

А. Г. Сергеев

МЕТРОЛОГИЯ

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ ДЛЯ СПО

3-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом среднего профессионального образования
в качестве учебника и практикума для студентов образовательных учреждений среднего
профессионального образования*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 006(075.32)
ББК 30.1065.2/4.ця723
С32

Автор:

Сергеев Алексей Георгиевич — доктор технических наук, профессор, специалист в области метрологии, академик РАЕН, директор Центра управления качеством образования.

Сергеев, А. Г.

С32 Сергеев, А. Г. Метрология : учебник и практикум для СПО / А. Г. Сергеев. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 322 с. — (Серия : Профессиональное образование).

ISBN 978-5-534-04313-6

В учебнике изложены научно-технические, нормативно-методические и организационные основы метрологии продукции и услуг. Раскрыты характеристики средств измерений, принципы техники измерений, методы достижения единства измерений и метрологического обеспечения с учетом современных требований стандартизации. Приведено большое число примеров и справочных данных в виде таблиц и диаграмм.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. Представляет интерес для аспирантов и специалистов служб метрологии, стандартизации и сертификации.

УДК 006(075.32)
ББК 30.1065.2/4.ця723



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-04313-6

© Сергеев А. Г., 2010
© Сергеев А. Г., 2017 с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

Оглавление

Глава 1. Основные понятия и термины метрологии.

Воспроизведение единиц физических величин

и единство измерений	11
1.1. Физические свойства, величины и шкалы.....	11
1.2. Системы физических величин	15
1.3. Международная система единиц и фундаментальные физические константы	21
1.4. Воспроизведение единиц физических величин.....	25
1.5. Эталоны единиц СИ	30
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	<i>34</i>

Глава 2. Основы техники измерений параметров технических систем... 35

2.1. Модель измерения и основные постулаты метрологии	35
2.2. Виды и методы измерений.....	37
2.3. Погрешности измерений.....	40
2.4. Нормирование погрешностей и формы представления результатов измерений.....	48
2.5. Внесение поправок в результаты измерений.....	49
2.6. Оценка неисключенной составляющей систематической погрешности измерений.....	51
2.7. Выявление и исключение грубых погрешностей (промахов).....	53
2.8. Качество измерений.....	54
2.9. Методы обработки результатов измерений.....	60
2.9.1. Многократные прямые равноточные измерения	60
2.9.2. Неравноточные измерения.....	61
2.9.3. Однократные измерения.....	62
2.9.4. Косвенные измерения	65
2.9.5. Совместные и совокупные измерения.....	71
2.10. Динамические измерения и динамические погрешности	71
2.10.1. Характеристика динамических измерений.....	71
2.10.2. Динамические измерения и погрешности детерминированных линейных измерительных цепей.....	73
2.10.3. Динамические погрешности случайных процессов	77
2.11. Суммирование погрешностей.....	79
<i>Контрольные вопросы и задания.....</i>	<i>86</i>

Глава 3. Нормирование метрологических характеристик средств измерений..... 88

3.1. Виды средств измерений.....	88
----------------------------------	----

3.2. Метрологические характеристики средств измерений	90
3.3. Классы точности средств измерений	100
3.4. Расчет погрешности измерительной системы	108
3.5. Метрологические характеристики цифровых средств измерений	110
3.5.1. Общие положения	110
3.5.2. Статические погрешности цифровых средств измерений	112
3.6. Нормирование динамических погрешностей средств измерений.....	123
3.7. Точность и неопределенность измерений.....	128
3.7.1. Основные понятия и определения стандартов ГОСТ Р ИСО 5725-1—6—2002.....	128
3.7.2. Концепция погрешности и неопределенности измерений.....	135
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	145
Глава 4. Метрологическая надежность средств измерений	146
4.1. Основные понятия теории метрологической надежности.....	146
4.2. Изменение метрологических характеристик СИ в процессе эксплуатации.....	148
4.3. Математические модели изменения во времени погрешности средств измерений.....	151
4.3.1. Линейная модель изменения погрешности	151
4.3.2. Экспоненциальная модель изменения погрешности	152
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	156
Глава 5. Выбор средств измерений.....	157
5.1. Общие положения. Понятие об испытании и контроле	157
5.2. Принципы выбора средств измерений.....	164
5.2.1. Выбор СИ по коэффициенту уточнения.....	164
5.2.2. Выбор СИ по принципу безошибочности контроля.....	167
5.2.3. Выбор СИ с учетом безошибочности контроля и его стоимости	171
5.2.4. Выбор СИ по технико-экономическим показателям.....	173
5.3. Выбор СИ при динамических измерениях.....	177
5.4. Выбор ЦСИ по метрологическим характеристикам	186
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	190
Глава 6. Техническое регулирование и метрологическое обеспечение... 192	
6.1. Общие положения и принципы технического регулирования.....	192
6.2. Основы метрологического обеспечения	196
6.3. Нормативно-правовые основы метрологии	197
6.4. Метрологические органы, службы и организации.....	202
6.4.1. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии и подведомственные службы	202
6.4.2. Государственная метрологическая служба.....	205
6.4.3. Метрологические службы государственных органов управления и юридических лиц	208
6.4.4. Международные метрологические организации.....	214
6.5. Государственный метрологический контроль и надзор.....	216
6.5.1. Контроль и надзор за соблюдением требований технических регламентов.....	216

6.5.2. Государственный метрологический контроль. Испытания для утверждения типа СИ	222
6.5.3. Характеристика государственного метрологического надзора	227
6.6. Поверка средств измерений	229
6.6.1. Организация и проведение поверок СИ.....	229
6.6.2. Построение поверочных схем.....	238
6.6.3. Оптимизация межповерочных интервалов СИ.....	245
6.6.4. Определение межповерочных интервалов при информационной избыточности.....	252
6.6.5. Критерии качества и допускаемые погрешности поверки СИ.....	255
6.7. Калибровка средств измерений	257
6.8. Сопоставление операций поверки и калибровки	263
6.9. Регулировка и градуировка средств измерений	268
6.10. Оптимизация модели метрологического обслуживания и обменного фонда СИ.....	270
6.11. Метрологическая аттестация СИ и испытательного оборудования	277
6.12. Метрологическая аттестация нестандартизованных СИ.....	282
6.13. Метрологическая экспертиза нормативно-технической документации.....	287
6.14. Метрологическое обеспечение технологических операций	293
6.15. Методики выполнения измерений.....	297
6.16. Внедрение стандартов ИСО 5725 в практику метрологического обеспечения	301
6.17. Гармонизация метрологических правил и норм.....	303
6.18. Анализ состояния измерений, контроля и испытаний	310
6.19. Система метрологического обеспечения.....	315
<i>Контрольные вопросы и задания</i>	321

Предисловие

Динамичное развитие экономики России невозможно без повышения конкурентоспособности отечественных товаров и услуг как на внутреннем, так и на внешнем рынке. Ориентация только на ценовую конкуренцию в современных условиях решающего успеха уже не гарантирует. Определяющим для потребителей во всех странах мира стало качество. Очевидно, что производители должны знать требования, предъявляемые к качеству выпускаемых ими товаров, изучать их. Эти требования, как правило, не одинаковы для различных групп потребителей и различаются в зависимости от покупательной способности населения, уровня конкуренции, климатических условий, культурных традиций и многих других факторов. А это означает, что качеством продукции и услуг необходимо управлять, уметь количественно оценивать и анализировать их показатели, варьировать влияющими на них процессами.

Именно эти вопросы освещаются при изучении метрологии, стандартизации и сертификации. Данные научные дисциплины как структура в системе управления качеством в любой отрасли хозяйствования страны за последние 12—15 лет претерпели серьезные трансформации.

Система стандартизации и ее метрологические аспекты уходят корнями во времена Древнего Египта и Древнего Рима¹. Начало 20-х гг. прошлого века было ознаменовано возникновением национальных организаций по стандартизации во многих развитых странах. Это было связано с ростом промышленности и развитием новых технологий.

Постановлением Совета Народных Комиссаров (СНК) 15 сентября 1925 г. был создан Комитет по стандартизации при Совете труда и обороны (ГОССТАНДАРТ). Это стало началом планомерной государственной стандартизации в России.

В обязанности созданного Комитета по стандартизации входило руководство работами ведомств Советского Союза по установлению промышленных и торговых стандартов на различные материалы и изделия и опубликование обязательных и рекомендуемых стандартов. Помимо данной работы, Комитет по стандартизации принимал участие в международной стандартизации и вошел в состав образованной в 1927 г. Международной федерации национальных ассоциаций по стандартизации (ИСА).

Введение государственного управления стандартизации в СССР послужило также началом планомерной и систематической работы в области метрологии и сертификации во всех сферах экономики страны.

Так, 10 июля 1940 г. был издан Указ Президиума Верховного Совета СССР о придании государственным стандартам статуса закона. В последу-

¹ *Сергеев А. Г.* Метрология. История, современность, перспективы. М. : Университетская книга: Логос, 2009.

ющие годы название главного органа по стандартизации страны незначительно менялось при сохранении его основных функций.

С 1970 г. орган государственной стандартизации СССР носил название Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР (Госстандарт СССР), а в 1991 г. его правопреемником был определен Госстандарт РСФСР.

В 1992 г. (30 сентября) Указом Президента РФ № 1148 Государственный комитет РСФСР по стандартизации, метрологии и сертификации был реорганизован в Комитет РФ по стандартизации, метрологии и сертификации, который осуществлял государственное регулирование и межотраслевую координацию по вопросам стандартизации, метрологии и сертификации.

В 1996 г. (14 августа) Указом Президента РФ № 1177 Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации переименован в Государственный комитет по стандартизации, метрологии и сертификации, а в 1998 г. (30 апреля) Указом Президента РФ № 483 этот Государственный комитет был упразднен. Его функции переданы Министерству промышленности и торговли РФ.

Указом Президента РФ от 22 сентября 1998 г. № 1142 образован Государственный комитет РФ по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России) с передачей ему функций Министерства промышленности и торговли РФ по реализации государственной политики в сфере стандартизации, метрологии и сертификации. Постановлением Правительства РФ от 9 ноября 1998 г. определено, что Госстандарт России является федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим межотраслевую координацию, а также функциональное регулирование в области стандартизации, метрологии и сертификации. Указом Президента РФ от 9 марта 2004 г. № 314 на базе Госстандарта России была создана Федеральная служба по техническому регулированию и метрологии, а Указом Президента РФ от 20 мая 2004 г. № 649 Федеральная служба по техническому регулированию и метрологии преобразована в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Ростехрегулирование).

Однако Постановлением Правительства РФ от 9 июня 2010 г. № 408 «О внесении изменений в Положение о Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии» Ростехрегулирование переименовано в Росстандарт¹.

Безусловно, приведенные изменения в названии по сути одного и того же органа создают определенные трудности в работе метрологов и стандартизаторов. Но это же свидетельствует и о постоянной динамике процессов в сфере стандартизации, метрологии и сертификации.

Введение Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а также Федерального закона от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений»² ставят новые задачи и в сфере обучения метрологии, стандартизации и сертификации.

¹ В настоящем учебнике также встречается и старое название агентства (Ростехрегулирование). — *Прим. ред.*

² Принят взамен действующего ранее Закона РФ от 27 апреля 1993 г. № 4871-1.

Метрология — наука об измерениях, а измерения — один из важнейших путей познания. Они играют огромную роль в современном обществе. Наука, промышленность, экономика и коммуникации не могут существовать без измерений. Каждую секунду в мире производятся миллиарды измерительных операций, результаты которых используются для обеспечения качества и технического уровня выпускаемой продукции, безопасной и безаварийной работы транспорта, обоснования медицинских и экологических диагнозов, анализа информационных потоков. Практически нет ни одной сферы деятельности человека, где бы интенсивно не использовались результаты измерений, испытаний и контроля. Для их получения вовлечены миллионы людей и большие финансовые средства. Примерно 15% затрат общественного труда расходуется на проведение измерений. По оценкам экспертов, от 3 до 9% валового национального продукта передовых индустриальных стран приходится на измерения и связанные с ними операции.

На современном этапе развития мирового сообщества, характеризующегося высокими темпами интенсификации производства, применением взаимосвязанных систем машин и приборов, использованием широкой номенклатуры веществ и материалов, значительно возросли требования к специалистам в области стандартизации. В этих условиях роль стандартизации как важнейшего звена в системе управления техническим уровнем и качеством продукции и услуг на всех этапах научных разработок, проектирования, производства, эксплуатации и утилизации имеет первостепенное значение. Стандартизация изучает вопросы разработки и применения таких правил и норм, которые отражают действие объективных технико-экономических законов, играют большую роль в развитии промышленного производства, вносят значительный вклад в рост общественного богатства; способствуют улучшению использования основных фондов, природных богатств. Стандартизация имеет непосредственное отношение к совершенствованию управления производством, повышению качества всех видов товаров и услуг.

Большое значение для регулирования механизмов рыночной экономики приобрела сертификация. Для многих видов продукции и процессов она стала обязательной. Сертификация является официальным подтверждением соответствия стандартам и во многом определяет конкурентоспособность продукции. В книге рассматриваются средства и методы проведения работ по различным видам сертификации. В последние годы к традиционно широко практикуемой сертификации продукции добавилась сертификация услуг в торговле, туризме, бытовом обслуживании и даже в сфере образования. Активно развивается сертификация систем качества и экологического управления предприятий на соответствие стандартам серий ИСО 9000 и ИСО 14000, а также сертификация персонала.

Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» с его последующими изменениями, Закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», комплекс стандартов ГОСТ Р ИСО 5725, а также документы Президента и Правитель-

ства РФ, вышедшие в 2010—2011 гг., в ближайшие годы и на перспективу станут организующим началом в реформировании метрологии, стандартизации и сертификации. Факторами, повышающими актуальность изложенного, являются также интеграция России в мировую экономику и ее вхождение во Всемирную торговую организацию (ВТО).

Намечен переход от собственно сертификации как деятельности, осуществляемой третьей стороной, к более общему контролю — к подтверждению соответствия. Суть подтверждения соответствия состоит не столько в гармонизации терминологии в области сертификации, сколько в переходе на более гибкие формы оценки соответствия, в переходе от сертификации как единственной формы оценки соответствия к разнообразным формам, включая подтверждение соответствия через декларирование соответствия.

В последнее время активизировалось сотрудничество Российской Федерации и стран Содружества Независимых Государств (СНГ) в сфере технического регулирования со странами Европейского союза (ЕС), Евразийского экономического союза (ЕАЭС) и Единого экономического пространства (ЕЭП). О намерении создать на евразийской территории систему технического регулирования по образцу и подобию Европейского союза можно судить, оценив деятельность ЕАЭС, созданного в целях координации подходов при интеграции в мировую экономику и международную торговую систему. ЕЭП создавалось с целью обеспечения свободного движения товаров, услуг, капитала и рабочей силы.

Между Россией и ЕС существуют обязательства по гармонизации и сближению законодательства, к примеру, в рамках Соглашения о партнерстве и сотрудничестве Россия — ЕС (СПС). Так, ч. 1 ст. 60 СПС гласит, что «Стороны принимают меры с целью сокращения имеющихся у Сторон различий в области метрологии, стандартизации и сертификации путем поощрения использования в этих областях согласованного на международном уровне инструментария». Поощряется также практическое взаимодействие соответствующих организаций сторон с целью начала процесса переговоров по заключению соглашений о взаимном признании в области подтверждения соответствия.

Следующим шагом на пути к единому подходу стала Директива ЕС 1983 г. «Об информировании в области стандартов и технических предписаний» — так называемая Информационная директива. Она обязывает государства-члены своевременно информировать о проектах стандартов и немедленно прекратить разработку стандартов, которые при одновременном применении в рамках ЕС могут привести к разногласиям.

В настоящее время Международное бюро мер и весов (МБМВ), Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) и Международное сотрудничество по аккредитации лабораторий (ИЛАК) работают над созданием Всемирной системы метрологии. В январе 2006 г. этими организациями принята общая Декларация, где подчеркнута важность международного соглашения об объединении систем измерения в промышленности и торговле. Использование предполагаемой системы позволит снизить влияние технических барьеров в торговле и обеспечить стабильную основу для научных и технических измерений.

Одна из особенностей учебного материала по метрологии, стандартизации и сертификации состоит в постоянном изменении нормативной базы (терминология, структура, функциональные обязанности и пр.). С целью ознакомления читателя с объемной информацией о нормативно-технической документации в книге сохранена традиция, введенная нами еще в 1987 г. и впоследствии поддержанная другими авторами. Для этого в приложении 4 приведены основные документы в рассматриваемой области за последние 3–5 лет.

Книга подготовлена на кафедре «Управление качеством и техническое регулирование» Владимирского государственного университета д.т.н., проф. А. Г. Сергеевым и к.т.н., проф. В. В. Терегерей, которые выражают благодарности д.т.н., проф. М. В. Латышеву за ряд ценных замечаний.

Авторы далеки от мысли, что все изложенное лишено недостатков, прощелов и упущений. Это в немалой степени можно объяснить динамикой реформирования сферы метрологии, стандартизации и сертификации. Поэтому все замечания и предложения будут восприняты с благодарностью.

В результате изучения дисциплины «Метрология» студенты должны освоить:

трудовые действия

- владеть типовыми методиками и техникой выполнения измерений различных величин и характеристик и обработки результатов измерений;
- владеть приемами проведения физического измерительного эксперимента;

необходимые умения

- использовать контрольно-измерительные приборы для решения технических задач;
- разрабатывать методики и программы измерений;
- правильно выбирать и применять средства измерений с учетом их метрологических характеристик;
- давать правильную оценку результатам измерений;

необходимые знания

- теория, принципы и методы измерений физических величин и обработки измерительной информации;
- основные технические характеристики современных средств измерений;
- методики проведения измерений, обработки и представления экспериментальных данных.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ МЕТРОЛОГИИ. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

После изучения главы 1 студент должен:

знать

- основные понятия о метрологии и ее разделах;
- классификацию величин, систему и принципы воспроизведения единиц физических величин;
- формирование эталонов Международной системы единиц (СИ);

уметь

- оценивать символические и числовые размерности физических величин;
- пользоваться кратными и дольными приставками при образовании единиц физических величин;
- оценивать перспективу использования фундаментальных констант в метрологии;

владеть

- понятийным аппаратом в области метрологии и принципами реализации единства измерений.
-

1.1. Физические свойства, величины и шкалы

С 1 января 2015 г. на территории России и стран СНГ введены рекомендации РМГ 29–2013, содержащие основные термины и определения в области метрологии, согласованные с международными стандартами ИСО 31(0–13) и ИСО 1000, регламентирующими использование дольных, кратных и других единиц при измерениях.

В соответствии с этими документами **метрология** — это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

В зависимости от цели различают три раздела метрологии: теоретическую, законодательную и прикладную.

В **теоретической (фундаментальной) метрологии** разрабатываются фундаментальные основы этой науки.

Предметом **законодательной метрологии** является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений.

Практическая (прикладная) метрология освещает вопросы практического применения разработок теоретической и положений законодательной метрологии.

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами. *Свойство* — философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним. Свойство — категория качественная. Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины. **Величина** — это свойство чего-либо, что может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со свойствами, выраженными данной величиной.

Величины можно разделить на два вида: реальные и идеальные (рис. 1.1).

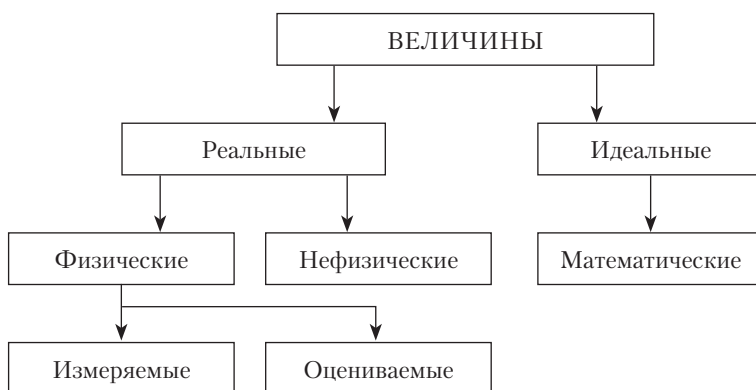


Рис. 1.1. Классификация величин

Идеальные величины главным образом относятся к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий.

Реальные величины делятся в свою очередь на **физические** и **нефизические**. Физическая величина (ФВ) в общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым естественными (физика, химия) и техническими науками. К нефизическим следует отнести величины, присущие общественным (нефизическим) наукам — философии, социологии, экономике и т.д.

Рекомендации РМГ 29–2013 трактуют физическую величину, как одно из свойств физического объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном — индивидуальное для каждого из них. Индивидуальность в количественном отношении понимают в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Таким образом, физические величины — это измеренные свойства физических объектов и процессов, с помощью которых они могут быть изучены.

Физические величины целесообразно разделить на **измеряемые** и **оцениваемые**. Измеряемые ФВ могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования последних является важным отличительным признаком измеряемых ФВ. Физические величины, для которых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только оценены. Оценивание величины осуществляется при помощи шкал. **Шкала величины** — упорядоченная последовательность ее значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений.

Нефизические величины, для которых единица измерения в принципе не может быть введена, могут быть только оценены. Стоит отметить, что оценивание нефизических величин не входит в задачи теоретической метрологии.

Для более детального изучения ФВ необходимо классифицировать (рис. 1.2) и выявить общие метрологические особенности их отдельных групп.

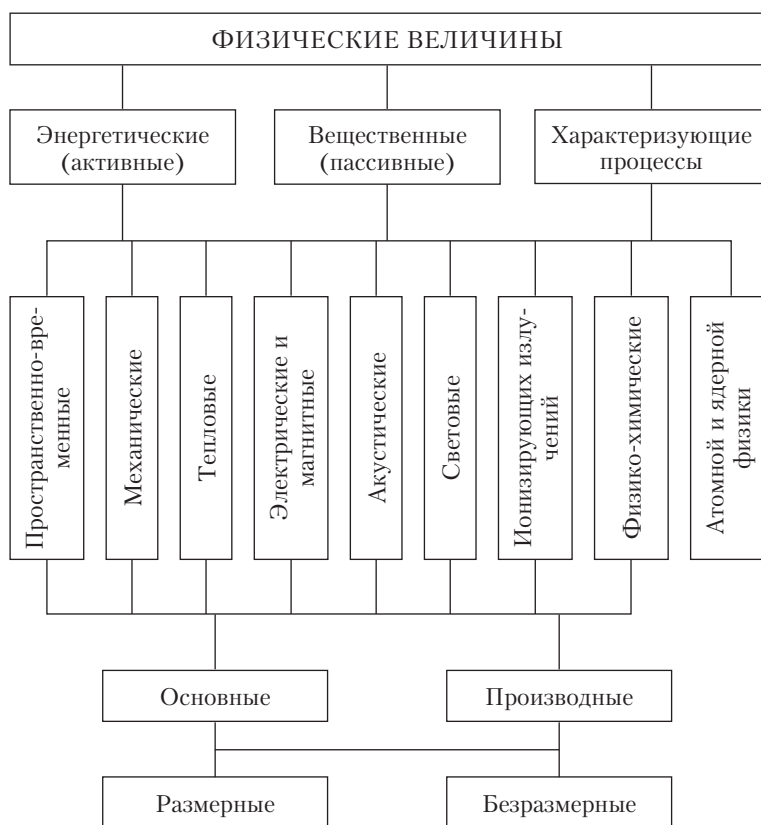


Рис. 1.2. Классификация физических величин

По видам явлений ФВ делятся на следующие группы:

- **вещественные**, т.е. описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них. К этой группе относятся масса, плотность, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность

и др. Иногда указанные ФВ называют **пассивными**. Для их измерения необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации. При этом пассивные ФВ преобразуются в активные, которые и измеряются;

- **энергетические**, т.е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия. Эти величины называют **активными**. Они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

- **характеризующие протекание процессов во времени**. К этой группе относятся различного рода спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

По **принадлежности к различным группам физических процессов** ФВ делятся на пространственно-временные, механические, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые, физико-химические, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики.

По **степени условной независимости от других величин** данной группы ФВ делятся на основные (условно независимые) и производные (условно зависимые). В настоящее время в международной системе (СИ) используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и количество вещества.

По **наличию размерности** ФВ делятся на размерные, т.е. имеющие размерность, и безразмерные.

Совокупность чисел Q , отображающая различные по размеру однородные величины, должна быть совокупностью одинаково именованных чисел. Это именование является единицей ФВ или ее доли. **Единица физической величины** $[Q]$ — это ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице. Она принимается для количественного выражения однородных ФВ.

Значение физической величины Q — это оценка ее размера в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Числовое значение физической величины q — отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной ФВ.

Уравнение

$$Q = q[Q] \quad (1.1)$$

называют **основным уравнением измерения**. Суть простейшего измерения состоит в сравнении ФВ Q с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры $q[Q]$. В результате сравнения устанавливают, что

$$q[Q] < Q < (q + 1)[Q]. \quad (1.2)$$

Измерение — познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной ФВ с известной ФВ, принятой за единицу измерения.

В практической деятельности необходимо проводить измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов. Как было показано ранее, некоторые свойства проявляются только качественно, другие — количественно. Разнообразные проявления (количественные или качественные) любого свойства образуют множества, отображения элементов которых на упорядоченное множество чисел или в более общем случае условных знаков образуют **шкалы измерения** этих свойств. Шкала измерений количественного свойства является шкалой ФВ. **Шкала физической величины** — это упорядоченная последовательность значений ФВ, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. Термины и определения теории шкал измерений изложены в документе МИ 83—2007, где в соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений (шкалы наименований, порядка, интервалов, отношений и абсолютную).

1.2. Системы физических величин

В науке, технике и повседневной жизни человек имеет дело с разнообразными свойствами окружающих его физических объектов. Эти свойства отражают процессы взаимодействия объектов между собой. Их описание производится посредством физических величин. Для того чтобы можно было установить для каждого объекта различия в количественном содержании свойства, отображаемого физической величиной, в метрологии введены понятия ее размера и значения.

Размер физической величины — это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина». Например, каждое тело обладает определенной массой, вследствие чего тела можно различать по их массе, т.е. по размеру интересующей нас ФВ.

Значение физической величины получают в результате ее измерения или вычисления в соответствии с основным уравнением измерения $Q = q[Q]$, связывающим между собой значение ФВ Q , числовое значение q и выбранную для измерения единицу $[Q]$. В зависимости от размера единицы будет меняться числовое значение ФВ, тогда как размер ее будет одним и тем же.

Совокупность ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимаются за независимые, а другие являются их функциями, называется *системой физических величин*.

Обоснованно, но в общем произвольным образом выбираются несколько ФВ, называемых **основными**. Остальные величины, называемые **производными**, выражаются через основные на основе известных уравнений связи между ними. Примерами производных величин могут служить: плотность вещества, определяемая как масса вещества, заключенного в единице объема; ускорение — изменение скорости за единицу времени и др.

В названии системы ФВ применяют символы величин, принятых за основные. Например, система величин механики, в которой в качестве основных используются длина (L), масса (M) и время (T), называется системой LMT . Действующая в настоящее время международная система

(СИ) должна обозначаться символами $LMTIQNJ$, соответствующими символам основных величин: длине (L), массе (M), времени (T), силе электрического тока (I), количеству теплоты (Q), количеству вещества (N) и силе света (J).

Единица основной ФВ является **основной единицей** данной системы. В Российской Федерации используется Международная система единиц (СИ или SI), введенная ГОСТ 8.417–2002 «ГСИ. Единицы физических величин». В качестве основных единиц приняты метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела (табл. 1.1).

Единая международная система единиц (СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г. На территории нашей страны СИ действует с 1 января 1982 г. СИ возникла не на пустом месте и является логическим развитием предшествовавших ей систем единиц СГС, МКГСС и др.

Система СГС (симметричная, или гауссова) существует более 100 лет и до сих пор используется в точных науках — физике, астрономии. Однако ее все более теснит СИ — единственная система единиц ФВ, которая принята и используется в большинстве стран мира.

Таблица 1.1

Основные единицы физических величин СИ (SI)

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	
			русское	международное
Длина	L	Метр	м	m
Масса	M	Килограмм	кг	kg
Время	T	Секунда	с	s
Сила электрического тока	I	Ампер	А	A
Термодинамическая температура	θ	Кельвин	К	K
Количество вещества	N	Моль	моль	mol
Сила света	J	Кандела	кд	cd

Производные единицы бывают когерентными и некогерентными. **Когерентной** называется производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице. Например, единицу скорости образуют с помощью уравнения, определяющего скорость прямолинейного и равномерного движения точки: $v = L/t$, где L — длина пройденного пути, t — время движения. Подстановка вместо L и t их единиц в СИ дает $v = 1$ м/с (табл. 1.2). Следовательно, единица скорости является когерентной.

На XX Генеральной конференции мер и весов (1995 г.) единицы плоского и телесного углов — радиан истерадиан исключены из класса дополнительных единиц СИ и переведены в класс производных, имеющих специальные названия (табл. 1.3).

Таблица 1.2

**Примеры производных единиц СИ, наименования
и обозначения которых образованы с использованием
наименований и обозначений основных единиц СИ**

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	
			русское	международное
Площадь	L^2	Квадратный метр	м ²	m ²
Объем, вместимость	L^3	Кубический метр	м ³	m ³
Скорость	LT^{-1}	Метр в секунду	м/с	m/s
Ускорение	LT^{-2}	Метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s ²
Волновое число	L^{-1}	Метр в минус первой степени	м ⁻¹	m ⁻¹
Плотность	$L^{-3}M$	Килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³
Удельный объем	L^3M^{-1}	Кубический метр на килограмм	м ³ /кг	m ³ /kg
Плотность	$L^{-2}I$	Ампер на квадратный метр	А/м ²	A/m ²
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	Ампер на метр	А/м	A/m
Молярная концентрация компонента	$L^{-3}N$	Моль на кубический метр	моль/м ³	mol/m ³
Яркость	$L^{-2}J$	Кандела на квадратный метр	кд/м ²	cd/m ²

Таблица 1.3

Производные единицы СИ, имеющие специальное название

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	выражение через единицы СИ
Плоский угол	1	РадIAN	рад	м ² · м ⁻² = 1
Телесный угол	1	СтерАДИАН	ср	м ² · м ⁻² = 1
Частота	T^{-1}	Герц	Гц	с ⁻¹
Сила, вес	LMT^{-2}	НЬЮТОН	Н	м · кг · с ⁻²
Давление, механическое напряжение	$L^{-1}MT^{-2}$	ПАСКАЛЬ	Па	м ⁻¹ · кг · с ⁻²
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	ДЖОУЛЬ	Дж	м ² · кг · с ⁻²

Величина		Единица		
наименование	размерность	наименование	обозначение	выражение через единицы СИ
Мощность	L^2MT^{-3}	Ватт	Вт	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}$
Количество электричества	TI	Кулон	Кл	$с \cdot А$
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	Вольт	В	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	Фарад	Ф	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^4 \cdot А^2$
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	Ом	Ом	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-3} \cdot А^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	Сименс	См	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot с^3 \cdot А^2$
Поток магнитной индукции	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	Вебер	Вб	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	Тесла	Тл	$кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-1}$
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	Генри	Гн	$м^2 \cdot кг \cdot с^{-2} \cdot А^{-2}$
Световой поток	J	Люмен	лм	кд · ср
Освещенность	$L^{-2}J$	Люкс	лк	$м^{-2} \cdot кд \cdot ср$
Активность радионуклида	T^{-1}	Беккерель	Бк	$с^{-1}$
Поглощенная доза ионизирующего излучения	L^2T^{-2}	Грей	Гр	$м^2 \cdot с^{-2}$
Эквивалентная доза излучения	L^2T^{-2}	Зиверт	Зв	$м^2 \cdot с^{-2}$
Активность катализатора	NT^{-1}	Катал	кат	моль · с ⁻¹

Единицы ФВ делятся на системные и внесистемные. **Системная единица** — единица ФВ, входящая в одну из принятых систем. Все основные, производные, кратные и дольные единицы являются системными. **Внесистемная единица** — это единица ФВ, не входящая ни в одну из принятых систем единиц. Внесистемные единицы по отношению к единицам СИ разделяют на четыре вида:

- допускаемые наравне с единицами СИ, например: единицы массы — тонна; плоского угла — градус, минута, секунда; объема — литр и др. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в табл. 1.4;
- допускаемые к применению в специальных областях, например: астрономическая единица, парсек, световой год — единицы длины в астрономии;

диоптрия — единица оптической силы в оптике; электрон-вольт — единица энергии в физике и т.д.;

- временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ, например: морская миля — в морской навигации; карат — единица массы в ювелирном деле и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями;

- изъятые из употребления, например: миллиметр ртутного столба — единица давления; лошадиная сила — единица мощности и некоторые другие.

Таблица 1.4

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица		
	наименование	обозначение	соотношение с единицей СИ
Масса	Тонна	т	10^3 кг
	Атомная единица массы	а. е. м.	$1,66057 \cdot 10^{-27}$ кг (приблизительно)
Время	Минута	мин	60 с
	Час	ч	3600 с
	Сутки	сут	86 400 с
Плоский угол	Градус	°	$(\pi/180)$ рад = $1,745329 \dots \cdot 10^{-2}$ рад
	Минута	... ' ...	$(\pi/10\ 800)$ рад = $2,908882 \dots \cdot 10^{-4}$ рад
	Секунда	... " ...	$(\pi/648\ 000)$ рад = $4,848137 \dots \cdot 10^{-6}$ рад
	Град	град	$(\pi/200)$ рад
Объем	Литр	л	10^{-3} м ³
Длина	Астрономическая единица	а. е.	$1,45598 \cdot 10^{11}$ м (приблизительно)
	Световой год	св. год	$9,4605 \cdot 10^{15}$ м (приблизительно)
	Парсек	пк	$3,0857 \cdot 10^{16}$ м (приблизительно)
Оптическая сила	Диоптрия	дптр	1 м ⁻¹
Площадь	Гектар	га	10^4 м ²
Энергия	Электрон-вольт	эВ	$1,60219 \cdot 10^{-19}$ Дж (приблизительно)
Полная мощность	Вольт-ампер	В · А	—
Реактивная мощность	Вар	вар	—

Различают кратные и дольные единицы ФВ. **Кратная единица** — это единица ФВ, в целое число раз превышающая системную или внесистем-

ную единицу. Например, единица длины километр равна 10^3 м, т.е. кратна метру. **Дольная единица** — единица ФВ, значение которой в целое число раз меньше системной или внесистемной единицы. Например, единица длины миллиметр равна 10^{-3} м, т.е. является дольной. Множители и приставки для образования кратных и дольных единиц приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
10^{18}	Экса	E	Э
10^{15}	Пета	P	П
10^{12}	Тера	T	Т
10^9	Гига	G	Г
10^6	Мега	M	М
10^3	Кило	k	к
10^2	Гекто	h	г
10^1	Дека	da	да
10^{-1}	Деци	D	д
10^{-2}	Санتي	C	с
10^{-3}	Милли	M	м
10^{-6}	Микро	μ	мк
10^{-9}	Нано	N	н
10^{-12}	Пико	P	п
10^{-15}	Фемто	F	ф
10^{-18}	Атто	A	а

В связи с широким использованием вычислительной техники, возникновением огромного рынка бытовой радиоэлектронной аппаратуры и информационно-измерительных систем появились весьма распространенные «единицы количества информации» (табл. 1.6).

Весьма важны правила написания обозначений единиц. Как очевидно из предыдущего, в России установлено два вида буквенных обозначений: международное (буквами латинского или греческого алфавита) и русское (буквами русского алфавита). Обозначения единиц помещают за числовыми значениями величин и в строку с ними, без переноса на следующую строку. Числовое значение в виде дроби с косой чертой, стоящее перед обозначением единицы, заключают в скобки. Между последней цифрой числа и обозначением единицы ставят пробел.

Правильно:

100 кВт

(1/60) с⁻¹

Неправильно:

100кВт

1/60 с⁻¹.

Единицы количества информации

Наименование величины	Единица			Примечание	
	наименование	обозначение			
		международное	русское		
Количество информации ¹	Бит ² Байт ²	Bit В (byte)	Бит Б (байт)	1 1 Б = 8 бит	Единица информации в двоичной системе счисления (двоичная единица информации)

При наличии десятичной дроби в числовом значении величины обозначение единицы помещают за всеми цифрами.

Правильно:	Неправильно:
423,06 м	423 м 06
5,75°	5°75
(100,0 ± 0,1) кг	100,0±0,1 кг
50 г ± 1 г	50±1 г

Буквенные обозначения единиц, входящие в произведение, отделяют точками, подобно знакам умножения (символ умножения «×» не допускается).

Правильно:	Неправильно:
Н·м; Па·с	Нм; Пас

1.3. Международная система единиц и фундаментальные физические константы

Исторически сложилось так, что закономерные научно обоснованные связи ФВ были установлены сначала в области геометрии и кинематики, затем динамики, термодинамики и электромагнетизма. Последовательно строились и системы единиц.

В геометрии и кинематике для установления связей между единицами достаточно уравнения

$$v = K_e \frac{dL}{dt}, \quad (1.3)$$

где v — скорость; K_e — коэффициент пропорциональности; L — длина; t — время. Первоначально (до 1983 г.) в качестве основных величин были выбраны единицы измерения длины и времени, а в качестве производной — скорость. В 1983 г. основными были названы единицы изме-

¹ Термин «количество информации» используют в устройствах цифровой обработки и передачи информации, например в цифровой вычислительной технике (компьютерах), для записи объема запоминающих устройств, количества памяти, используемого программой.

² В соответствии с международным стандартом МЭК 60027-2 единицы «бит» и «байт» применяют с приставками СИ (см. табл. 1.5).

рения времени и скорости, при этом скорости света в вакууме было придано точное, но в принципе произвольное значение $c_0 = 299\,792\,458$ м/с. Длина и ее единица — метр, по существу, стали производными. Однако формально длина в СИ остается основной ФВ и ее единица определяется следующим образом: **метр** — расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ долей секунды. Определение секунды принято в 1967 г. XIII Генеральной конференцией по мерам и весам.

Секунда — $9\,192\,631\,770$ периодов излучения, соответствующих резонансной частоте энергетического перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Коэффициент пропорциональности K_e в уравнении (1.3) равен единице. Если бы в 1983 г. было сохранено существовавшее ранее определение метра («криптоновый») и одновременно постулировано постоянство скорости света, K_e уже нельзя было бы считать равным единице — он выступал бы как экспериментально определяемая мировая константа.

Для образования системы единиц в области геометрии и кинематики к уравнению (1.3) следует добавить уравнения связи для площади (например, квадрата), объема (например, куба), ускорения и т.д. При добавлении уравнений каждый раз вводится одна новая ФВ и соответственно одно уравнение связи.

При переходе к динамике уравнение (1.3) дополняется уравнениями второго закона Ньютона

$$F = k_1 m a \quad (1.4)$$

и закона всемирного тяготения

$$F = k_2 \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.5)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты пропорциональности; m, m_1, m_2 — масса тел; a — ускорение; r — расстояние между телами.

Добавляются два уравнения связи и вводятся новые ФВ — **килограмм** в настоящее время определяется как масса международного прототипа килограмма, представляющего собой цилиндр из сплава платины и иридия. Следует отметить, что при таком определении килограмма не выполняется третий базовый критерий выбора основных единиц системы ФВ. Эталон килограмма является единственным уничтожимым из всех эталонов основных единиц системы СИ. Он подвержен старению и требует применения громоздких поверочных схем. Современное развитие науки пока не позволяет с достаточной степенью точности связать килограмм с естественными атомными константами.

Одна из главных ФВ, используемых при описании тепловых процессов, — **температура T** . **Температура** измеряется в кельвинах. Один **кельвин** равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

По определению, **ампер** — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположен-

ным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Поскольку скорость света в вакууме в системе СИ принята равной 299 792 458 м/с, то электрическая проницаемость вакуума ϵ_0 , называемая электрической постоянной, также будет точечной постоянной:

$$\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2) = 8,854187187 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.}$$

Световые измерения, т.е. измерения параметров электромагнитных колебаний с длиной волны от 0,38 до 0,76 мкм, имеют ту особенность, что в них очень большую роль играет ощущение человека, воспринимающего световой поток посредством глаз. Поэтому световые измерения не вполне объективны. Наблюдателя интересует только та часть потока электромагнитных колебаний, которая напрямую воздействует на глаз. В связи с этим обычные энергетические характеристики являются не совсем удобными для описания результатов таких измерений. Между энергетическими и световыми величинами существует однозначная взаимосвязь, и, строго говоря, для проведения измерений световых величин не требуется введения новой основной величины. Однако, учитывая исторически сложившееся к моменту возникновения системы СИ число основных единиц ФВ, а также значительное влияние на результаты световых измерений субъекта измерений — человека, было принято решение ввести единицу силы света — канделу. **Кандела** — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт · ср⁻¹.

Проведенные исследования показали, что в среднем глаз человека имеет наибольшую чувствительность при длине волны около 0,555 мкм, что соответствует частоте $540 \cdot 10^{12}$ Гц. Эту зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения описывают абсолютной световой эффективностью, которая равна отношению светового потока (т.е. оцениваемой нашим глазом мощности излучения) к полному потоку излучения (т.е. к полной мощности электромагнитного излучения). Световая эффективность представляет собой величину, позволяющую переходить от энергетических величин к световым. Она измеряется в люменах, деленных на ватт. При существующем определении канделы максимальной световой эффективности придано точное значение $K_M = 683$ лм/Вт, тем самым она возведена в ранг фундаментальных констант. В связи с этим кандела определяется путем косвенных измерений и, следовательно, является производной физической величиной, формально оставаясь основной. Остальные световые величины — производные и выражаются через введенные ранее ФВ.

Последняя основная единица системы СИ — моль была дополнительно введена в систему спустя 11 лет после введения первых шести единиц на XIV Генеральной конференции по мерам и весам в 1971 г. **Моль** — количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится и углероде-12 массой 0,0012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть ато-

мами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

Введение этой единицы было встречено научной общественностью очень неоднозначно. Дело в том, что при введении моля был допущен ряд отступлений от принципов образования систем физических величин. Во-первых, не было дано четкого и однозначного определения основополагающего понятия «количество вещества». Под количеством вещества можно понимать как массу того или иного вещества, так и количество структурных единиц, содержащихся в данном веществе. Во-вторых, из определения основной единицы неясно, каким образом возможно получение объективно количественной информации о ФВ при помощи измерений.

В этой связи возникает вопрос о функции, выполняемой молем среди основных единиц СИ. Любая основная единица призвана осуществлять две функции. Воспроизведенная в виде эталона, она обеспечивает единство измерений не только собственной ФВ, но и производных величин, в формировании размерности которых она участвует. С формальных позиций при образовании удельных величин моль входит в их размерность. Тем не менее, удельную величину не следует отождествлять с производной ФВ.

Удельные величины отличаются от соответствующих ФВ только количеством. Они представляют тот же количественный аспект измеряемого свойства, только отнесенный либо к единице массы, либо к единице объема, либо — в рассматриваемом случае — к молю. Отсюда следует, что моль не выполняет одну из самых главных функций основной единицы ФВ. Не выполняет моль и функции обеспечения единства измерений количества вещества. В большинстве публикаций подчеркивается, что моль является расчетной единицей и эталона для его воспроизведения не существует. Нет также ни одного метода и средства, предназначенного для измерения моля в соответствии с его определением. Все это свидетельствует о том, что следует ожидать исключения моля из числа основных единиц ФВ.

Из производных единиц следует выделить **радиан** и **стерадиан**.

Радян — это единица измерения плоского угла — угла между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна радиусу. На практике часто используются градус ($1^\circ = 2\pi/360 \text{ рад} = 0,017453 \text{ рад}$), минута ($1' = 1^\circ/60 = 2,9088 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$) и секунда ($1'' = 1'/60 = 4,8481 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$). Соответственно $1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 45'' = 57,2961^\circ = (3,4378 \cdot 103)'' = (2,0627 \cdot 105)''$.

Стерадиан — это единица измерения телесного угла — угла с вершиной в центре сферы, вырезающего на поверхности площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Во всех системах единиц плоский φ и телесный Ω углы вводятся посредством уравнений

$$\varphi = I/R; \quad \Omega = S/R^2,$$

где I — длина дуги, вырезаемой центральным плоским углом j на окружности радиуса R ; S — площадь, вырезаемая центральным телесным углом на шаре с радиусом R . В соответствии с этими определениями у обоих углов нет размерности в любой системе единиц: $[\varphi] = L/L$, $[\Omega] = L^2/L^2$.

Для описания акустических величин не требуется вводить новые основные величины, следовательно, все используемые в акустике ФВ являются производными.

В физике электромагнитных явлений к уравнениям механики необходимо добавить: уравнение закона Кулона (основной закон электростатики), уравнение связи между электрическим током и электрическим зарядом и уравнение закона Ампера (основной закон электродинамики). В этих уравнениях введены четыре новые физических величины: электрический ток I , электрический заряд q , магнитная проницаемость μ_0 , μ и диэлектрическая проницаемость ϵ_0 , ϵ . Под μ и ϵ понимаются относительные проницаемости, а под μ_0 и ϵ_0 — абсолютные проницаемости вакуума.

Для получения оптимальной системы электромагнитных единиц достаточно было к трем выбранным в механике основным единицам добавить одну электромагнитную, выбрав ее из четырех вновь введенных величин. При выборе учитывался ряд важных моментов. Во-первых, к моменту становления СИ в физике, электро- и радиотехнике широко использовались так называемые практические единицы: кулон, ампер, вольт, джоуль и др. Их желательно было сохранить. Во-вторых, необходимо было объединить указанные единицы с механическими и тепловыми кратными и дольными единицами существовавшей системы СГС, создав единую для всех областей науки систему единиц.

В международной системе (СИ) за основную единицу выбрана единица абсолютной магнитной проницаемости $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, называемая магнитной постоянной. Однако формально основной единицей считается ампер. Это связано с тем, что при выборе основной единицы путем постулирования ее истинного значения оказывается невозможным материализовать данную единицу в виде эталона. Поэтому реализация такой единицы осуществляется через какую-либо производную единицу. Так, единица скорости материализуется эталоном метра, а единица магнитной проницаемости — эталоном ампера.

В последнее время ученые-метрологи проявляют все больший интерес к разработке естественной системы единиц, где за основные единицы были бы приняты известные фундаментальные физические константы (ФФК). В качестве таких единиц рассматриваются: постоянная Планка, скорость света, гравитационная постоянная, постоянная Больцмана, система Хартри и др.

Такие попытки уже были предприняты в XIX в. (Дж. Стоун, М. Планк), но уровень науки и техники того времени был недостаточным для практической реализации этих идей. Следует надеяться, что дальнейшее развитие теоретической (фундаментальной) метрологии позволит найти приемлемые решения в данном направлении.

1.4. Воспроизведение единиц физических величин

При проведении измерений необходимо обеспечить их единство. Под **единством измерений** понимается характеристика качества измерений,

закрывающаяся в том, что их результаты выражаются в законных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизведенных величин, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Понятие «единство измерений» довольно емкое. Оно охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц ФВ, разработку систем воспроизведения величин и передачи их размеров рабочим средствам измерений с установленной точностью и ряд других вопросов. Единство должно обеспечиваться при любой точности, необходимой науке и технике. На достижение и поддержание на должном уровне единства измерений направлена деятельность государственных и ведомственных метрологических служб, проводимая в соответствии с установленными правилами, требованиями и нормами. На государственном уровне деятельность по обеспечению единства измерений регламентируется стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ), нормативными документами органов метрологической службы и Законом об обеспечении единства измерений.

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых градуированы все существующие средства измерений (СИ) одной и той же величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения в специализированных учреждениях установленных единиц ФВ и передачи их размеров применяемым СИ.

Различают воспроизведение основной и производной единиц.

Воспроизведение основной единицы — это воспроизведение единицы путем создания фиксированной по размеру ФВ в соответствии с определением единицы. Оно осуществляется с помощью государственных первичных эталонов. Например, единица массы — 1 килограмм (точно) воспроизведена в виде платино-иридиевой гири, хранимой в Международном бюро мер и весов в качестве международного эталона килограмма. Розданные другим странам эталоны имеют номинальное значение 1 кг. На основании последних международных сличений (1979 г.) платино-иридиевая гиря, входящая в состав государственного эталона РФ, имеет массу 1,000000087 кг.

Воспроизведение производной единицы — это определение значения ФВ в указанных единицах на основании косвенных измерений других величин, функционально связанных с измеряемой. Так, воспроизведение единицы силы — ньютона — осуществляется на основании известного уравнения механики $F = mg$, где m — масса; g — ускорение свободного падения.

Передача размера единицы — это приведение размера единицы хранимой поверяемым средством измерений к размеру единицы воспроизводимой или хранимой эталоном, осуществляемое при поверке или калибровке. Размер единицы передается «сверху вниз» — от более точных СИ к менее точным.

Хранение единицы — совокупность операций, обеспечивающая неизменность во времени размера единицы, присущего данному СИ. Хранение эталона единицы ФВ предполагает проведение взаимосвязанных операций, позволяющих поддерживать метрологические характеристики эталона в установленных пределах. При хранении первичного эталона выполняются регулярные его исследования, включая сличения с национальными

эталоны других стран с целью повышения точности воспроизведения единицы и совершенствования методов передачи ее размера.

Эталон — средство измерений (или комплекс СИ), предназначенное для воспроизведения и (или) хранения единицы и передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИ и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке. Классификация, назначение и общие требования к созданию, хранению и применению эталонов устанавливает ГОСТ 8.057–80 «ГСИ. Эталоны единиц физических величин. Основные положения».

Перечень эталонов не повторяет перечня ФВ. Для ряда единиц эталоны не создаются из-за того, что нет возможности непосредственно сравнивать соответствующие ФВ, например, нет эталона площади. Не создаются эталоны и в том случае, когда единица ФВ воспроизводится с достаточной точностью на основе сравнительно простых средств измерений других ФВ.

Конструкция эталона, его физические свойства и способ воспроизведения единицы определяются ФВ, единица которой воспроизводится, и уровнем развития измерительной техники в данной области измерений. Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью и сличаемостью.

Неизменность — свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы в течение длительного интервала времени. При этом все изменения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. Реализация этих требований привела к идее создания «естественных» эталонов различных величин, основанных на физических постоянных.

Воспроизводимость — возможность воспроизведения единицы ФВ (на основе ее теоретического определения) с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. Это достигается путем постоянного исследования эталона в целях определения систематических погрешностей и их исключения путем введения соответствующих поправок.

Сличаемость — возможность сличения с эталоном других СИ, нижестоящих по поверочной схеме, в первую очередь вторичных эталонов, с наивысшей точностью для существующей техники измерения. Это свойство предполагает, что эталоны по своему устройству и действию не вносят каких-либо искажений в результаты сличений и сами не претерпевают изменений в результате сличений.

Различают следующие виды эталонов (РМГ 29–2013):

- **первичный** — обеспечивает хранение и воспроизведение с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами) точностью. Первичные эталоны — это уникальные СИ, часто представляющие собой сложнейшие измерительные комплексы, созданные с учетом новейших достижений науки и техники. Они составляют основу государственной системы обеспечения единства измерений и бывают международными, национальными (государственными) и специальными;

- **международный** — эталон, принятый по международному соглашению в качестве международной основы для согласования с ним размеров единиц, воспроизводимых и хранимых национальными эталонами;

— **государственный** или **национальный** — это первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны. Государственные эталоны создаются, хранятся и применяются центральными метрологическими научными институтами страны. Точность воспроизведения единицы должна соответствовать уровню лучших мировых достижений и удовлетворять потребностям науки и техники. В состав государственных эталонов включаются СИ, с помощью которой воспроизводят и (или) хранят единицу ФВ, контролируют условия измерений и неизменность воспроизводимого или хранимого размера единицы, осуществляют передачу размера единицы. Государственные эталоны подлежат периодическим сличениям с государственными эталонами других стран. Термин «национальный эталон» применяется в случаях проведения сличения эталонов, принадлежащих отдельным государствам, с международным эталоном или при проведении так называемых круговых сличений эталонов ряда стран;

— **специальный** эталон обеспечивает воспроизведение единицы в особых условиях и может заменять первичный эталон. Он служит для воспроизведения единицы физической величины в условиях, когда первичный эталон нельзя использовать и прямая передача размера единицы от первичного эталона с требуемой точностью технически неосуществима (например, на сверхвысоких частотах).

Первичные и специальные эталоны являются исходными для страны, их утверждают в качестве национальных;

• **вторичный** — хранит размер единицы, полученной путем сличения с первичным эталоном соответствующей ФВ. Вторичные эталоны являются частью подчиненных средств хранения единиц и передачи их размеров, создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ, а также для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. В состав вторичных эталонов включаются СИ, с помощью которых хранят единицу ФВ, контролируют условия хранения и передают размер единицы. Вторичные эталоны по назначению делят на эталоны сравнения, рабочие эталоны, эталоны-свидетели и эталоны-копии;

— **эталон сравнения** — применяется для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличаемы друг с другом;

— **рабочий эталон** — мера, измерительный прибор или преобразователь, который применяется для передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Это самые распространенные эталоны;

— **эталон-свидетель** служит для проверки сохранности и неизменности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты. Известно, что в настоящее время только эталон килограмма имеет эталон-свидетель;

— **эталон-копия** предназначен для передачи размера единицы рабочим эталонам. Его создают в случае необходимости проведения большого числа поверочных работ с целью предохранения первичного или специального эталона от преждевременного износа. Эталон-копия представляет собой копию государственного эталона только по метрологическому назначению.

В зависимости от количества СИ, входящих в эталон, различают:

- одиночный эталон, в составе которого имеется одно СИ (мера, измерительный прибор, эталонная установка) для воспроизведения и (или) хранения единицы;
- групповой эталон, в состав которого входит совокупность СИ одного типа, номинального значения или диапазона измерений;
- эталонный набор, состоящий из совокупности СИ, позволяющих воспроизводить и (или) хранить единицу в диапазоне, представляющем объединение диапазонов указанных средств. Например, эталонные разновесы (набор эталонных гирь), эталонные наборы ареометров.

Если эталон (иногда специальной конструкции) предназначен для транспортирования к местам поверки (калибровки) СИ или сличений эталонов данной единицы, то он называется транспортируемым.

Способы выражения погрешности эталонов устанавливает ГОСТ 8.381–80 «ГСИ. Эталоны. Способы выражения погрешностей». Погрешности государственных первичных и специальных эталонов характеризуются неисключенной систематической погрешностью и нестабильностью. Неисключенная систематическая погрешность описывается границами, в которых она находится. Случайная погрешность определяется средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений при воспроизведении единицы с указанием числа независимых измерений. Нестабильность эталона задается изменением размера единицы, воспроизводимой или хранимой эталоном, за определенный промежуток времени.

Оценки погрешностей вторичных эталонов характеризуются отклонением размеров хранимых ими единиц от размера единицы, воспроизводимой первичным эталоном. Для вторичного эталона указывается суммарная погрешность, включающая случайные погрешности сличаемых эталонов и погрешности передачи размеров единицы от первичного (или более точного) эталона, а также нестабильность самого вторичного эталона. Суммарная погрешность вторичного эталона характеризуется либо СКО результата измерений при его сличении с первичным эталоном или вышестоящим по поверочной схеме вторичным эталоном, либо доверительной границей погрешности с доверительной вероятностью 0,99.

Передача размеров единиц ФВ от эталонов рабочим мерам и измерительным приборам осуществляется с помощью рабочих эталонов. До недавнего времени в нашей стране вместо термина «рабочие эталоны» использовался термин «образцовые средства измерений», который в большинстве других стран не применяется.

Рабочие эталоны при необходимости подразделяются на 1-й, 2-й и последующие разряды, определяющие порядок их соподчинения в соответствии с поверочной схемой. Для различных видов измерений устанавливается, исходя из требований практики, различное число разрядов рабочих эталонов, определяемых стандартами на поверочные схемы для данного вида измерений.

На каждой степени передачи информации о размере единицы точность теряется в 3–5 раз (иногда в 10 раз). Значит, при многоступенчатой передаче эталонная точность не доходит до потребителя. Поэтому для

высокоточных средств измерений число ступеней может быть сокращено вплоть до передачи ими информации непосредственно от рабочих эталонов 1-го разряда.

Обеспечение правильной передачи размера единиц ФВ во всех звеньях метрологической цепи осуществляется посредством поверочных схем. **Поверочная схема** — это нормативный документ, который устанавливает соподчинение средств измерений, участвующих в передаче размера единицы от эталона к рабочим СИ с указанием методов и погрешности и утвержден в установленном порядке. Основные положения о поверочных схемах приведены в ГОСТ 8.061–80 «ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение».

Однако прямая передача размеров единиц величин от эталонов затруднена из-за их большого количества, находящихся в работе средств измерений. Поэтому на практике используют промежуточные категории средств измерений. Ими являются рабочие средства измерения. **Рабочими** называют средства измерений, которые применяют для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

1.5. Эталоны единиц СИ

Эталонная база России имеет в своем составе 1176 (на 2005 г.) государственных первичных и специальных эталонов единиц физических величин. Из них 52 находятся во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ, Санкт-Петербург), в том числе эталоны метра, килограмма, ампера, кельвина и радиана; 25 — во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ, Москва), в том числе эталоны единиц времени и частоты; 13 — во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, в том числе эталон канделы; соответственно пять и шесть — в Уральском и Сибирском научно-исследовательских институтах метрологии.

В области механики в стране созданы и используются 38 государственных эталонов, в том числе первичные эталоны метра, килограмма и секунды, точность которых имеет чрезвычайно большое значение, поскольку эти единицы участвуют в образовании производных единиц всех научных направлений.

Единица времени — **секунда** впервые определялась через период вращения Земли вокруг оси или Солнца. До недавнего времени секунда равнялась $1/86\,400$ части солнечных средних суток. За средние солнечные сутки принимался интервал времени между двумя последовательными кульминациями «среднего» Солнца. Однако продолжительные наблюдения показали, что вращение Земли подвержено нерегулярным колебаниям, которые не позволяют рассматривать его в качестве достаточно стабильной естественной основы для определения единицы времени. Средние солнечные сутки определяются с погрешностью до 10^{-7} с. Эта точность совершенно недостаточна при нынешнем состоянии техники.

Проведенные исследования позволили создать новый эталон секунды, основанный на способности атомов излучать и поглощать энергию во время перехода между двумя энергетическими состояниями в области радиочастот. С появлением высокоточных кварцевых генераторов и развитием дальней радиосвязи появилась возможность реализации нового эталона секунды и единой шкалы мирового времени. В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение секунды (см. параграф 1.3). Данное определение реализуется с помощью цезиевых реперов частоты. **Репер**, или **квантовый стандарт частоты**, представляет собой устройство для точного воспроизведения частоты электромагнитных колебаний в сверхвысокочастотных и оптических спектрах, основанное на измерении частоты квантовых переходов атомов, ионов или молекул. В пассивных квантовых стандартах используются частоты спектральных линий поглощения, в активных — вынужденное испускание фотонов частицами. Применяются активные квантовые стандарты частоты на пучке молекул аммиака (так называемые молекулярные генераторы) и атомов водорода (водородные генераторы). Пассивные частоты выполняются на пучке атомов цезия (цезиевые реперы частоты).

Государственная поверочная схема для средств измерения времени и частоты определялись ГОСТ 8.129–2013. С 1997 г. он заменен Правилами межгосударственной стандартизации ПМГ 18–96 «Межгосударственная поверочная схема для средств измерений времени и частоты». Государственный первичный эталон единицы времени состоит из комплекса следующих средств измерений:

- метрологических цезиевых реперов частоты, предназначенных для воспроизведения размеров единицы времени и частоты в международной системе единиц;
- водородных стандартов частоты, предназначенных для хранения размеров единиц времени и частоты и одновременно выполняющих функцию хранителей шкал времени. Использование водородных реперов позволяет повысить стабильность эталонов. В настоящее время за период времени от 100 с до нескольких суток она равна $(1-5) \cdot 10^{-14}$;
- группы квантовых часов, предназначенных для хранения шкал времени. **Квантовые часы** — это устройство для измерения времени, содержащее генератор, частота которого стабилизирована кварцевым резонатором, и управляемое квантовыми стандартами частоты;
- аппаратуры для передачи размера единицы частоты в оптический диапазон, состоящей из группы синхронизированных лазеров и сверхвысокочастотных генераторов;
- аппаратуры внутренних и внешних сличений, включающей перевозимые квантовые часы и перевозимые лазеры;
- аппаратуры средств обеспечения.

Диапазон значений интервалов времени, воспроизводимых эталоном, составляет $1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^8$ с, диапазон значений частоты — $1 - 1 \cdot 10^{14}$ Гц. Воспроизведение единиц времени обеспечивается со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $1 \cdot 10^{-14}$ за три месяца, неисключенная систематическая погрешность не превышает

$5 \cdot 10^{-14}$. Нестабильность частоты эталона за интервал времени от 1000 с до 10 суток не превышает $5 \cdot 10^{-15}$.

Метр был в числе первых единиц, для которых были введены эталоны. Первоначально в период введения метрической системы мер за первый эталон метра была принята одна десятиллионная часть четверти длины парижского меридиана. В 1799 г. на основе ее измерения изготовили эталон метра в виде платиновой концевой меры (метр архива), представлявший собой линейку шириной около 25 мм, толщиной около 4 мм с расстоянием между концами 1 м.

До середины XIX в. проводились неоднократные уточнения принятого эталона. Так, в 1889 г. был принят эталон в виде штриховой меры из сплава платины и иридия. Он представлял собой платино-иридиевый брусок длиной 102 мм, имеющий в поперечном сечении форму буквы X, как бы вписанную в воображаемый квадрат, сторона которого равна 20 мм.

Требования к повышению точности эталона длины (платино-иридиевый прототип метра не может дать точности воспроизведения выше 0,1—0,2 мкм), а также целесообразность установления естественного и неразрушимого эталона привели к принятию (1960 г.) в качестве эталона метра длины, равной $1\ 650\ 763,73$ длины волны и вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p^{10}$ и $5d^5$ атома криптона-86 (криптоновый метр). Этот эталон мог воспроизводиться в отдельных метрологических лабораториях, точность его по сравнению с платино-иридиевым прототипом была на порядок выше.

Дальнейшие исследования позволили создать более точный эталон метра, основанный на длине волны в вакууме монохроматического излучения, генерируемого стабилизированным лазером. За эталон метра в 1983 г. было принято расстояние, проходимое светом в вакууме за $1/299\ 792\ 458$ долей секунды. Данное определение метра было законодательно закреплено в декабре 1985 г. после утверждения единых эталонов времени, частоты и длины.

Другой важной основной единицей в механике является **килограмм**. При становлении метрической системы мер в качестве единицы массы приняли массу одного кубического дециметра чистой воды при температуре ее наибольшей плотности ($4\ ^\circ\text{C}$). Изготовленный при этом первый прототип килограмма представляет собой платино-иридиевую цилиндрическую гирю высотой 39 мм, равной его диаметру. Данное определение эталона килограмма действует до сих пор.

Килограмм — единственная основная величина СИ, не связанная с каким-либо стабильным физическим явлением и соответствующей фундаментальной константой. В настоящее время в мире ведется интенсивная деятельность по разработке нового эталона килограмма. Имеется два основных варианта: через постоянную Планка с помощью ватт-весов и через атомную единицу массы через число Авогадро с помощью образца кристаллического кремния. Килограмм, возможно, станет «электрическим».

Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерения массы определяются ГОСТ 8.021—84.