительную роль в жизни общества. Общепринятых классификационных принципов, охватывающих такие шкалы нет, поэтому они представлены в произвольной последовательности.

Метеорологические шкалы.

Атмосферное давление, температура и влажность воздуха, скорость ветра, дальность видимости измеряются по обычным метрическим шкалам (см. 7.4, 7.5, 7.10). Шкалы измерения количества, осадков (в миллиметрах) и высоты снежного покрова имеют некоторые специфические, особенности. Кроме того в метрологии применяются также специфические неметрические шкалы: шкала динамических явлений в атмосфере (циклон, антициклон, ветер, буря, метель, ураган, вихрь, смерч, тайфун, торнадо – шкала наименований); шкала видов осадков (дождь, ливень, снег, град, крупа, роса, туман, иней, изморозь, – шкала наименований); шкала уровней облачности (безоблачно, переменная облачность, сплошная облачность); шкалы силы ветра и состояния поверхности моря (см.7.4); шкала баллов северных сияний. Более подробно представим структурированную по ряду признаков шкалу наименований облаков (таблица 7.11.1). Основой такой классификации и буквенных обозначений форм облаков являются латинские названия перистых, слоистых и кучевых облаков, данные англичанином Люком Говардом в конце 18 века.

Таблица 7.11.1

Типичные формы облаков (обозначение)	Высота нижней границы облачности (км)	Состояние облаков	Виды осадков у земли
Слоистые (St)	0,1-0,7	Капельные	Отсутствуют или морось
Слоисто-кучевые (Sc)	0,4-2,0	Капельные	То же
Высоко-кучевые (Ac)	2-6	Капельные	Отсутствуют
Перисто-кучевые (Cc)	6-9	Кристаллическое	Отсутствуют
Слоисто-дождевые (Ns)	0,1-1,0	Смешанные	Дождь, снег
Высоко-слоистые (As)	3-6	Кристаллическое	Дождь, снег
Перисто-слоистые (Cs)	6-8	Кристаллическое	Отсутствуют
Перистые (Ci)	6-9	Кристаллическое	Отсутствуют
Кучевые (Cu)	8,0-2,0	Капельные	Отсутствуют
Мощно-кучевые (Cu cong)	8,0-2,0	Капельные	Отсутствуют
Кучево-дождевые (Cb)	0,4-1,5	Смешанные	Ливень, град

Астрофизические шкалы.

Различают ряд шкал звездных величин, характеризующих блеск небесных светил, т.е. освещенность, которую они создают в пункте наблюдения. Еще Гиппарх, а затем Птолемей разделили видимые невооруженным глазом звезды на шесть величин, отнеся к 1-ой наиболее яркие, а к 6-ой – наиболее слабые по блеску звезды. В обобщенном смысле звездная величина m определяется следующим соотношением:

$$m = -2,5 \cdot \lg \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) \cdot f(\lambda) \cdot d\lambda + C.$$

Здесь $E_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности от звезды в месте наблюдения, $f(\lambda)$ – спектральная чувствительность регистрирующей аппаратуры, λ – длина волны электромагнитного излучения, C – постоянная, задающая условный ноль шкалы звездной величины. В соответствии с видом функции $f(\lambda)$ различают шкалы визуальных, монохроматических, болометрических (неселективный приемник), фотографических и др. звездных величин. Исправленные на поглощение излучения в атмосфере Земли звездные величины называют внеатмосферными, применяются также шкала абсолютной звездной величины M , которая определяется как звездная величина, которую имела бы звезда, если ее наблюдать со стандартного расстояния 10 парсек, т.е. для визуальных m и M установлено соотношение $m = M + 5 \cdot \lg(r) - 5 + A$, где r – расстояние до звезды в парсеках, A – межзвездное ослабление излучения.

Шкала спектральных классов звезд – упорядоченная по ориентировочной температуре поверхности звезд (от 40000 до 2800 К) шкала семи классов эквивалентности (классы O, B, A, F, G, K и M), характеризующихся видом и числом спектральных линий в спектрах излучения звезд. Эта шкала используется в известной двухкоординатной шкале – диаграмме «спектр-светимость» Герцшпрунга-Расселла, в которой звезды группируются около определенных линий, т.е. образуют явно выделяющиеся последовательности (главная последовательность, субкарлики, белые карлики, субгиганты, гиганты, сверхгиганты, пульсирующие звезды и др.).

Шкалы, характеризующие толщину пряжи и нитей.

В текстильном производстве применяются две шкалы: шкала метрических номеров и шкала линейной плотности. Обе эти шкалы являются пропорциональными шкалами отношений. Метрический номер (тонина) – N – это длина в метрах волокна, пряжи, нити и т.п., массой один грамм. Таким образом, чем больше номер нити или пряжи, тем она тоньше: $N = \ell/m$, здесь ℓ – длина нити, м; m – масса нити, г. На практике приходится иметь дело с нитями от номера 10 до 150. Наиболее тонкая пряжа, которую в наши дни удастся произвести, применяя специальную технологию, для выставочных образцов ткани, имеет номера до 1000 – 1500. Исследования остатков древнеегипетского льняного виссона (полупрозрачной ткани, приносимой в дар фараонам или фараонами) показали, что пряжа, из которой его ткали, имела номера до 5000. Недаром виссон стоил в несколько раз дороже равной массы золота и в списке подарков упоминался на первом месте. Технология производства виссона утеряна. Есть гипотеза, что Язон увез Медю из Колхиды именно потому, что она владела этой технологией. Шкала линейной плотности T имеет свою единицу –

текс (от латинского *textura* – ткань, связь). Текс равен линейной плотности однородного тела (волокон, нитей), масса которого равна 1 г, а длина 1 км. Иными словами, $T = m/\ell$, где m – масса в г, ℓ – длина в км. Таким образом, эти шкалы обратны друг другу: $1000 \cdot N = 1/T$ (ГОСТ 6611.1-73).

Полиграфические шкалы.

Наиболее распространенная и в наши дни полиграфическая шкала была разработана в XVIII веке французскими типографами Фурнье и Дидо. Ее основа – французский королевский фут (около 325 мм), который делится на 12 дюймов, дюйм на 12 линий, линия на 12 точек (пунктов). Типографский пункт равен двум таким точкам, около 0,376 мм. Следующая, более крупная единица длины (а не площади) – квадрат, равный 48 пунктам, около 18,05 мм. В пунктах измеряется кегль шрифта (расстояние от верхней до нижней грани литеры, стоящей в наборе, а не размер самой буквы). Каждый кегль имеет свое название, таблица 7.11.2:

Таблица 7.11.2

Наименование кегля	Цицero	Корпус	Петит	Нонпарель
Число пунктов	12	10	8	6

Шкала номеров обуви – дискретная пропорциональная шкала отношений. Эта шкала – детище современного массового производства.

Пока обувь шили на заказ вручную, потребности в такой шкале не было. Для русской армии, еще в XIX веке, солдатскую обувь шили одинаковую для правой и левой ноги.

Это было удобно для интендантов, да и обуваясь по тревоге нельзя было перепутать сапоги. В применяемой ныне в России метрической шкале номер обуви просто равен длине стопы (стельки обуви) в сантиметрах.

Ранее размер обуви выражали в штихмассовой системе: один штихмасс = $2/3$ см. Например, 42 размер обуви в штихмассовой системе означал, что длина стельки равнялась $42 \times 2/3 = 28$ см. А обладатели ножки 46-го размера могли гордиться тем, что длина их ступни (foot) действительно равнялась английскому футу – 30,5 см. Приведем таблицу перевода размеров обуви в штихмассах в метрические номера для наиболее широко распространенных размеров.

Таблица 7.11.3

Размер В Штихмассо- вой системе	Номер (размер) в метрической системе, (см)
33	22
34	22,7 (22,5-23)
35	23,3 (23)
36	24
37	24,7 (24,5-25)
38	25,4 (25-25,5)
39	26
40	26,7 (26,5-27)
41	27,3 (27)
42	28
43	28,7 (28,5-29)
44	29,3 (29-29,5)
45	30
46	30,7 (30,5-31)

В обувных магазинах номера указывают с интервалом в 0,5 размера. Внимательно изучив таблицу, можно сделать однозначный вывод: примерять обувь нужно обязательно. Обоснованность этого совета связана также и с тем обстоятельством, что обувь характеризуется не только длиной стельки, но еще полнотой и высотой подъема.

Шкалы калибров (диаметров канала ствола огнестрельного оружия и пули). Калибр гладкоствольного охотничьего ружья измеряется числом круглых пуль этого диаметра, которые можно изготовить из одного английского фунта (453,6 г) чистого свинца. Обычно имеется в виду следующий ряд таких калибров: 4, 8, 10, 12, 16, 20, 28, 32 и 410. Самые ходовые калибры стволов гладкоствольного оружия: 12, 16, 20, 28, 32 и 410.

Калибры (диаметры канала ствола) нарезного оружия измеряются в миллиметрах до сотых его долей, например, калибр 7,62 мм. Ранее калибр нарезного огнестрельного оружия измеряли в «линиях» – десятых долях дюйма (1 дюйм = 25,4 мм = 10 линий). Например, калибр винтовки И.С. Мосина образца 1881 г. – 3 линии (трехлинейка) или 7,62 мм. В некоторых англоязычных странах калибры нарезного оружия обозначают также числом сотых и тысячных долей дюйма, например: "калибр 30 (США)", "калибр 300 (Англия)", которые в метрической системе соответствуют калибру 7,62 мм.

Промежутки между нарезками называются полями. Калибр (диаметр канала ствола) может измеряться по противоположным полям или нарезам. Поэтому может быть так, что образцы оружия разного типа, обозначенные одним и тем же калибром будут иметь пули разного диаметра, так как диаметр пули всегда должен соответствовать диаметру канала ствола по нарезам (в целях герметизации пороховых газов и приобретения пуль вращательного движения).

Шкалы измерения специфических свойств бумаги, картона и обоев установлены стандартизованными методами определения: дырчатости (ГОСТ 13525.9-68), внутрирулонных

дефектов (ГОСТ 13525.5-68), числа вкраплений частиц железа и меди (ГОСТ 7687-88), степени проклейки (ГОСТ 8049-62) и др.

Шкалы определения (измерения) сортности – разбраковки изделий на группы качества по альтернативным и количественным признакам. Все такие шкалы являются шкалами порядка и наименований. Их распространенность демонстрируется наличием ряда стандартов (см. табл. 7.11.4), посвященных только определению сортности конкретных видов продукции.

Таблица 7.11.4

Наименование продукции, для которой установлена процедура определения сортности	Обозначение стандарта
Ткани хлопчатобумажные, смешанные и из пряжи химических волокон	ГОСТ 161-86
Ткани шелковые и полушелковые	ГОСТ 187-85
Ткани чистольняные, льняные и полульняные	ГОСТ 357-75
Ткани чистшерстяные и полушерстяные	ГОСТ 358-82
Изделия штучные из натурального шелка, шелковой пряжи, химических нитей и смешанные	ГОСТ 470-88
Изделия трикотажные верхние	ГОСТ 1115-81
Изделия трикотажные бельевые	ГОСТ 1136-81
Головные уборы и шарфы трикотажные	ГОСТ 1164-86
Изделия трикотажные перчаточные	ГОСТ 1165-86
Изделия штучные и тканые чистшерстяные и полушерстяные	ГОСТ 1178-75
Изделия штучные чистольняные и полульняные	ГОСТ 1408-78
Изделия штучные хлопчатобумажные, из пряжи химических волокон и смешанные	ГОСТ 9470-71
Изделия швейные для военнослужащих	ГОСТ 11259-79
Изделия швейные бытового назначения	ГОСТ 12566-88
Изделия чулочно-носочные, вырабатываемые на круглочулочных автоматах	ГОСТ 16825-82
Полотна и изделия штучные гардинно-тюлевые	ГОСТ 20823-90
Полотна вязально-прошивные хлопчатобумажные и смешанные бытового назначения	ГОСТ 23244-78
Кожа для низа обуви	ГОСТ 316-75
Кожа хромовая для верха обуви	ГОСТ 338-81
Кожа искусственная для верха обуви	ГОСТ 26094-84
Кожа искусственная технического назначения	ГОСТ 26436-85
Кожа искусственная для специальной одежды и средств защиты рук	ГОСТ 27469-87
Обувь	ГОСТ 28371-89
Бумага и картон	ГОСТ 13525.4-68
Целлюлоза и древесная масса	ГОСТ 14363.3-84
Средства индивидуальной защиты	ГОСТ 12.4.031-84
Бензины авиационные	ГОСТ 3338-68

7.12. Шкалы, используемые в информационных технологиях

Шкалы количества информации.

В широком смысле информация – это любые сведения (сообщения) о природных, технических, социальных и т.п. объектах, явлениях, процессах, передаваемых каким-либо способом в виде комбинаций символов (букв, цифр, знаков, звуков, изображений и т.д.). Всякая информация, содержащаяся в сообщении, характеризуется ее качеством и количеством.

Качество (смысл) информации, ее значимость, ценность, актуальность зависит от многих обстоятельств и не поддается формализации. С другой стороны, информатика – наука об общих свойствах информации, закономерностях и методах ее получения, хранения, передачи, переработки и ее использования – рассматривает информацию только с количественной стороны безотносительно к ее ценности и даже смысла. Такой подход правомерен в системах связи, средствах вычислительной техники, предназначенных для безошибочной передачи и обработки информационных сообщений, представленных любым набором символов. В таких сообщениях событие (появление того или иного символа из числа заранее известного набора) имеет статистический характер и определяется соответствующей априорной вероятностью.

Для оценки количества информации в сообщении используется логарифмическая мера, введенная Р.Хартли. Если вероятность событий x_1, x_2, \dots, x_n равна соответственно p_1, p_2, \dots, p_n , и при этом

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad (1)$$

то количество информации I , содержащейся в сообщении, определяется формулой:

$$I = -p_1 \log_a(p_1) - \dots - p_n \log_a(p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_a(p_i). \quad (2)$$

Если все события равновероятны, т.е. $p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$, из (1) имеем: $np = 1$ или $p = \frac{1}{n}$, тогда из (2) получим

$$I = -\sum \frac{1}{n} \log_a\left(\frac{1}{n}\right) = \log_a n, \quad (3)$$

т.е. количество информации равно логарифму числа равновероятных событий. Основание a логарифмов в этих формулах, в принципе, может быть любым, но т.к. в современной вычислительной технике принята двоичная система счисления, чаще всего принимают $a = 2$, а информация в этом случае измеряется в двоичных единицах – битах (от английского “binary digit” – двоичный знак). В двоичной системе счисления каждый разряд двоичного числа может принимать с одинаковой вероятностью равной $p = \frac{1}{2}$ только одно из двух возможных значений “0” или “1”, следовательно, информация, содержащаяся в каждом двоичном разряде, равна $I = \log_2 2 = 1$, т.е. 1 биту.

В вычислительной технике (компьютерах) оказалось удобнее оперировать последовательностью из 8 бит (части машинного слова), используемой при обработке как единое целое. Количество информации равное 8 битам получило наименование байт (byte). В одном байте можно однозначно закодировать один из $256 = 2^8$ символов (букв, цифр, знаков).

Единицы количества информации (таблица 7.12.1) бит (bit) и байт (byte) допущены к применению наравне с единицами SI и включены в новую редакцию ГОСТ 8.417 – 2002.

Таблица 7.12.1

Наименование величины	Единицы			
	Наименование	Обозначение		Значение
		международное	русское	
Количество информации	бит	Bit	бит	1
	байт	B (byte)	Б (байт)	1 Б=8 бит

Согласно Международному стандарту МЭК 27-2, единицы бит и байт применяются с приставками SI: кило, мега, гига и другими. Причем с единицей бит эти приставки применяются так же, как с любой другой единицей SI: кбит, Гбит и т.д.

Несколько по-другому обстоит дело с применением приставок SI с единицей байт. Поскольку единица байт используется в двоичной системе счисления, для образования кратных единиц вместо множителя $10^3 = 1000$ применяется множитель $2^{10} = 1024$. Таким образом:

1 Кбайт = 1024 байта = 2^{10} байт

1 Мбайт = 1024 Кбайта = 1048576 байт = 2^{20} байт

1 Гбайт = 1024 Мбайта = 1069966024 байт = 2^{30} байт.

При этом обозначение “Кбайт” начинается с прописной буквы в отличие от строчной буквы “к” для обозначения 10^3 .

Единицы количества информации хорошо сочетаются с единицами SI, например, плотность записи информации – Кбайт/см, скорость передачи информации Мбайт/с и т.д.

Иногда встречаются в различных изданиях внесистемные единицы количества информации, определяемые по формуле (3), с использованием десятичных и натуральных логарифмов. Дит (десятичная единица) – единица количества информации, когда вероятность события определяется из десяти возможных вариантов. Мера такой информации в дитах определяется как $I_{дит} = \lg n$, и, следовательно, 1 дит = $\lg n$, при $n=10$. Иногда эту единицу информации называют – хартли. Нат (натуральный логарифм равновероятных возможностей) – единица количества информации, когда вероятность события определяется из возможного числа $n = 2,718284\dots$ равновероятных событий. Мерой такой информации в натах будет: $I_{нат} = \ln n$, отсюда 1 нат = $\ln n$, при $n=2,718284\dots$ Соотношения между различными единицами информации следующие:

1 дит = 2,3 нат = 3,32 бит

1 нат = 0,435 дит = 1,44 бит

1 бит = 0,301 дит = 0,693 нат.

Приведем также, для справки, перечень некоторых единиц измерений, связанных с применением компьютеров и часто встречающихся в документации и переводных книгах по компьютерной технике:

- bpi (bits per inch – количество бит на дюйм) – единица, используемая для измерения плотности записи на магнитном носителе;
- bps (bits per second – количество бит в секунду) – единица, используемая для указания скорости передачи информации;
- cpi (characters per inch – количество символов на дюйм) – единица измерения плотности символов, выдаваемых на печать;
- MIPS (миллион инструкций в секунду) – единица измерения производительности процессора компьютера;
- ppm (pages per minute – страниц в минуту) – скорость печати принтера, (к сожалению, обозначение этой единицы совпадает с международным обозначением единицы миллионной доли – ppm).

Шкала качества передачи речи по системам связи.

Качество передачи речи (таблица 7.12.2) по трактам радиотелефонной связи и по цифровым каналам систем низкочастотной передачи речи оценивается по шкале порядка, содержащей пять классов.

Таблица 7.12.2

Класс качества	Характеристики класса качества	Нормы разборчивости, %	
		Звуков D	Слов W
I	Понимание передаваемой речи без малейшего напряжения внимания	91 и более	98 и более
II	Понимание передаваемой речи без затруднений	85 - 90	94 - 97
III	Понимание передаваемой речи с напряжением внимания без переспросов и повторений	78 - 84	89 - 93
IV	Понимание передаваемой речи с большим напряжением внимания, переспросами и повторениями	61 - 77	70 - 88
V	Полная неразборчивость связного текста, срыв связи	60 и менее	69 и менее

Разборчивость звуков D и слов W по каналам связи определяется методом артикуляционных измерений бригадой слушателей при передаче специально подобранной таблицы слогов и слов, читаемых диктором. Канал связи первого класса должен обеспечивать разборчивость не менее 98 % слов. Пятый класс – полная неразборчивость речи – соответствует распознаванию менее 69 % слов. Методы артикуляционных измерений в трактах связи и оценка их результатов регламентированы ГОСТ 16600-71 и ГОСТ Р 51061-97.

Шкалы оценки интеллектуальных качеств и профессиональной пригодности людей.

К этой группе можно отнести: шкалы и тесты оценки уровня знаний, шкалы индексов умственного развития, тестовые шкалы одаренности, шкалы оценки способности школьников к обучению, шкалы оценки психологических свойств людей для подбора кадров, шкалы-опросники для оценки различных психологических признаков у человека (ипохондрии, депрессии, истерии, психопатии, паранойи, шизофрении, оптимистичности, общительности, лживости, инвалидности и др.). Необходимо иметь в виду, что все шкалы такого рода являются шкалами порядка или наименования. Тем не менее довольно часто встречаются неправомерные высказывания, например, в процентах повышения (уменьшения) успеваемости учащихся, усреднения оценок учащихся по различным предметам и другие далеко не безвредные для социума суждения. При построении такого рода шкал необходимо также иметь в виду ограниченный и практически постоянный объем кратковременной памяти людей: 7 ± 2 объекта. Желательно ориентироваться на такое число градаций в шкалах этой группы.

Международная шкала событий на атомных электростанциях.

Международная шкала событий на АЭС (шкала INES) введена для того, чтобы общественность и специалисты по ядерной энергетике одинаково оценивали события, происходящие на атомных станциях, а средства массовой информации объективно их отражали. Шкала является шкалой порядка и имеет семь ступеней, соответствующих следующим событиям на АЭС:

- седьмая ступень – глобальная авария, характеризующаяся большим выбросом радиоактивных веществ, радиологически эквивалентным активности от тысяч до десятков тысяч терабеккерелей радиоактивного йода ^{131}J , и тем, что нанесен значительный ущерб здоровью людей и окружающей среде. При этом необходим комплекс защитных и дезактивационных мер (эвакуация,

активное лечение людей, профилактика, захоронение радиоактивных объектов и грунта, защита водных источников и т.д.). *Пример – авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г.*

– шестая ступень – тяжелая авария, по внешним последствиям характеризующаяся значительным выбросом (эквивалент от десятков до сотен терабеккерелей радиоактивного йода ^{131}J) в ограниченной зоне и необходимостью введения в действие противоаварийных мероприятий, обеспечивающих ослабление влияния аварии на здоровье людей в этой зоне. *Пример – авария на АЭС в Уиндскейл (Великобритания) в 1957 г.*

– пятая ступень – соответствует аварии со значительным выбросом продуктов деления в окружающую среду эквивалентным значениям активности от нескольких единиц до десятков терабеккерелей радиоактивного йода. Возможна частичная эвакуация, необходима местная йодная профилактика и другие аварийные мероприятия по заранее разработанному плану. *Пример – авария на АЭС Тримайл-Айленд (США) в 1979 г.*

– четвертая ступень – авария в пределах АЭС – частичное разрушение активной зоны реактора как механическое, так и тепловое (плавлением). Работающие могут получить острое лучевое облучение порядка 1 зиверта, а возможный выброс в окружающую среду вызывает облучение отдельных лиц из населения в пределах нескольких миллизивертов. Защитных мер не требуется, но нужен контроль продуктов питания. *Пример – авария на АЭС Сен-Лоран (Франции) в 1980 г.*

– третья ступень – серьезное происшествие из-за отказа оборудования или ошибок эксплуатации. В окружающую среду выброшены радиоактивные продукты, возможная доза облучения отдельных людей не превышает нескольких миллизивертов. В то же время внутри станции работающие могут быть переоблучены дозами порядка 50 миллизивертов. *Пример – авария на АЭС Вандельос (Испания) в 1989 г.*

– вторая и первая ступени – функциональные отклонения и отказы в управлении и оборудовании, не вызывающие непосредственного влияния на безопасность АЭС, а тем более на окружающую среду.

Ниже шкалы – аварии и происшествия технического характера, не связанные с работой атомной установки. Они вовсе не имеют значения для ядерной безопасности, но также фиксируются.

Шкала сложности пожаров является шкалой порядка, содержащей пять категорий сложности от первой до высшей – пятой.

Шкалы опасности и вредности.

В Законе Российской Федерации "О техническом регулировании" указана необходимость устанавливать (в технических регламентах), с учетом степени риска причинения минимального вреда, необходимые требования, обеспечивающие: безопасность излучений, взрывобезопасность биологическую, механическую, пожарную, промышленную, термическую, электрическую, ядерную, радиационную безопасности, электромагнитную совместимость в части обеспечения безопасности работы приборов и оборудования. При разработке соответствующих технических регламентов, содержащих нормы безопасности, необходимо иметь в виду, что различные шкалы оценки вредности и опасности являются шкалами порядка. Например, в ГОСТ 12.1.007-76 химические вещества по вредности (токсичности) подразделяются на четыре класса – от чрезвычайно опасных до малоопасных. Для отнесения веществ, к тому или иному классу, можно воспользоваться любым из семи стандартных показателей, но чаще всего это по дозе 50 %-й летальности подопытных животных.

Классификация опасных и вредных производственных факторов имеется в ГОСТ 12.0.003-74, а в ГОСТ 12.1.011-78 – классификация и методы испытаний взрывоопасных смесей.

Медицинские шкалы.

Среди разнообразных диагностических шкал отметим для примера следующие: шкала (наименований) групп крови с учетом резус-фактора; шкала (порядка) инвалидов первой, второй и третьей групп. Существует также ряд биохимических шкал измерения содержания (концентрации) различных веществ в крови и других биологических пробах. Особенности этих шкал отражены в соответствующих аналитических процедурах.

Шкалы спортивных достижений.

Для оценки спортивных достижений применяются как метрические шкалы (например, длина и высота прыжка, интервал времени прохождения дистанции), так и весьма усложненные неметрические шкалы. Например, в хоккее оценка в процессе игры ведется в счетной шкале заброшенными соперниками шайб, а результат игры оценивается в шкале наименований (победа, поражение, ничья). В спортивных гимнастике и танцах из максимально возможного числа баллов

(обычно десяти) вычитают баллы или их доли за каждую допущенную ошибку в исполнении; результирующее (остаточное) число баллов является оценкой в шкалах порядка.

Приведенные в этом параграфе примеры шкал далеко не исчерпывают всего многообразия стандартизованных и реально применяемых в промышленности, сельском хозяйстве, науке, информационных технологиях и т.д. шкал измерений.

Литература к главе 7

1. Брянский Л.Н., Дойников А. С., Крупин Б.Н. Шкалы измерений // Законодательная и прикладная метрология.— 1993.— № 3.— С.44–48
2. Гинкин Г. Г. Логарифмы, децибелы, децилоги.— М.-Л.: Госэнергоиздат. 1962.— 352 с.
3. Фурдуев В.В. Теоремы взаимности.— М.-Л.: ОГИЗ. Гос. изд. тех.-теор. лит, 1948.— 92 с.
4. ГОСТ 7.64-90. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Представление дат и времени дня. Общие требования
5. ИСО 8601:1988. Элементы данных и форматы для обмена информацией. Обмен информацией. Представление дат и времени
6. Брянский Л. Н. Секунда // Законодательная и прикладная метрология.— 1994.— № 3.— С. 54-56
7. Хренов Л.С., Голуб И.Я. Время и календарь.— М.: Наука.— 1989.— 125 с.
8. Климишин И.А. Календарь и хронология.— М.: Наука.— 1981.— 190 с.
9. Шур Я.И. Когда? — М.: Детская лит, 1968.— 288 с.
10. Дойников А.С. О форме представления дат // Законодательная и прикладная метрология.— 2001.— № 3— С. 14
11. Вейль Герман. Симметрия / Пер. с англ. Б.В.Бирюкова и Ю.А.Данилова.— Под ред. Б.А.Розенфельда.— М.: Наука.— 1968. — 192 с.
12. Вигнер Е. Этюды о симметрии / Пер. с англ. М.: Мир. 1971.— 318 с.
13. Шубников А.В. Избранные труды по кристаллографии. — М.: Наука.— 1975.— 552 с.
14. Сонин А.С. Постигание совершенства (Симметрия, асимметрия, дисимметрия, анти-симметрия).— М.: Знание.— 1987.— 208 с.
15. Пилипчук Б.И. Обзор теорий твердости // Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР.— М.-Л.: Стандартгиз. Выпуск 60(120).— 1962.— 109 с.
16. Брянский Л.Н. Наследники Торричелли // Законодательная и прикладная метрология.— 2000.— № 1.— С. 61-64
17. Боровков В.М., Брянский Л.Н. Некоторые парадоксы и малоизвестные свойства грузопоршневых манометров //Законодательная и прикладная метрология.— 2000.— № 6.— С. 36-43
18. Брянский Л.Н. Метрология и стихия // Законодательная и прикладная метрология.— 1994.— № 1.— С. 50-52
19. Брянский Л.Н. Весы и гири // Законодательная и прикладная метрология.— 1998. — № 2.— С. 54-55
20. Куинн Т. Температура. — М.: Мир.— 1985.— 448 с.
21. Брянский Л.Н. Кельвин // Законодательная и прикладная метрология.— 1994.— №5.— С. 49–50
22. МБМВ. Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90) / Фр. и рус.— Л.: ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, 1992.— 43 с.
23. В.Я. Розенберг. Радиотехнические методы измерения параметров процессов и цепей. М.: Издательство Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.— 1970.— 307 с.
24. Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике.— М.: Издательство стандартов, 1985.— 295 с.
25. Брянский Л.Н., Левин М.М., Розенберг В.Я. Радиоизмерения. Методы, средства, погрешности.— М.: Изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при СМ СССР. — 1970.— 336 с.
26. Экометрия. Энциклопедия. Контроль физических факторов производственной сферы, опасных для человека. — М.: Изд. стандартов.— 2002.— 488 с.
27. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке, и технике / Пер. с англ. под ред. Л.Ф.Артюшина.— М.: Мир, 1978.— 592 с.
28. Справочная книга по светотехнике.— М.: Энергоатомиздат, 1995.— 528 с.
29. Дойников А.С. Прикладная фотометрия // Итоги науки и техн.: ВИНТИ АН СССР /Сер. Светотехника и инфракрасная техника.— 1983— Т.5.— 87 с.

30. Атлас из 1000 стандартных образцов цвета / Е.Н.Юстова, Г.В.Покровская, К.А.Алексеева и др. // Измерительная техника.– 1972.– № 7, С. 12-13
31. Давыдова И.Е., Цецорина В.А., Чистякова И.А. Полиграфический атлас цветов //Светотехника.– 1991.– № 2.– С. 6-8
32. Доклад МКО. //CIE Journal.– 1986.– Vol. №2.– p.41-46
33. ИСО 2813-1978 Е. Краски и лаки. Измерение зеркального блеска неметаллических пленок краски при 20°, 60° и 80°
34. Дойников А.С. О метрологических требованиях к оценкам оптического излучения в фотобиологии /Механизмы и оценка эффективности действия оптического излучения на биологические системы. Сб. научн. трудов. – Пущино: ОНТИ НЦБИ АН СССР.– 1985.– С.57-68
- 35.Авунович К.А. Основы фотографической метрологии.– М.: Легпромбытиздат, 1990
36. Дойников А.С. Шкалы измерений цвета // Законодательная и прикладная метрология.– 2002.– №2.– С.49-54
37. Дойников А.С. Спектральная плотность оптической величины, характеризующая излучение // Физическая энциклопедия.– М.: БРЭ.– 1994.– Т.4.– С.607
38. Дойников А.С. Спектральная световая эффективность монохроматического излучения // Физическая энциклопедия.– М.: БРЭ.– 1994.– Т.4.– С.607
39. Дойников А.С. Спектральная чувствительность приемника оптического излучения // Физическая энциклопедия. М.: БРЭ.– 1994.– Т.4.– С.608
40. Дойников А.С. (член авторского коллектива). Справочная книга по светотехнике.– М.: Энергоиздат.– 1995
41. Дойников А.С. Цветовая температура / Физическая энциклопедия.– М.: БРЭ.– 1998.– Т.5.– С. 422
42. Дойников А.С. Фотометр / Физическая энциклопедия.– М.: БРЭ.– 1998.– Т.5.– С. 351-352
43. Дойников А.С. Фотометрия / Физическая энциклопедия.– М.: БРЭ.– 1998.– Т.5.– С. 353
44. Дойников А.С. Яркометр / Физическая энциклопедия. – М.: БРЭ.– 1998.– Т.5.– С. 690
45. Крупин Б.Н. Логарифмические шкалы и величины // Законодательная и прикладная метрология.– 1994.– № 1.– С. 36-39
46. Крупин Б.Н. Шкалы частотных интервалов в акустике // Законодательная и прикладная метрология.– 1995.– № 2.– С. 43-45
47. Крупин Б.Н. Шкалы восприятия звука человеком // Законодательная и прикладная метрология.– 1995.– №3 – С.28-33
48. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. – М.: Связь.– 1971.– 256 с.
49. Беранек Л. Акустические измерения.–М.: Иностранная литература, 1952.– 623 с.
50. Авиационная акустика /Под ред. Мунина А.Т. и Квитки В.Е.– М.: Машиностроение.– 1973.– 448 с.
51. International Civil Aviation Organization. International standards and recommended practices. Aircraft noise. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. August 1971
52. Брегадзе Ю.И., Степанов Э.К., Ярына В.П. Прикладная метрология ионизирующих излучений.– М.: Энергоатомиздат.– 1990.– 261 с.
53. Маргулис У.Я., Брегадзе Ю.И. Радиационная безопасность. Принципы и средства ее обеспечения.– М.: Эдиториал УРСС.– 2000.– 115 с.
54. РД 50-454-84. Методические указания. Внедрение и применение ГОСТ 8.417-81 "ГСИ. Единицы физических величин" в области ионизирующих излучений.– М., Изд. стандартов.– 1990
55. Дойников А.С., Здориков Н.Н., Карпов О.В., Максимов И.И., Сейку Е.Е., Соболев В.В. Межгосударственный стандарт «Шкала рН водных растворов» // Измерительная техника.– 1999. – №10.– С. 58-62
56. Асадов А.М., Бабаев А.М., Рагимов М.И. Измерение мутности в лингвистических шкалах. – Измерительная техника. – 1989. – № 8. – С. 18-19
57. Экометрия. Энциклопедия. Контроль физических факторов производственной сферы, опасных для человека.– М.: Изд.стандартов.– 2002.– 448 с.
58. Боровиков А.М., Мазин И.П. Облака / Физич. Энцикл. Словарь.– Т.3.– М.: Сов. энциклопедия. –1963.– С. 452-454
59. Святский Д.О., Кладо Т.Н. Занимательная метеорология. –Л.: Молодая гвардия.– 1935.– 288 с.
60. Заморин А.П., Марков А.С. Толковый словарь по вычислительной технике и программированию. Основные термины. – М.: Русский язык.– 1987. – 221 с.
61. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология и информационные технологии // Измерительная техника. – 2000. – №9. – С.5-6

Глава 8 НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ МЕТРОЛОГИИ

8.1. Общие замечания о методиках выполнения измерений

Методика выполнения измерений (МВИ) – один из важнейших практических метрологических документов. Известно многовековое выражение: можно неверно взвесить и на верных весах. Задача МВИ – предохранить нас от подобных ситуаций. МВИ родились не сегодня. Так, в договоре Полоцка с Ригой в 1406 г. (в современной транскрипции) весовщики должны были целовать крест (давать клятвенное обещание), что они будут взвешивать товар правильно, без обмана в пользу той или иной стороны: при взвешивании весовщики обязаны были, положив товар и гири на весы, отнять руки и отступить от весов. Покупателям предоставлялось право в сомнительных случаях требовать перемены мест товара и гирь на чашках весов. Чем не МВИ?

Согласно закону РФ «Об обеспечении единства измерений» (статья 9) измерения должны осуществляться в соответствии с аттестованными в установленном порядке методиками.

Разработка, аттестация и применение МВИ регламентируется ГОСТ Р 8.563-96 «ГСИ. Методики выполнения измерений» (с изменениями №1 и 2). Этот стандарт содержит весьма подробные рекомендации по разработке, аттестации или стандартизации МВИ, по построению и изложению документа на МВИ, по метрологическому надзору за аттестованными МВИ. Новая редакция стандарта к тому же взаимоувязана с положениями комплекса шести (части 1, 2, 3, 4, 5 и 6) стандартов ГОСТ Р ИСО 5725-1,2,3,5,6-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений». Пересказывать здесь содержание разделов ГОСТ Р 8.563 нет необходимости, однако имеет смысл привести основные термины из него, необходимые для дальнейшего рассмотрения.

Методика выполнения измерений (МВИ) — совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результатов измерений с установленной погрешностью (неопределенностью). Характеристика погрешности измерений и характеристика случайной и систематической составляющей погрешности – в соответствии с рекомендациями МИ 1317-86.

Аттестация МВИ — процедура установления и подтверждения соответствия МВИ предъявляемым к ней метрологическим требованиям.

Метрологическая экспертиза МВИ — анализ и оценка выбора методов и средств измерений, операций и правил проведения измерений и обработки их результатов с целью установления соответствия МВИ предъявляемым метрологическим требованиям.

Приписанная характеристика погрешности измерений — установленная характеристика погрешности любого результата совокупности измерений, полученного при соблюдении требований и правил данной методики с учетом МИ 1317-86. В ГОСТ Р ИСО 5725 содержатся процедуры установления приписанных характеристик составляющих погрешности (случайной и систематической) МВИ и результатов измерений. Приписанные (установленные) характеристики составляющих погрешности представляются в документах на МВИ с указанием совокупности условий, для которых эти характеристики приняты. Суммарную погрешность измерений в этих случаях при необходимости устанавливают расчетным путем. Характеристики случайной составляющей погрешности по ГОСТ Р ИСО 5725-1 адаптированы к условиям получения результатов измерений: условиям повторяемости и условиям воспроизводимости. В ГОСТ Р 8.563 эти характеристики случайной составляющей погрешности рассматриваются для МВИ состава и свойств веществ и материалов. В качестве составляющих систематической погрешности в комплексе стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 так же, как в МИ 1317-86 и стандарте ISO 3534-1-1993, выделяют неисключенную систематическую погрешность (НСП), составляющую систематической погрешности измерений, обусловленную несовершенством реализации принятого принципа измерений, погрешность градуировки применяемого средства измерений. Если математическое ожидание систематической погрешности известно и постоянно, то в результат измерений вносят соответствующую поправку. Знак поправки противоположен знаку погрешности. Когда систематическая погрешность пропорциональна значению измеряемой величины, то с целью исключения влияния систематической погрешности используют поправочный множитель, на который умножают неисправленный результат измерений.

Точность — степень близости результата измерений к принятому опорному значению. Термин «точность», когда он относится к серии результатов измерений, включает сочетание случайных составляющих и общей систематической погрешности (ISO 3534-1-1993).

Принятое опорное значение — значение, которое служит в качестве согласованного для сравнения и получено как:

- а) теоретическое или установленное значение, базирующееся на научных принципах;

б) приписанное или аттестованное значение, базирующееся на экспериментальных работах какой-либо национальной или международной организации;

в) согласованное или аттестованное значение, базирующееся на совместных экспериментальных работах под руководством научной или инженерной группы;

г) математическое ожидание (общее среднее значение) заданной совокупности результатов измерений в условиях отсутствия необходимых эталонов, обеспечивающих воспроизведение, хранение и передачу соответствующих значений измеряемых величин (истинных или действительных значений измеряемых величин, выраженных в узаконенных единицах – РМГ 29-99).

Систематическая погрешность — разность между математическим ожиданием результатов измерений и истинным (или в его отсутствие — принятым опорным) значением.

Повторяемость (сходимость) результатов измерений — степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в условиях повторяемости — одним и тем же методом на идентичных объектах, в одной и той же лаборатории, одним и тем же оператором, с использованием одного и того же оборудования, в пределах короткого промежутка времени (ISO 3534-1-1993).

Среднеквадратическое отклонение повторяемости — среднеквадратическое отклонение результатов измерений, полученных в условиях повторяемости (является мерой рассеяния результатов измерений в условиях повторяемости).

Предел повторяемости — значение, которое с доверительной вероятностью 95 % не превышает абсолютной величиной разности между результатами двух измерений, полученными в условиях повторяемости.

Воспроизводимость результатов измерений — степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в условиях воспроизводимости — одним и тем же методом, на идентичных объектах, в разных лабораториях, разными операторами, с использованием различного оборудования (ISO 3534-1-1993).

Предел воспроизводимости — значение, которое с доверительной вероятностью 95 % не превышает абсолютной величиной разности между результатами двух измерений, полученными в условиях воспроизводимости.

Неопределенность измерений — параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине. Параметром может быть среднеквадратическое отклонение (или число, кратное ему) или половина интервала, имеющего указанный доверительный уровень. Неопределенность состоит (чаще всего) из многих составляющих. Некоторые из этих составляющих могут быть оценены среднеквадратическими отклонениями статистически распределенной серии результатов измерений. Другие составляющие, которые также могут быть оценены среднеквадратическими отклонениями, базируются на данных эксперимента или другой информации (РМГ 29-99). Взаимосвязь этих понятий показана на рис 8.1.

Отдавая должное методической роли ГОСТ Р 8.563-96, необходимо отметить что он распространяется только на МВИ с установленной погрешностью (неопределенностью). Стандарт не распространяется на МВИ, характеристики погрешности измерений по которым определяют в процессе или после их применения. Стандарт не распространяется на методики поверки (калибровки) средств измерений, а также методики выполнения измерений, содержащиеся в руководствах по эксплуатации средств измерений утвержденных типов. В связи с таким образом сформулированной областью применения и другими положениями стандарта возникает несколько вопросов.

Во-первых, содержание стандарта свидетельствует о том, что он применим только к МВИ по метрическим и абсолютным шкалам. На неметрические шкалы порядка и наименований его распространять нельзя. К сожалению, это обстоятельство не указано в области распространения.

Во-вторых, стандарт не содержит рекомендаций, в каких случаях вместо «характеристик погрешности» следует пользоваться «неопределенностью» или их использовать совместно.

В-третьих, в стандарте дана слишком общая рекомендация предусматривать при разработке МВИ состава и свойств веществ и материалов эксперименты по оценке характеристик погрешности с учетом основных положений серии стандартов ГОСТ Р ИСО 5725. Такая рекомендация дает повод для необоснованных попыток применения всех положений ГОСТ Р ИСО 5725, даже когда отсутствует необходимость их практического применения при разработке и аттестации совсем новых МВИ.

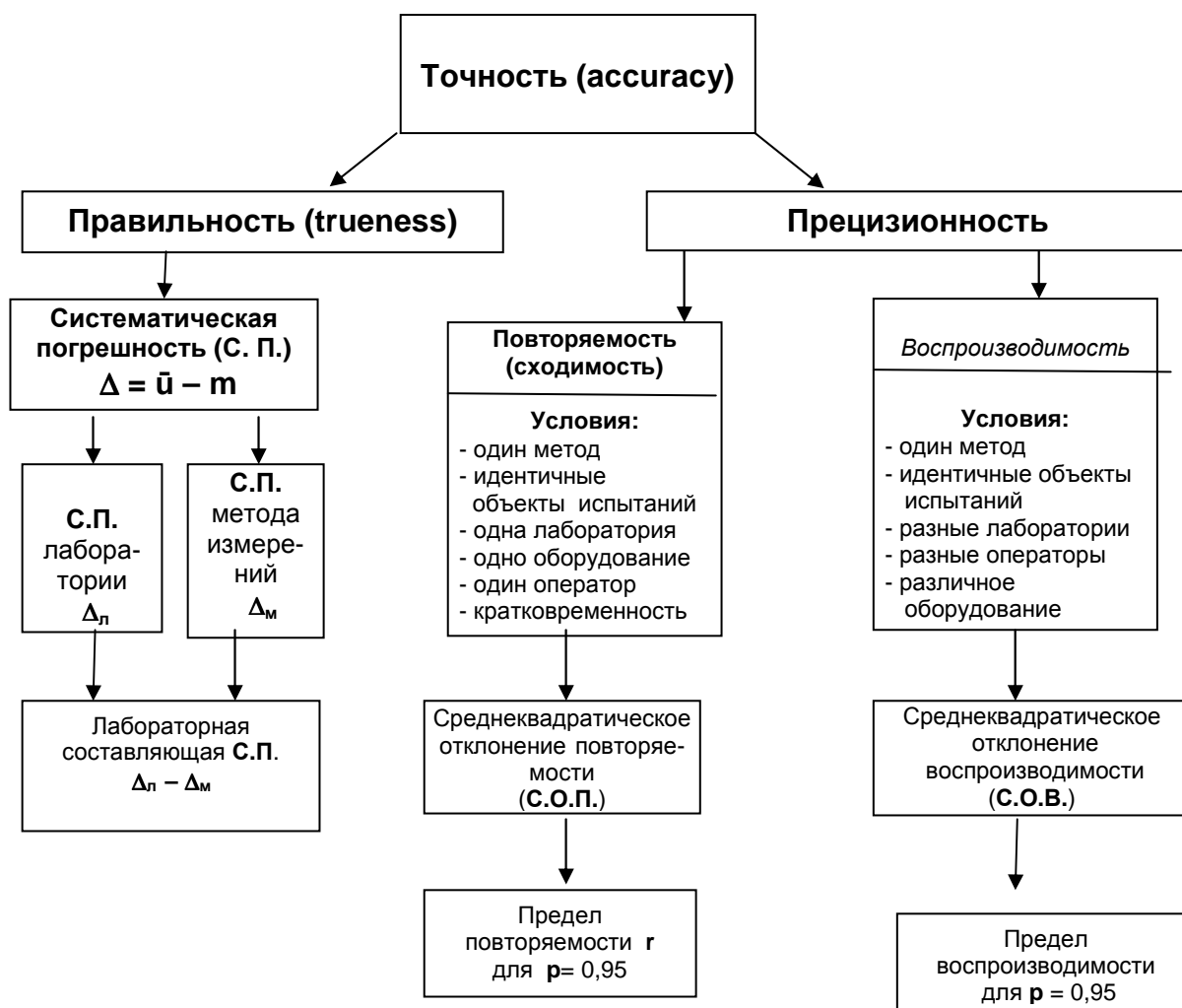


Рис.8.1. Иерархия понятий, используемых в комплексе стандартов
ГОСТ Р ИСО 5725-1.2.3.4.5.6-2002

Здесь: \bar{u} – среднее значение результатов серии измерений
 m – принятое опорное значение

К сожалению, в некоторых журнальных публикациях проявилась тенденция неправомерно распространения некоторых положений ГОСТ Р ИСО 5725 на все случаи разработки МВИ. Эти стандарты относятся к способам определения точности (правильности и прецизионности) стандартизованных методов измерений, для которых существуют нормативные документы, устанавливающие во всех подробностях, как должно выполняться измерение, включая описание процедур получения измерений (пункты 4.1.1 и 6.2 ГОСТ Р ИСО 5725). Здесь «стандартизованный метод измерений» фактически отождествляется с уже разработанной, стандартизованной и достаточно широко распространенной МВИ. Таким образом, эти стандарты, относящиеся к точности, прямо и в полном объеме не предназначены для применения при разработке любых новых МВИ. Основной процедурой для определения точности (правильности и прецизионности) результатов измерений по стандартизованным МВИ, являются широкомасштабные межлабораторные эксперименты (обычно от 8 до 15 лабораторий, желательно более 30 участвующих лабораторий в разных странах и климатических зонах на разных континентах). Такие эксперименты для рядового разработчика новой МВИ нереальны организационно и экономически.

Из рис. 8.1 видно, что одной, разрабатывающей МВИ, лаборатории возможно организовать эксперимент только по определению повторяемости (сходимости) и предварительных оценок промежуточных показателей прецизионности в условиях, когда наблюдения осуществляются в одной и той же лаборатории, но при этом один или большее число факторов – «время», «оператор» или «оборудование» – может меняться. Результаты такого эксперимента могут быть отражены в разделе «Прецизионность» МВИ и использованы для установления нормативов контроля точности результатов измерений в данной лаборатории. Экспериментальное определение же всех показателей точности (правильности и прецизионности) становится возможным после того,

как разработанная и стандартизованная МВИ начнет применяться в ряде лабораторий и появится опыт ее практического применения для измерения параметров конкретных видов продукции.

Основные варианты использования показателей точности (правильности и прецизионности) МВИ относятся к сфере испытаний продукции с использованием этой МВИ. По комплексу стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 значения правильности и прецизионности рекомендуется использовать:

- при проверке приемлемости результатов испытаний продукции и принятии решения о допустимых расхождениях значений результатов измерений у поставщика и покупателя продукции;
- для проверки стабильности результатов испытаний в пределах лаборатории и подтверждения таким образом ее компетентности при аккредитации;
- для сопоставления альтернативных МВИ.

Разработку или выбор МВИ рекомендуется начинать с анализа объекта, условий и цели измерений и установления соответствующей модели объекта измерений. Под моделью (содержащей физические, математические, структурные, смысловые и другие аспекты) объекта измерений или испытаний (ОИ) - понимают формализованное описание ОИ, основанное на совокупности уже имеющихся знаний о нем и достаточно однозначно и точно отражающее его свойства в рассматриваемых условиях и для поставленной цели. В составе измеряемых свойств (количественных и качественных – см. 2.2) следует выбирать такие параметры или характеристики модели ОИ, которые наиболее близко соответствуют цели измерения. Неполная адекватность отражения моделью свойств объекта является источником принципиальных погрешностей модели, для оценки которых экспериментальными или расчетными способами необходимо использовать все имеющиеся возможности.

Последовательность разработки МВИ (применяемых в сферах распространения ГМКиН), включающая экспертизу, аттестацию или стандартизацию МВИ, в общем виде показана на рис. 8.2.



Рис. 8.2. Последовательность разработки МВИ

При разработке МВИ необходимо иметь в виду следующее:

1. В определении МВИ предусматривается «получение результатов измерений с известной погрешностью». Но истинное значение погрешности всегда неизвестно, а на практике имеют дело только с приближенными оценками границ погрешности измерений. В Законе РФ "Об обеспечении единства измерений определено условие единства измерений - когда "погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью". Поэтому в определении МВИ слова "с установленной погрешностью" можно понимать только так: "с погрешностью, не вы-

ходящей за установленные границы с заданной вероятностью", т.е. $\Delta(P) \leq \Delta_r$, где $\Delta(P)$ – оценка погрешность результата измерений при доверительной вероятности P , Δ_r – допустимая граница погрешности.

Выполнение условия $\Delta(P) \leq \Delta_r$ практически обеспечивается в двух вариантах организации процедуры измерений. Первый вариант: выполнение операций по МВИ обеспечивает получение результата измерений с $\Delta(P) \leq \Delta_r$ во всем диапазоне измерений (Δ_r может зависеть от значения измеряемой величины); при этом $\Delta(P)$ не рассчитывается, а осуществляется регламентированный контроль точности. Второй вариант: в МВИ предусматривается при обработке результатов наблюдений вычисление по установленному алгоритму результата измерений и $\Delta(P)$, затем сравнение значения $\Delta(P)$ с Δ_r ; если $\Delta(P) > \Delta_r$, то измерения признаются неприемлемыми для использования, и их выполняют снова с использованием допустимого по МВИ способа достаточного уменьшения $\Delta(P)$ (за счет ужесточения условий измерений, применения разрешенных по МВИ более точных средств измерений, увеличения числа наблюдений и др.).

Поэтому представляется непринципиальным ограничение по нераспространению ГОСТ Р 8.563-96 "на МВИ, характеристики погрешности измерений, по которым определяются в процессе или после их применения". Более того, такое ограничение нерационально потому, что, как правило, у современной автоматизированной измерительной аппаратуры предусмотрена возможность программирования ее для вычисления характеристик погрешности измерений по результатам наблюдений. В случае применения МВИ для контроля предельных значений измеряемой величины $X_{пр}$, например, ПДК, должна иметься возможность изменения норматива Δ_r в связи с соотношением значений $\Delta(P)$, $X_{пр}$, и $X_{цзм}$ – результата измерений: если сумма значений $X_{изм}$ и $\Delta(P)$ не превышает $X_{пр}$ с некоторым оговоренным запасом, то такой результат измерений признается приемлемым. Таким образом, появляется возможность использования средств измерений различной точности для обеспечения достоверного контроля.

Согласно ГОСТ Р 8.563-96, порядок разработки экспертизы и аттестации МВИ, не используемых в сферах распространения ГМКИН, устанавливается отраслью или предприятием, разрабатывающими МВИ. Рациональный порядок разработки МВИ в этом случае показан на рис. 8.3.



Рис. 8.3. Рекомендуемая последовательность разработки МВИ отраслью или предприятием

В практической деятельности нередко возникает необходимость разработки и аттестации широкого класса МВИ, используемых в качестве аттестованных методик испытаний (см. ГОСТ 16504-81). При разработке и аттестации таких методик необходимо рассматривать еще и допол-

нительные составляющие погрешности результата измерений при испытаниях, которые возникают за счет установленных допусков на параметры "воздействующих факторов и режимов функционирования объекта при испытаниях" (условий испытаний). Например, при измерениях светового потока испытываемой электрической лампы в $\Delta(P)$ необходимо учитывать вариации светового потока из-за допустимых во время испытаний отклонений от номинального значения электрического напряжения на лампе.

Многие МВИ, успешно применяемые в сферах государственного метрологического контроля и надзора и аттестованные в составе действующих стандартов и других НД на методы испытаний, не содержат формализованного условия $\Delta(P) < \Delta_r$ или опираются на неметрические шкалы измерений (шкалы порядка и наименований), не содержащие единиц измерений.

Например, такие МВИ применяются при измерениях твердости по ряду международных шкал, при измерениях цвета (полиграфической продукции, включая банкноты) по рекомендациям МКО, уровня шума (в целях охраны здоровья) по рекомендациям МЭК и ГОСТ, аудиограмм (при оценке потери слуха) по рекомендациям МЭК, светочувствительности фотоматериалов по шкалам ИСО и ГОСТ, октанового числа нефтепродуктов по ГОСТ, числа падения (показатель качества зерна и муки, влияющий на их цену) по стандарту ИСО и т.д. К результатам измерений по таким шкалам неприменимы понятие погрешности измерений (в принятом по определению смысле) и рекомендации ГОСТ Р 8.563-96 по методологии обработки результатов наблюдений, но в соответствующих МВИ имеются конкретные специфические способы оценки неопределенности результатов измерений и испытаний. Необходимо отметить еще раз, что ГОСТ Р 8.563-96 не может распространяться на аттестацию МВИ по неметрическим шкалам.

Представляется организационно неправомерным указание в ГОСТ Р 8.563-96 о проверке при осуществлении государственного метрологического надзора наличия в организациях (предприятиях) планов (графиков) отмены и пересмотра документов на МВИ. При бездумном выполнении этого требования возникнет нелепая ситуация: одна и та же МВИ попадет в планы пересмотра многих организаций.

Следует также предостеречь от попыток ревизовать МВИ, аттестованные в виде разделов эксплуатационной документации на средства измерений, прошедшие испытания с целью утверждения типа и занесенные в Госреестр. Такие попытки могут поставить под сомнение результаты испытаний, а следовательно, и сам Госреестр средств измерений.

Для правильного выбора способа (способов) представления результата измерения в МВИ необходимо знать, каким типам шкал измерений соответствуют измеряемые свойства (величины) и соответствующие единицы. Эта процедура, отсутствующая в стандартных руководствах по выполнению измерений, очень важна. Она должна предшествовать всем привычным процедурам.

8.2. Метрологическая экспертиза технологий на основе теории шкал измерений

Значимость и роль этапа метрологической экспертизы (МЭ) любых технологий, в том числе информационных, далеко не всегда оценивается достаточно объективно и адекватно. Нередко встречаются попытки либо вообще исключить МЭ из процесса разработки и утверждения технологии, либо свести ее к простой формальности. Результаты из-за этого бывают неудовлетворительными: хорошо задуманные технологии либо не работают вообще, либо не дают ожидаемого эффекта. Причина в том, что ни одна технология не может быть эффективной, если она не опирается на достоверную первичную измерительную информацию и логически обоснованные процедуры и алгоритмы ее обработки.

Не менее важна и обоснованная, рациональная методология выполнения метрологической экспертизы. Она должна базироваться на теории шкал измерений и включать в качестве основного элемента анализ логической структуры качественных и количественных измеряемых свойств. Исследования показали, что в информационных и других технологиях используются как метрические (отношений и разностей) и абсолютные шкалы, так и неметрические шкалы (порядка и наименований). При этом встречаются случаи использования в информационных технологиях неправомерных способов обработки и представления результатов измерений, особенно в неметрических шкалах. Алгоритм метрологического анализа информационных и других технологий предполагает выявление совокупности свойств, используемых в данной технологии, их классификацию по видам свойств и используемым шкалам измерений, допустимым методам представления и интерпретации результатов.

Совокупность проявлений какого-либо свойства образует множество, элементы которого находятся в определенных логических соотношениях, которые являются основой классификации (см. 2.2).

В ходе метрологического анализа конкретной технологии необходимо:

а). Выявить совокупность свойств, используемых на разных этапах технологии. Имеются в виду и количественные, и качественные свойства моделей объектов, явлений, процедур, состояний, присутствующих в поэтапном описании технологии.

б). Проклассифицировать свойства по их логической структуре в соответствии с положениями раздела 2.2.

в). По классификационной таблице шкал определить виды используемых шкал измерений с учетом логической структуры соответствующих свойств (см.2.4).

г). По шкалам измерений определить совокупность необходимых средств измерений и методик измерений.

д). Убедиться в прослеживаемости всех видов средств измерений по пункту г) до государственных эталонов, используя соответствующие поверочные схемы. Для видов измерений, выполняемых без эталонов, убедиться в однозначности определений соответствующих шкал измерений и соответствии их логической структуре измеряемых свойств и наличии стандартизованных методик выполнения измерений.

е). Определить требования к допустимым способам описания результатов измерений, нормам погрешностей и допустимым уровням неопределенностей измерений по всем видам по г) и д). Убедиться в логическом соответствии алгоритмов выполнения измерений, используемым шкалам измерений.

ж). Используя справочные материалы, включая Государственный реестр средств измерений, определить требуемую для реализации технологии совокупность рабочих средств измерений, убедиться в наличии методик их поверки.

з). Проанализировать логическую правомочность интерпретации результатов измерений на разных этапах технологии, особенно заключительных, в которых обычно осуществляется свертка многомерных данных до обобщенных показателей, индексов и т.п., которым обычно соответствуют шкалы порядка, и в которых нет смысла говорить о единицах измерений и процентах изменений.

и). Сформулировать заключение о соответствии технологии метрологическим требованиям, базирующимся на теории шкал измерений.

Актуальность МЭ обострилась в связи с появлением закона Российской Федерации «О техническом регулировании» (27.12.2002, №184-ФЗ), которым предусмотрена разработка узаконенных документов нового для России типа – технических регламентов. Технические регламенты будут приниматься для целей: защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества, охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений, предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей. Технические регламенты с учётом степени риска причинения вреда должны устанавливать минимально необходимые требования, обеспечивающие: безопасность излучений, биологическую безопасность, взрывобезопасность, пожарную, промышленную, механическую, термическую, химическую, электрическую, ядерную и радиационную безопасности, а также электромагнитную совместимость и единство измерений. Норма минимально необходимых требований безопасности может быть различной на различных стадиях жизненного цикла продукции. Другими словами, для каждого вида продукции, очевидно, понадобится некая шкала значений безопасности для различных стадий её жизненного цикла. В ряде случаев естественно будут использованы существующие метрические шкалы для регламентации норм безопасности. Но для значительной части продукции эти нормы могут быть выражены только в неметрических шкалах порядка или наименований, причём во многих случаях эти шкалы должны быть многомерными.

8.3. Поверка и калибровка средств измерений

В каждой науке существуют определенные, регулярно применяемые термины и их определения. Правильное понимание терминов способствует взаимопониманию между специалистами как внутри страны, так и при международном сотрудничестве. Естественно, с развитием любой науки происходит уточнение определений терминов, часть из них выходит из употребления, другие меняют свое значение, иногда определение терминов уточняется для идентичного их понимания и применения в международном сотрудничестве. В последние годы такому уточнению подверглись термины «поверка» и «калибровка». В законе РФ «Об обеспечении единства измерений» (закон ОЕИ) приведены следующие определения этих понятий:

Поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с

целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям.

Калибровка средства измерений – совокупность операций, выполняемых с целью определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не подлежащего метрологическому контролю и надзору.

Рассмотрим смысл терминов «поверки» и «калибровки». При этом будем иметь в виду научно-технический и правовой аспекты этих понятий, следующих из их определений в законе ОЕИ с учетом закона Российской Федерации «О техническом регулировании», в котором установлены понятия: «Оценка соответствия – прямое или косвенное определение соблюдения требований, предъявляемых к объекту»; «подтверждение соответствия – документальное удостоверение соответствия продукции или иных объектов, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации, выполнения работ или оказания услуг требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров» (статья 2); «обязательное подтверждение соответствия» (статья 20); «добровольное подтверждение соответствия» (статья 21). Будем иметь в виду и положения стандарта ISO 10012:2003 (Е) и резолюции ГКМВ о процедуре калибровки.

Прежде всего из закона ОЕИ следует, что для средств измерений в зависимости от сферы их применения установлены разные этапы признания их метрологической пригодности в процессах производства, ремонта и эксплуатации, как это показано на рис 8.4.

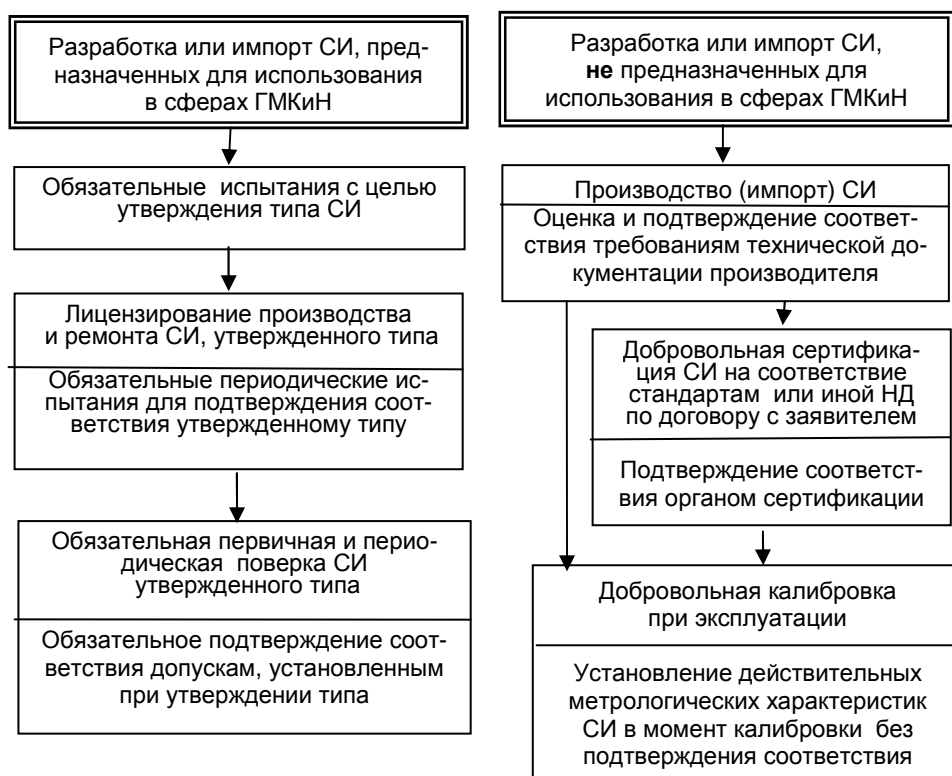


Рис 8.4. Схема правовых аспектов поверки и калибровки СИ

К схеме рис. 8.4 необходимо дать более развернутые пояснения, имея в виду актуальность и важность вопроса для практической метрологии.

Поверка средств измерений (СИ), в том числе эталонов, является одной из составных частей (форм) государственного метрологического контроля (статья 12 закона ОЕИ). Поверке подвергаются СИ, подлежащие ГМКиН - государственному метрологическому контролю и надзору (статья 15 закона ОЕИ), иными словами, применяющиеся в сфере распространения государственного метрологического контроля и надзора (статья 13 закона ОЕИ) и прошедшие обязательные испытания с целью утверждения типа (статья 14 закона ОЕИ). Дополнительно такие СИ могут пройти добровольную сертификацию (статья 24 закона ОЕИ). Это относится как к серийным СИ,

так и к единичным экземплярам СИ, прошедшим испытания с целью утверждения типа по упрощенной процедуре (ПР 50.2.009-94).

Теперь перейдем к калибровке СИ. Статья 23 закона ОЕИ гласит, что СИ, не подлежащие поверке, могут подвергаться калибровке при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при эксплуатации, прокате и продаже. Калибровке могут также подвергаться СИ прошедшие добровольную сертификацию (статья 24 закона ОЕИ). В совокупности с упомянутыми выше статьями это означает, что прошедшие калибровку СИ не применимы в сфере государственного метрологического контроля и надзора, а СИ, прошедшие испытания с целью утверждения типа, могут и поверяться, и калиброваться, и применяться без ограничения везде. Отсюда, кстати, следует практический совет производителям СИ: не жалеть затрат средств и времени на проведение испытаний с целью утверждения типа. Они окупятся. Порядок выполнения калибровок СИ установлен в ПР50.2.016-94. В соответствии с этим документом очень важно положение (п.2.3.2. ПР 50.2.016-94), что средства, применяемые для калибровки СИ (рабочие эталоны), должны иметь действующие свидетельства о поверке. Существенным является и то, что при рассмотрении споров в суде, арбитражном суде, государственных органах управления РФ результаты калибровки, оформленные надлежащим образом, могут быть использованы в качестве доказательства (ст. 23 закона ОЕИ).

Подчеркнем еще один момент: предприятие-собственник СИ само определяет номенклатуру СИ, охватываемых сферой государственного метрологического контроля и надзора (руководствуясь законом и подзаконными актами к нему) и номенклатуру СИ, не используемых в этой сфере. Иными словами, не все СИ, прошедшие испытания с целью утверждения типа, должны обязательно поверяться. Часть их может калиброваться без права применения в сферах ГМКиН до возобновления их поверки.

У сотрудников метрологических служб, выполняющих калибровку СИ, возникает ряд вопросов, которые можно назвать типовыми. Попробуем на них ответить. Вопрос первый. Может ли один и тот же экземпляр СИ (естественно, включенный в Госреестр) одновременно быть и поверен и откалиброван? Да, может (если эти две операции оплачены как независимые). Такое СИ, например, может быть использовано при выполнении выходного контроля (по результатам поверки) и при внутреннем контроле, скажем, хода технологического процесса (по результатам калибровки).

Второй вопрос. Существует ли аналогично межповерочному интервалу межкалибровочный интервал. До сих пор действует МИ 2187-92 «ГСИ. Межповерочные и межкалибровочные интервалы средств измерений. Методика определения». Этот документ вышел в свет до принятия закона ОЕИ. Он содержит несколько другую трактовку термина «калибровка». Это – градуировка, выполняемая в процессе поверки СИ. В этой трактовке межкалибровочный интервал вполне уместен, даже необходим. Рассмотрим МИ 2277-93 «Система сертификации СИ». Документ утвержден через два месяца после закона ОЕИ. В пункте 5.2.3 читаем: в процессе испытаний апробируется методика калибровки СИ. Методика должна содержать рекомендации по установлению межкалибровочного интервала. Теперь вернемся к ПР50.2.016-94. С одной стороны в п.2.8.2 читаем: Протоколы с результатами калибровки хранятся не менее срока до следующей калибровки. Однако в том же пункте написано: протоколы с результатами калибровки СИ, для которых не установлен срок следующей калибровки, хранятся не менее одного года. А в форме сертификата о калибровке СИ графа о сроке его действия вообще отсутствует. И, наконец, РМГ 29-99 содержит термин «межповерочный интервал» (п. 13.17), но не содержит термин «межкалибровочный интервал».

Какой же логически непротиворечивый вывод можно сделать из изложенного. По результатам калибровки можно рекомендовать владельцу СИ срок следующей калибровки (межкалибровочный интервал времени), если сам владелец в этом заинтересован и если для этого у калибровочной лаборатории есть основания (данные о долговременной стабильности данного конкретного экземпляра СИ). Но никакой юридической ответственности за соблюдение этого срока и за поведение СИ в течение этого срока лаборатория, выполнившая калибровку, не несет.

В заключение попробуем максимально формализовано изложить процедуры поверки и калибровки СИ (табл. 8.1), состоящие, в общем случае, из измерительного эксперимента, получения результата измерительного эксперимента, оценки соответствия и оформления результата поверки или калибровки.

Сразу поясним несколько непривычное выражение «погрешность СИ, измеренная с расширенной неопределенностью», фигурирующее в табл. 8.1. Здесь имеется своеобразное косвенное измерение, как разность двух значений измеряемой величины. Это выражение, подчерки-

вающее конечную цель поверки (определение погрешности конкретного СИ в контрольной точке шкалы измерений), близко по смыслу встречавшемуся ранее в некоторых руководствах по метрологии выражению «погрешность определения погрешности». Использование в рассматриваемой ситуации понятия «неопределенность результата измерения» позволяет обойтись без трудно воспринимаемого и стилистически неудачного выражения «характеристика погрешности определения (измерения) погрешности».

Метрологические аспекты поверки и калибровки

Таблица 8.1

Вид процедуры	Вид средства измерений			
	Мера (М)	Измерительный преобразователь (ИП)	Измерительный прибор (П)	Градуируемое при поверке или калибровке СИ
Измерительный эксперимент				
При поверке и калибровке	Определение действительного значения меры сравнением с эталонной мерой	Определение действительной функции преобразования ИП путем измерений с использованием эталонов	Сравнение показаний прибора с показаниями эталона	Определение градуировочной характеристики с помощью эталонных средств
Результат измерительного эксперимента				
При поверке	Погрешность М (разность между номинальным и действительным значением меры), измеренная с расширенной неопределенностью U	Погрешность ИП (разность между номинальными и действительными значениями функции преобразования ИП), измеренная с расширенной неопределенностью U	Погрешность П (разность показаний П и эталона), измеренная с расширенной неопределенностью U	Значения градуировочной характеристики СИ, измеренные с расширенными неопределенностями U
При калибровке	Действительное значение М с расширенной неопределенностью его измерения	Действительные значения функции преобразования с расширенной неопределенностью их измерения	Значения поправок к показаниям прибора и расширенные неопределенности измерения этих поправок	Значения градуировочной характеристики СИ и расширенные неопределенности измерения этих значений
Оценка соответствия				
При поверке	Погрешность СИ с учетом U не выходит за установленные пределы допускаемой погрешности			Нестабильность СИ за межповерочный интервал (разности значений предыдущей и настоящей градуировочных характеристики) не выходит за установленные пределы с учетом неопределенности обеих градуировок
При калибровке	Оценка соответствия не проводится			
Оформление результатов				
При поверке	Подтверждение соответствия оформлением свидетельства о поверке, подтверждающим прогнозируемое на межповерочный интервал соответствие СИ требованиям по пределам погрешностей (по нестабильности градуировочной характеристики для градуируемых СИ)			
При калибровке	Оформление сертификата калибровки, не являющегося документом обязательного подтверждения соответствия (см. резолюцию 11 XXII ГКМВ, 2003 г.)			

Прогнозируемое на межповерочный интервал соответствие СИ требованию по пределам погрешностей (по нестабильности за межповерочный интервал для градуируемых СИ) опирается на результаты предшествующих испытаний СИ с целью утверждения типа с утверждением методики поверки и межповерочного интервала.

Формулировка действий в этапах поверки ориентирована на СИ, у которых доминирует систематическая погрешность, определяемая в эксперименте, а случайная составляющая по-

грешности операционно входит в суммарную расширенную неопределенность измерения. Такая ситуация обычна для большинства видов современных средств измерений и для них систематическая погрешность фактически совпадает с общей погрешностью. Для СИ, у которых систематическая погрешность не обнаруживается в эксперименте на фоне доминирующей расширенной неопределенности измерения, при оценке соответствия используется критерий: U не выходит за установленные пределы допускаемой погрешности.

Возникает вопрос: как учитывать неопределенность измерения при поверке на этапе подтверждения соответствия (см. рис. 8.5).

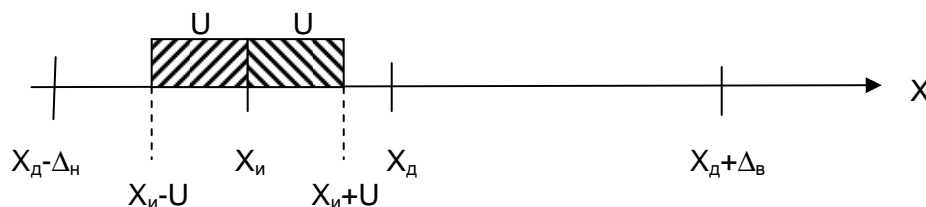


Рис 8.5. Схема учета неопределенности при подтверждении соответствия поверяемого СИ. Здесь: X_d – действительное значение (эталоны), X_i – показания поверяемого прибора (номинальные значения), Δ_n , Δ_v – нижний и верхний пределы допускаемой погрешности по НД на поверяемое СИ (обычно $\Delta_n = \Delta_v = \Delta$)

Обычно при подтверждении соответствия в Российской практике расширенной неопределенностью U пренебрегают, если $U \leq \Delta/3$. Более надежный вариант критерия соответствия при поверке: годным считать СИ, если $|X_i - X_d| \leq \Delta - U$, т.е. уменьшение предела допускаемой погрешности на расширенную неопределенность. Возможны и промежуточные варианты критериев соответствия между этими двумя крайними вариантами

В сертификате калибровки, не являющемся документом обязательного подтверждения соответствия (см. резолюцию 11 XXII ГКМВ, 2003 г.), приводятся результирующие данные измерительного эксперимента. Сертификат не гарантирует длительную неизменность этих данных. Здесь уместно повторить, что при наличии сведений о результатах предшествовавших калибровок данного конкретного средства измерений в сертификате путем сравнения с ними результатов проведенной калибровки может быть сделан вывод о долговременной стабильности (или нестабильности) этого СИ, на основе которого потребитель может принять решение о межкалибровочном интервале времени. Подчеркнем, что неопределенность результата калибровки нельзя считать метрологической характеристикой СИ.

Изложенная интерпретация смысла понятий поверки и калибровки согласуется с основными положениями стандарта ISO 10012:2003 (Е).

Литература к главе 8

1. Guide to the expression of uncertainty in measurement. – ISO, 1995. – 10 p
2. РМГ 29-99. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации
3. International vocabulary of basic and general terms in metrology. Switzerland, Genève: ISO, 1993. – 59 p
4. Асташенков А.И., Заец Е.А., Исаев Л.К. Внедрение стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 – повышение качества измерений и испытаний // Законодательная и прикладная метрология. – 2002. – №6. – С. 2-7
5. Sommer K.–D., Chapptll S.E., Kochsiek M. Calibration and verification: two procedures having comparable objectives and results // OIML bulletin. – Vol. XLII. Number 1. – January 2001. – P.5-12
6. Дойников А.С. О соотношении понятий «погрешность» и «неопределенность» // Законодательная и прикладная метрология. – 2002. – №5. – С.46-49
- 7 ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений / Часть 1. Основные положения и определения. Часть 2. Основные методы определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений. Часть 4. Основные мето-

ды определения правильности стандартного метода измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике

8 ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

9 МИ 1317-86. ГСИ. Результаты измерений и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров

10 ISO 3534-1-1993. Statistics.—Vocabulary and symbols. Part 1; Statistical methods. Terms and definitions

11 ГОСТ 16504-81. СГИП. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения

12 МИ 2277-93. ГСИ. Система сертификации средств измерений. Основные положения и порядок проведения работ

13 РМГ 43-2001. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»

14 ГОСТ 8.326-89 ГСИ. Метрологическая аттестация средств измерений.

15 ISO 10012.2003(E) Measurement management systems – Requirements for measurement processes and measurement equipment

16 Resolution 11. Relationship between National Metrology Institutes and nationally recognized accreditation bodies // Text of the Resolutions adopted by the 22nd General Conference on Weights and Measures (2003)

17 Брянский Л.Н. Дойников А.С. Крупин Б.Н. Возможная интерпретация основных положений ГОСТ 8.563-96 "Методики выполнения измерений"// Законодательная и прикладная метрология.— 1997.— №2. — С. 24-25

18 Брянский Л.Н. Дойников А.С. Крупин Б.Н. Принципы проведения метрологической экспертизы экологических проектов // Законодательная и прикладная метрология.— 1997.— №4. — С. 22-2

Приложение

ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕОРИИ ШКАЛ ИЗМЕРЕНИЙ

Величина измеряемая (величина) – измеряемое свойство, характеризующее количественными различиями.

Примечание. Понятие "величина" не применимо к качественным свойствам, описываемым шкалами наименований.

Воспроизведение (шкалы или единицы измерений) – совокупность операций, имеющих целью воссоздание шкалы измерений (или ее участка) или размера единицы, соответствующих их спецификации (определению).

Градуировка средств измерений (градуировка) – экспериментальное определение градуировочной характеристики средства измерений, т.е. установление соответствия между сигналами измерительной информации (отсчетами) и шкалой измерений.

Примечание. Операции градуировки используются как при поверке, так и при калибровке. При этом могут устанавливаться поправки к показаниям градуируемых средств измерений.

Диапазон шкалы измерений – пределы изменений значений измеряемого свойства, ох-

ватываемые данной конкретной реализацией шкалы.

Единица измерений – величина фиксированного размера, для которой условно (по определению) принято числовое значение, равное 1.

Примечания: 1. Термин "единица величины" является синонимом термина "единицы измерений".

2. Термин "единица физической величины", обозначающий более узкое понятие, применять не рекомендуется, так как невозможно определить границы его применения.

3. Понятие "единица измерений" не имеет смысла для свойств, описываемых шкалами наименований и порядка.

Единица измерений абсолютная – единица измерения величины, описываемой абсолютной шкалой, размер которой однозначно определяется безразмерным характером измеряемой величины.

Примечания: 1. В абсолютных единицах измеряются такие величины, как коэффициенты отражения, пропускания, усиления, ослабления и т.п.

2. Широко распространено применение дольных абсолютных единиц: процентов, промилле.

Единица измерений дольная – единица, в целое число раз меньшая системной или внесистемной единицы.

Примечание. В SI образуется с множителем 10 в степени минус n .

Единица измерений логарифмическая – единица измерений логарифмической шкалы.

Примечание. Получили распространение логарифмические единицы: бел, децибел, лог, непер, байт и др.

Единица измерения условная – единица, размер которой установлен по соглашению.

Примечание. Условными единицами измерений, в частности, являются основные единицы международной системы единиц (SI).

Единица когерентная производная – производная единица, связанная с другими основными и производными единицами системы уравнением, в котором числовой коэффициент равен 1.

Единица кратная – единица, в целое число раз большая системной или внесистемной единицы.

Примечание.

В SI образуется с множителем 10 в степени n .

Единицы внесистемные – единицы, не входящие в рассматриваемую систему единиц.

Примечание. Единица, внесистемная по отношению к некоторой системе, может быть системной по отношению к другой системе.

Единицы системные – единицы, входящие в одну из принятых систем единиц.

Единицы системы основные – единицы величин, размеры и размерности которых в данной системе единиц приняты за исходные при образовании размеров и размерностей производных единиц.

Примечание. Определения и процедуры воспроизведения некоторых основных единиц могут опираться на другие основные и производные единицы, а также на размерные и безразмерные константы.

Единицы системы производные – единицы величин, образованные в соответствии с уравнениями, связывающими их с основными единицами или основными и уже определенными производными

Единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в уза-

конечных единицах или шкалах измерений, а неопределенности (погрешности) результатов измерений не выходят за установленные границы (с заданной вероятностью).

Примечание. Данное определение понятия "единства измерений" не противоречит закону "Об обеспечении единства измерений" (статья 1), но распространяет его на шкалы наименований и порядка (см. "шкала измерений").

Значение величины – оценка размера величины по соответствующей ей шкале в виде некоторого числа принятых для нее единиц, чисел, баллов или иных количественных знаков (обозначений).

Примечание. Для качественных свойств аналогичным термином является "оценка свойства".

Значение величины действительное – значение величины, настолько близкое к истинному значению, что для данной цели может быть использована вместо нее.

Значение величины истинное – значение величины, которое идеальным образом отражает положение на соответствующей ей шкале реализации количественного свойства конкретного объекта деятельности.

Примечание. Для качественных свойств аналогичным термином является "истинная оценка свойства".

Измерение – сравнение конкретного проявления измеряемого свойства (измеряемой величины) со шкалой (частью шкалы) измерений этого свойства (величины) с целью получения результата измерения (значения величины или оценки свойства).

Калибровка средства измерений – совокупность операций, выполняемых с целью определения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению средства измерений, не применяемого в сфере, подлежащей государственному метрологическому контролю и надзору.

Примечание. Калибровка является метрологической услугой, основной задачей которой является передача калибруемому средству шкалы измерений в интересующем заказчика (потребителя) диапазоне измерений при приемлемой точности (неопределенности).

Компаратор – устройство, среда, объект, используемый для сравнения хранимых или воспроизводимых средствами измерений участков (точек) шкал измерений.

Примечание. Компаратор в совокупности с мерой может использоваться для измерений.

Мера – средство измерений, воспроизводящее и (или) хранящее одну или несколько точек шкалы измерений.

Примечание. Понятие меры применимо в шкалах, описывающих как количественные свойства (величины – "мера величины"), так и качественные свойства, например, "мера цвета" – стандартизованный образец цвета.

Мера многозначная – мера, воспроизводящая и (или) хранящая две или более точек шкалы.

Примечание. Многозначная мера может воспроизводить и (или) хранить некоторый участок шкалы. Пример: градуированный конденсатор переменной емкости.

Мера однозначная – мера, воспроизводящая и (или) хранящая одну точку шкалы.

Метод измерений – прием или совокупность приемов сравнения конкретного проявления измеряемого свойства (измеряемой величины) со шкалой измерений возможных проявлений этого свойства (величины).

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Метрология законодательная – раздел метрологии, включающий взаимосвязанные законодательные и научно-технические вопросы, нуждающиеся в регламентации со стороны государства и (или) мирового сообщества для обеспечения единства измерений.

Метрология практическая (прикладная) – раздел метрологии, в котором изучаются и разрабатываются вопросы практического применения положений теоретической и законодательной метрологии.

Метрология теоретическая – раздел метрологии, в котором изучаются и разрабатываются ее теоретические основы (теория измерений, теория шкал измерений, проблемы установления систем единиц измерений, вопросы использования в метрологии фундаментальных констант и др.).

Набор мер – комплект мер, воспроизводящих точки шкалы (шкал), применяемых как в отдельности, так и, если это имеет смысл, в различных сочетаниях.

Примеры: Наборы гирь, наборы мер твердости и цвета и т.д.

Неопределенности передачи шкалы – неопределенности результатов измерений, выполняемых при передаче шкалы.

Неопределенность воспроизведения шкалы – неопределенности результатов измерений, выполняемых при воспроизведении шкалы.

Неопределенность (результата) измерений – область (участок) шкалы измерений, связанный с результатом измерений и характеризующий разброс значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемому свойству и, в частности, измеряемой величине.

Неопределенность измерения величины – параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий разброс значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Неопределенность стандартная – неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднего квадратического отклонения (СКО).

Неопределенность стандартная суммарная – стандартная неопределенность результата измерений, полученная через значения других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется при изменении этих величин.

Неопределенность расширенная – величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине.

Ноль шкалы – элемент шкал порядка (некоторых), интервалов, отношений и абсолютных, их начальная точка.

Примечание. Различают естественный и условный нули шкал.

Ноль шкалы естественный – начальная точка шкалы, соответствующая стремящемуся к нулю количественному проявлению измеряемого свойства.

Ноль шкалы условный – точка шкалы разностей (интервалов) или шкалы порядка, которой по соглашению присвоено нулевое значение измеряемого свойства (величины).

Примечание. Шкала может простирается по обе стороны от точки условного нуля. Например, в наиболее распространенной календарной шкале за условный ноль принят день Рождества Христова. Поэтому общепринято обозначение "...лет до Рождества Христова".

Объект измерения – объект деятельности (тело, вещество, явление, процесс), одно или

несколько конкретных проявлений свойств которого подлежат измерению.

Примечание. Объектами измерений являются как физические, так и нефизические объекты.

Образец стандартный (вещества или материала) - мера специфического свойства (величины), в том числе характеризующего состав или значение величины (величин), для измерения которой необходимо учитывать особенности данного вещества (материала).

Примечания: 1. Стандартные образцы, в основном, применяются непосредственно при выполнении измерений, но могут применяться и как эталоны при поверке (калибровке) средств измерений.

2. Существуют стандартные образцы не количественных (качественных) свойств, например, в колориметрии, широко применяются наборы стандартных образцов цвета объектов – атласы цветов.

Оценка свойства – нахождение местоположения качественного свойства конкретного объекта деятельности на соответствующей шкале наименований.

Оценка свойства действительная – оценка свойства настолько близкая к истинной оценке, что для данной цели может быть использована вместо нее.

Оценка свойства истинная – оценка свойства, которая идеальным образом отражает положение на соответствующей шкале наименований реализации качественного свойства конкретного объекта деятельности.

Передача шкалы (или размера единицы измерений) – приведение шкалы (или ее участка) или размера единицы, хранимой поверяемым (калибруемым) эталоном или рабочим средством измерений, в соответствие со шкалой (размером единицы измерений), воспроизводимой или хранимой более точным (исходным) эталоном.

Поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средства измерений установленным техническим требованиям.

Примечания: 1. Поверке подвергаются средства измерений, применяемые в сфере распространения государственного метрологического контроля и надзора.

2. Как правило, основной операцией поверки является сравнение поверяемого средства измерений с более точным эталоном, применяемым при поверке. Этим самым осуществляется передача шкалы измерений рабочему средству измерений с регламентированной точностью. Часто при поверке производится градуировка поверяемого средства измерений по эталону.

Погрешности воспроизведения шкалы – погрешности результатов измерений, выполняемых при воспроизведении точек шкалы.

Погрешности передачи шкалы – погрешности результатов измерений, выполняемых при передаче точек шкалы.

Погрешность воспроизведения единицы измерений - погрешность воспроизведения какой-либо точки шкалы разностей, отношений или абсолютной.

Погрешность измерения абсолютная (абсолютная погрешность) – погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины.

Примечание. Термин "абсолютная погрешность" применим к результатам измерений в шкалах разностей (интервалов), отношений и абсолютных.

Погрешность измерения относительная (относительная погрешность) – погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к значению измеряемой величины.

Примечания: 1. Распространено представление относительной погрешности в процентах.

2. Понятие "относительная погрешность" применимо в измерениях величин по шкалам отношений и абсолютным шкалам, а также к интервалам величин, описываемых шкалами разностей (интервалов). Однако к самим величинам, описываемым шкалами разностей, это понятие не применимо. Например, бессмысленно (невозможно) выражать в процентах погрешность измерения температуры по шкале Цельсия или погрешность датировки события.

Погрешность передачи размера единицы измерений – погрешность передачи какой-либо точки шкалы разностей, отношений или абсолютной.

Погрешность результата измерений (погрешность измерений) – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Примечания: 1. На практике всегда имеют дело с приближенной оценкой погрешности измерений, чаще всего получаемой как отклонение от действительного значения.

2. Термин "погрешность измерений" не всегда применим к результатам измерений в шкалах порядка и наименований, где преимущественно применяется понятие "неопределенность результата измерений".

3. Различают по различным классификационным признакам погрешности измерений и их составляющие: систематические и случайные, инструментальные, метода измерений, абсолютные и относительные и др.

Преобразователь измерительный – средство измерений или его часть, служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине (измеряемом свойстве) в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Прибор измерительный – средство измерений, предназначенное для получения значения измеряемой величины или оценки свойства в установленном диапазоне (участке) шкалы измерений.

Примечание. Измерительный прибор, как правило, содержит меру и устройства для преобразования измеряемой величины (измеряемого свойства) в сигнал измерительной информации и его индикации в форме, доступной для восприятия.

Принцип измерений – явление или эффект, положенные в основу метода измерений.

Размах наблюдений при измерении – оценка R_n рассеяния результатов наблюдений измеряемой величины, образующих ряд (или выборку из n наблюдений), вычисляемая по формуле

$$R_n = x_{\max} - x_{\min},$$

где x_{\max} и x_{\min} – наибольшее и наименьшее значение величины в данном ряду наблюдений.

Размер величины – количественная определенность измеряемой величины, присущая конкретному объекту деятельности.

Размер единицы – размер величины, принятой за единицу измерения.

Результат измерения – оценка свойства (значение величины), полученные путем измерений.

Примечания: 1. За результат измерения в шкалах разностей (интервалов), отношений и абсолютных, чаще всего принимают среднее арифметическое из ряда результатов равно-точных наблюдений.

2. В шкалах порядка за результат измерения применяют медиану результатов ряда наблюдений, но нельзя принимать среднее арифметическое.

3. Результат измерения в шкалах наименований выражается эквивалентностью конкретного проявления свойства точке или классу эквивалентности соответствующей шкалы.

4. Результат измерения должен также содержать информацию о его неопределенности (погрешности).

Свойство измеряемое – проявления общего для объектов (тел, веществ, явлений, процессов) свойства, выделенного для познания и использования.

Примечание. Измеряют количественные и качественные свойства не только физических, но и нефизических объектов (биологических, психологических, социальных, экономических и др.).

Система единиц (измерений) – совокупность основных и производных единиц измерений, образованная в соответствии с принятыми по договоренности правилами (принципами).

Примечание. Термин "система единиц физических величин" не вполне корректен, так как известные системы единиц, например, международная (SI), охватывают не только физические величины, но и геометрические (плоский и телесный углы), световые.

Система единиц когерентная – система единиц, состоящая из основных и когерентных производных единиц.

Примечание. Примером когерентной системы единиц является международная система единиц – SI.

Спецификация шкалы измерений – принятый по соглашению документ, в котором дано определение шкалы и (или) описание правил и процедур воспроизведения данной шкалы (или единицы шкалы, если она существует).

Примечания: 1. Некоторые метрические шкалы, например, шкалы массы и длины, полностью специфицируются стандартизованными определениями единиц измерений.

2. Спецификации многих, даже метрических, шкал, кроме определения единиц измерений, содержат дополнительные положения. Например, спецификация шкалы световых измерений содержит не только определение единицы измерения яркости – канделы, но и табулированную функцию относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения.

Средство измерений – объект, предназначенный для выполнения измерений, имеющий нормированные метрологические характеристики, воспроизводящий и (или) хранящий какую-либо часть (точку) шкалы с установленной погрешностью (неопределенностью) в течение заданного интервала времени.

Тип шкалы – классификационный признак данной шкалы измерений, характеризующий совокупность присущих ей логических соотношений.

Шкала разностей (интервалов) – шкала измерений количественного свойства, характеризующаяся соотношениями эквивалентности, порядка, суммирования интервалов различных проявлений свойства.

Примечание. Отличительные признаки шкал разностей: наличие устанавливаемых по соглашению нуля и единицы измерений, применимость понятия "размерность", допустимость линейных преобразований, реализация только посредством эталонов, допустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

Шкала абсолютная – шкала отношений (пропорциональная или аддитивная) безразмерной величины.

Примечания: 1. Отличительные признаки абсолютных шкал: наличие естественных (не зависящих от принятой системы) единиц нуля и безразмерной единицы измерений, допустимость только тождественных преобразований, реализация как с помощью эталонов, так и без них, допустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

2. Результаты измерений в абсолютных шкалах могут выражаться не только в безразмерных единицах, но и в процентах, промиллях, децибелах, битах (см. логарифмические шкалы).

3. Единицы абсолютных шкал могут применяться в сочетании с размерными единицами других шкал. Пример - плотность записи информации в бит/см.

4. Разновидностью абсолютных шкал являются дискретные (целочисленные, счетные, квантованные) шкалы, в которых результат измерения выражается безразмерным числом

частиц, квантов или других единичных объектов, эквивалентных по количественному проявлению измеряемого свойства. Например, значение электрического заряда выражается числом электронов, значение энергии монохроматического электромагнитного излучения – числом квантов (фотонов). Иногда за единицу измерения в таких шкалах принимают какое-то определенное число частиц (квантов), например, один моль, т.е. число частиц, равное числу Авогадро со специальным названием (Фарадей, Эйнштейн).

Шкала абсолютная ограниченная – абсолютная шкала, диапазон значений которой находится в пределах от нуля до единицы (или некоторого предельного значения по спецификации шкалы).

Шкала биофизическая – шкала измерений свойств физического фактора (стимула), модифицированная таким образом, чтобы по результатам измерений этих свойств можно было прогнозировать уровень или характер реакции биологического объекта на действие этого фактора.

Шкала величины – шкала измерений количественного свойства.

Шкала измерений (шкала) – отображение множества различных проявлений качественно-го или количественного свойства на принятое по соглашению упорядоченное множество чисел или другую систему логически связанных знаков (обозначений).

Примечания: 1. Понятие шкала измерений (кратко – шкала) не следует отождествлять с отсчетным устройством (шкалой) средства измерений.

2. Различают пять основных типов шкал: наименований, порядка, разностей (интервалов), отношений и абсолютные.

3. Примерами систем знаков, образующих шкалы измерений, являются множество баллов оценки свойств объектов, множество обозначений (названий) цвета объекта, множество названий состояния объекта, совокупность классификационных символов или понятий и т.п.

4. Шкалы разностей и отношений объединяют термином метрические шкалы.

5. Различают одномерные и многомерные шкалы измерений.

Шкала логарифмическая – шкала, построенная на основе логарифмического преобразования шкал отношений, абсолютных и интервалов, шкал разностей.

Примечания: 1. Для построения логарифмических шкал обычно используются системы десятичных или натуральных логарифмов, а также система логарифмов с основанием два.

2. При логарифмическом преобразовании шкал отношений величины делятся на некоторое опорное, принятое по соглашению значение.

Шкала логарифмическая абсолютная – логарифмическая шкала измерений, получаемая логарифмическим преобразованием абсолютных шкал, когда в выражении $L = \log X$ под знаком логарифма X – безразмерная величина, описываемая абсолютной шкалой.

Примечание. Другое название этой разновидности шкалы – логарифмическая шкала с плавающим нулем.

Шкала многомерная – шкала, используемая для измерения свойства объекта, характеризуемая двумя или более параметрами; результаты измерения в такой шкале выражаются двумя или более числами или знаками (обозначениями).

Примечания: 1. Некоторые свойства в принципе невозможно описать одним параметром. Например, импеданс и комплексный коэффициент отражения описываются двумя параметрами, образующими двумерные шкалы; цвет описывается тремя координатами в моделях цветовых пространств, образующими трехмерные шкалы.

2. Многомерные шкалы могут быть образованы сочетанием шкал различных типов.

Шкала наименований – шкала измерений качественного свойства, характеризующаяся только соотношением эквивалентности различных проявлений этого свойства.

Примечания: 1. Множество проявлений (реализаций) качественного свойства может быть упорядочено по признаку близости (сходства) и (или) по признаку возможных количественных различий в некоторых подмножествах проявления свойства. Например, шкалы измерений цвета опираются на трехкоординатную модель цветового пространства, упорядоченную по цветовым различиям (качественный признак), и яркость (количественный признак). Отли-

чительные признаки шкал наименований: неприменимость в них понятий: нуля, единицы измерений, размерности; допустимость только изоморфных или гомоморфных преобразований; возможность реализации как с помощью эталонов, так и без них; недопустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы. Чаще всего шкалы наименований определяются рядом "классов эквивалентности".

Шкала одномерная – шкала, используемая для измерения свойства объекта, характеризуемого одним параметром; результаты измерения в такой шкале выражаются одним числом или знаком (обозначением).

Шкала отношений – шкала измерений количественного свойства, характеризующаяся соотношениями эквивалентности, порядка, пропорциональности (допускающими в ряде случаев операцию суммирования) различных проявлений свойства.

Примечания: 1. Отличительные признаки шкал отношений: наличие естественного нуля и устанавливаемой по соглашению единицы измерений, применимость понятия "размерность", допустимость масштабных преобразований, реализация только посредством эталонов, допустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

2. Шкалы отношений, в которых не имеет смысла операция суммирования, называются "пропорциональными шкалами отношений", а шкалы, в которых эта операция имеет смысл, называют "аддитивными шкалами отношений". Например, шкала термодинамических температур – пропорциональная, шкала масс – аддитивная.

Шкала порядка – шкала количественного свойства, характеризующаяся соотношениями эквивалентности и порядка по возрастанию (убыванию) различных проявлений свойства.

Примечание. Отличительные признаки шкал порядка: неприменимость в них понятия единица измерений и размерность, необязательность наличия нуля, допустимость любых монотонных преобразований, возможность реализации как с помощью эталонов, так и без них, недопустимость изменения спецификаций, описывающих конкретные шкалы.

Шкала разностей логарифмическая – логарифмическая шкала измерений, получаемая при логарифмическом преобразовании величины, описываемой шкалой отношений, или интервала в шкале разностей, т.е. шкала, определяемая зависимостью $L = \log (X/X_0)$, где X – текущее, а X_0 – принятое по соглашению опорное значение преобразуемой величины.

Примечание. Выбор опорного значения X определяет нулевую точку логарифмической шкалы разностей.

Шкала средства измерений – часть отсчетного устройства средства измерений, представляющая собой упорядоченный ряд оцифрованных отметок, соответствующих хранимой и (или) воспроизводимой части шкалы.

Элементы шкал измерений – основные понятия, необходимые для определения шкал: класс эквивалентности, нуль, условный нуль, условная единица измерений, естественная (безразмерная) единица измерений, диапазон шкалы измерений.

Эталон (шкалы или единицы измерений) – устройство, предназначенное и утвержденное для воспроизведения и (или) хранения и передачи шкалы или размера единицы измерений средствами измерений.

Примечание. В законе РФ "Об обеспечении единства измерений" используется термин "эталон единицы величины", по смыслу соответствующий термину "эталон шкалы или единицы измерений".

Эталон вторичный – эталон, которому путем сличения передается шкала или размер единицы от соответствующего первичного эталона для последующей передачи рабочим эталонам и другим средствам измерений.

Эталон государственный – эталон, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории государства.

Примечание. При международных сличениях государственные эталоны и другие, при-

надлежащие отдельным государствам, эталоны принято называть "национальными эталонами".

Эталон международный – эталон, принятый по международному соглашению в качестве первичного международного эталона и служащий для согласования с ним шкал и размеров единиц измерений, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами.

Эталон первичный – эталон, предназначенный для передачи шкалы или (и) размера единицы измерений вторичным и (или) рабочим эталонам, а также высокоточным средствам измерений.

Эталон-переносчик – пригодный для транспортирования эталон, конструктивно предназначенный для передачи шкалы или размера единицы поверяемому или калибруемому рабочему эталону или средству измерений на месте его эксплуатации.

Эталон рабочий – эталон, предназначенный для передачи шкалы (или размера единицы) рабочим эталонам низших разрядов (образцовым средствам измерений) и рабочим средствам измерений.

Примечания: 1. Рабочие эталоны могут по иерархической подчиненности подразделяться на рабочие эталоны 1, 2-го и т.д. разрядов.

2. Рабочие эталоны применяются для поверки и калибровки средств измерений.

Эталон сравнения – эталон, применяемый для сличения эталонов, которые не могут быть по разным причинам непосредственно сличены друг с другом.

Эталон шкалы измерений – эталон, воспроизводящий всю или какую-либо часть шкалы измерений.

Примечания: 1. Эталон может воспроизводить одну точку шкалы (одно фиксированное значение величины) – см. эталон единицы измерений.

2. В шкалах наименований и порядка эталоны обязательно воспроизводят целиком практически используемый участок шкалы.

Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н.

Метрология. Шкалы, эталоны, практика

Редакторы:
Васильева Т.Н.
Ефреева Т.С.

Компьютерная верстка
Крупин Б.Н.

ФГУП ВНИИФТРИ. ИД №01414 от 30.03.2000 г.

Подписано в печать 5.04.2004 г.

Формат 70×108 1/16. Уч.–изд. л. 14,4

Печать офсетная. Бум. офсетная. Тираж 1000 экз. Заказ № 160

Полиграфучасток ФГУП ВНИИФТРИ, п/о Менделеево,
Солнечногорского р-на, Московской обл.