

Лекция 1 Предмет метрологии. Физическая величина. Системы физических величин, Размерность. Шкалы измерений

Метрология как наука охватывает круг проблем, связанных с измерениями. В дословном переводе с древнегреческого это учение о мерах. Фактически же *метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.*

Потребность в измерениях возникла в незапамятные времена.

Из глубины веков дошли до нас следующие единицы веса:

- единица веса драгоценных камней – **карат**, что в переводе с языков древнего юго-востока означает "семя боба", "горошина" (*1 карат равен 1/5 грамма или 200 мг*);
- единица аптекарского веса – **гран**, что в переводе с латинского, французского, английского, испанского означает "зерно", *1 гран равен 0,065 г (65 миллиграмм)*

Многие меры имели антропометрическое происхождение или были связаны с конкретной трудовой деятельностью человека. Так, в Киевской Руси применялись в обиходе:

- **вершок** – "верх перста" – длина фаланги указательного пальца;
- **пядь** – от "пять", "пятерня" – расстояние между концами вытянутых большого и указательного пальцев (*Академик Б. А. Рыбаков, специально изучавший меры длины XI-XV вв., выяснил, что малая пядь равнялась 19 см, а большая - 22-23 см. В Древней Руси употребляли еще одну пядь, называвшуюся "пядь с кувырком" или, по словарию В. И. Даля, "пядь с кутыркой". Эта пядь была равна малой пяди плюс два (по В. И. Далю) или три сустава указательного или среднего пальца. Таким образом, эта пядь была равной 27 или 31 см.*)
- **локоть** – расстояние от локтя до конца среднего пальца;
- **сажень** – от "сягать", "достигать", т.е. можно достать;
- **косая сажень** – предел того, что можно достать – расстояние от подошвы левой ноги до конца среднего пальца вытянутой вверх правой руки;
- **верста** – от "верти", "поворачивай" плуг обратно, длина борозды.

Древнее происхождение имеют и "естественные" меры. Первыми из них, получившими повсеместное распространение, стали меры времени. На основе астрономических наблюдений древние вавилоняне установили **год, месяц, час**. Впоследствии 1/86400 часть среднего периода обращения Земли вокруг своей оси получила название секунды.

Наряду с этим уже на заре цивилизации люди пришли к пониманию ценности так называемых вещественных мер и единиц измерений. Так, в Вавилоне в XI в. до н.э. время измерялось в минах. **Мина** равнялась промежутку времени (равному, примерно, двум астрономическим часам), за который из принятых в Вавилоне водяных часов вытекала "мина" воды, масса которой составляла около 500 г. *В дальнейшем мина сократилась и превратилась в привычную для нас минуту. Со временем водяные часы уступили место песочным, а затем более сложным маятниковым механизмам.*

Гюйгенс, посвятивший созданию и усовершенствованию маятниковых часов почти 40 лет и считавший это главным делом своей жизни, в 1664 г. писал: "... я нашел легкий и удобный способ регулировки часов. К этому, однако, присоединяется то, что я считаю еще более ценным, а именно: благодаря своему открытию я смог дать абсолютно устойчивое определение для постоянной, верной для всех времен меры длины". Речь идет об использовании свойства изохронности (периодичности) колебаний математического маятника, подмеченного Галилеем еще в 1583 г.

При малых отклонениях маятника период его колебаний равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}},$$

где L - длина маятника; g - ускорение свободного падения.

Это позволяет выразить меру длины через естественную меру времени. В 1824 г. в Англии был принят закон, установивший единицу длины **ярд** через длину секундного маятника.

Элементы метрологии, в X-XVIII вв. на Руси

Ни в древнем мире, ни в средние века не существовало метрологической службы, но имеются сведения о применении образцовых мер и хранении их в церквях и монастырях, а также о ежегодных поверках средств измерений. Так, "**золотой пояс**" великого князя Святослава Ярославича (1070-е гг.) служил образцовой мерой длины, а в "Уставе новгородского князя Всеволода о церковных судах, людях и мерилах торговых" (примерно XIII в.) записано, что меры надлежит "на всякий год взвешивали".

Важнейшим метрологическим документом является Двинская грамота Ивана Грозного (1550 г.). В ней регламентированы правила хранения и передачи размера новой меры объема сыпучих тел - **осьмины (осьмина = 4 четверикам = 104,95 л.)**. Ее медные экземпляры рассылались по городам на хранение выборным людям - старостам, целовальникам. С этих мер надлежало сделать клейменные деревянные копии для городских помещиков, а с тех, в свою оче-

редь, - деревянные копии для использования в обиходе..

Развитие торговли и расширение внешних экономических связей требовало не только уточнения мер, но и установления их соотношения с "заморскими", а также унификации мер и более четкой организации контрольно-поверочной деятельности. Еще в договоре Великого Новгорода с немецкими городами и Готландом (1269 г.), наряду с взаимными обязательствами, приведены соотношения между мерами договаривающихся сторон. Статьи Соборного уложения 1649 г., Таможенного устава 1653 г., Новоторгового устава 1667 г. и других документов установили соответствие различных "весов" фунту и размер сажени.

Московские указы, касавшиеся введения единых мер в стране, отсылались на места вместе с образцами казенных мер. За злоумышленную порчу контрольных мер грозило наказание - вплоть до смертной казни. Работу по надзору за мерами и их поверку проводили два столичных учреждения: **Померная изба и Большая таможня.** Они же разрешали конфликты, возникавшие при торговых операциях.

Метрология в период правления Петра I

Метрологической реформой Петра I к обращению в России были допущены английские меры, получившие особенно широкое распространение на флоте и в кораблестроении - **футы, дюймы.**

Для облегчения вычислений были изданы таблицы мер и соотношений между русскими и иностранными мерами. Начинают выделяться некоторые метрологические центры.

Коммерц-коллегия занялась вопросами единства мер и метрологического обслуживания в области торговли. *Адмиралтейств-коллегия* заботилась о правильном применении угломерных приборов, компасов и соответствующих мер. *Берг-коллегия* опекала измерительное хозяйство горных заводов, рудников и монетных дворов.

Основанная в 1725 г. Петербургская академия наук занялась воспроизведением угловых единиц, единиц времени и температуры. Она имела в своем распоряжении образцовые меры и копии эталонов **туза и фунта** (1 туз - мера длины протяжением около 2 м). **Назревала необходимость создания в стране единого руководящего метрологического центра.**

В 1736 г. по решению Сената была образована **Комиссия весов и мер** под председательством главного директора Монетного двора графа М. Г. Головкина. В состав комиссии входил Л. Эйлер.

В качестве исходных мер длины комиссия изготовила медный аршин и деревянную сажень, за меру жидких тел приняла ведро московского Каменноостовского питейного двора.

Важнейшим шагом, подытожившим работу комиссии, было создание русского эталонного фунта. Работы начались в 1736 г. и завершились в 1747 г. изготовлением бронзовой золоченой гири, узаконенной в качестве первичного образца (государственного эталона) русских мер веса. Этот фунт почти 100 лет оставался единственным эталоном в стране. Сведения о старинных русских мерах приведены в таблице

Единицы длины	Единицы массы	Единицы объема
1 точка = 0,254 мм	1 доля = 44,434940 мг	1 чарка = 1/100 ведра = = 0,122994 дм ³
1 линия = 2,54 мм	1 золотник = 4,265542 г	1 бутылка водочная = 1/20 ведра = 0,61497 дм ³
1 сотка = 2,1336 см	1 лот = 12,797262 г	1 бутылка винная = 1/16 ведра = 0,768712 дм ³
1 дюйм = 2,54 см	1 фунт = 0,40951741 кг	1 штоф = 1/10 ведра = = 1,22994 дм ³
1 вершок = 4,445 см	1 пуд = 16,380496 кг	1 ведро = 12,2994 дм ³
1 фут = 30,48 см		1 четверть = 0,262387 м ³ (для сы- пучих материалов)
1 аршин = 0,7112 м		
1 сажень = 2,1336 м		
1 верста = 1066,8 м		

В комиссии рассматривались (но из-за отсутствия денежных средств и специалистов не были осуществлены) проекты создания системы мер, основанной на физических постоянных (определение сажени через длину меридиана Земли, фунта – через вес определенного количества чистой воды), введение десятичной системы образования кратных и дольных единиц и др. Эти прогрессивные идеи получали в Европе в ту пору все большее распространение.

Разработка и внедрение метрической системы измерений

Идея построения системы измерений на десятичной основе принадлежит французскому астроному Г. Мутону, жившему в XVII в. во Франции, где феодалы имели право пользоваться своими собственными мерами, содержать та-

можни и собирать пошлину. Вопрос о рациональной системе мер стоял особо остро. Восьмого мая 1790 г. Учредительное собрание Франции приняло декрет о реформе системы мер и поручило Парижской академии наук разработать соответствующие предложения. Комиссия академии, руководимая Лагранжем, рекомендовала десятичное подразделение кратных и дольных единиц, а другая комиссия, в состав которой входил Лаплас, предложила принять в качестве единицы длины одну сорокамиллионную часть земного меридиана. На основе этой единственной единицы – метра – строилась вся система, получившая название метрической.

За единицу площади принимался **квадратный метр**, за единицу объема – **кубический метр**, за единицу массы – **килограмм** – масса кубического дециметра чистой воды при температуре 4 °С. Метрическая система с самого начала была задумана как международная. Ее единицы не совпадали ни с какими национальными единицами, а наименования единиц и десятичных приставок были произведены от слов "мертвых" языков (латинского и древнегреческого).

История развития и внедрения метрической системы во Франции. 26 марта 1791 г. Учредительное собрание Франции утвердило предложения Парижской академии наук. Национальный Конвент признавал, что дело реформы мер и весов "как одно из величайших благодеяний революции, должно быть доведено республикой до конца".

7 апреля 1795 г. Конвент принял закон о введении метрической системы во Франции и поручил комиссарам, в число которых входили Кулон, Даламбер, Лагранж, Лаплас и другие ученые, выполнить работы по экспериментальному определению единиц длины и массы. В 1799 г. эта работа, проходившая под наблюдением международной комиссии, была закончена, и утвержденные законом платиновые прототипы метра и килограмма сданы на хранение Архиву Франции. С тех пор они именуются архивными.

Развитие метрологии в XIX-XX вв.

В развитии отечественной метрологии за последние 200 лет можно выделить несколько этапов.

Первый этап стихийной метрологической деятельности – охватывает почти весь XIX в. Этот период характерен централизацией метрологической деятельности и началом широкого участия русских ученых в работе международных метрологических организаций. Так, указом "О системе Российских мер и весов" (1835 г.) были утверждены эталоны длины и массы – платиновая сажень, равная семи английским футам, и платиновый фунт, практически совпадавший по весу с бронзовым золоченым фунтом 1747 г.

В 1842 г. на территории Петропавловской крепости в специально построенном "несгораемом" здании открывается первое централизованное метрологическое и поверочное учреждение России – **Депо образцовых мер и весов**, куда и помещаются на хранение созданные эталоны, их копии, а также образцы различных иностранных мер. В настоящее время эти образцы хранятся в музее Д.И. Менделеева в С.-Петербурге.

В Депо не только хранились эталоны и их копии, но и изготавливались образцовые меры для местных органов, а также проводилась проверка и сличение образцовых мер с иностранными. Эта деятельность регламентировалась "Положением о мерах и весах" (1842 г.), которая заложила основы государственного подхода к обеспечению единства измерений.

Как и многие другие науки, метрология в своем развитии не избежала описательного периода. Он завершился в нашей стране капитальным трудом Ф.И. Петрушевского "Общая метрология", вышедшим в 1849 г, и удостоенным императорской Академией наук Демидовской премии.

Подписание метрической конвенции 20 мая 1875 г. Для русских ученых того времени характерно глубокое понимание роли и места метрологии в науке и жизни. В 1869 г. петербургские академики Б.С. Якоби, Г.И. Вильд и О.В. Струве направили в Парижскую академию наук доклад, в котором предлагалось, с целью обеспечения единства измерений в международном масштабе, изготовить новые международные прототипы метра и килограмма и распределить их однотипные копии между заинтересованными государствами. Это предложение было принято. В результате последующей работы ученых разных стран была подготовлена и 20 мая 1875 г. подписана Метрическая конвенция. Она стала основой международного научного сотрудничества, способствовала унификации мер и расширению метрологической деятельности в национальном и международном масштабах. В соответствии с конвенцией Россия получила платиноиридиевые эталоны единицы массы № 12 и № 26 и эталоны единицы длины № 11 и № 28, которые были доставлены в новое здание Депо образцовых мер и весов (ныне это дом 19 на Московском проспекте в С.-Петербурге).

Второй (менделеевский) этап развития отечественной метрологии. В 1892 г. управляющим Депо был назначен Д. И. Менделеев (1834–1907 гг.), который так много сделал для отечественной метрологии, что период с 1892 по 1917 гг. называют менделеевским этапом развития метрологии. Для него характерно следующее:

- это этап научного становления метрологии, перевода ее в число точных естественно-научных дисциплин, повышения до уровня "главного орудия познания" по образному выражению Д.И. Менделеева;
- это этап осознания народно-хозяйственного значения метрологии, начало глубоко продуманного и планомерного включения метрологической деятельности в хозяйственный механизм страны.

В 1893 г. он преобразует Депо образцовых мер и весов в **Главную палату мер и весов** – одно из первых в мире научно-исследовательских учреждений метрологического профиля. Лишь восемь лет спустя в США организуется Национальное бюро эталонов, а в 1900 г. в Англии – метрологическое отделение Национальной физической лаборатор-

рии. Под руководством Д.И. Менделеева была проведена работа по созданию русской системы эталонов и их сличению с английскими и метрическими мерами, начала создаваться государственная метрологическая служба, реализована широкая программа научных исследований в области метрологии. Собственные научные работы Д.И. Менделеева по метрологии не утратили своего значения и по сей день. **Его научное кредо – "Наука начинается... с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры" – и сейчас определяет роль и место метрологии в системе естественных наук.** Основанные им научные направления, сформированный стиль научно-практической работы, на долгие годы определили пути развития отечественной метрологии, обеспечили ей передовые позиции и высокий авторитет на международной арене.

Но даже Д.И. Менделееву не удалось внедрить в России метрическую систему. С 1899 г. она применялась в стране факультативно, наряду со старой русской и британской (дюймовой) системами. Такое положение тормозило развитие промышленности, усложняло и затрудняло внешние экономические, технические и научные связи.

Третий (нормативный) этап развития отечественной метрологии. Заметные изменения в метрологической деятельности произошли после 1917 г. Декрет "О введении Международной метрической системы мер и весов" был принят Советом Народных Комиссаров 14 сентября 1918 г. Введение метрической системы знаменует собой начало третьего этапа в развитии отечественной метрологии. Этот этап охватывает период до Великой Отечественной войны. Главным его содержанием является переход к государственной метрологической деятельности.

В 1917–27 гг. был осуществлен комплекс мероприятий по созданию государственной метрологической службы. Введена обязательная всероссийская поверка мер и весов, утверждены новые положения о Главной палате мер и весов и о мерах и весах, установлены единые таксы сборов за поверку, введена уголовная ответственность за нарушения положения о мерах и весах и т.д.

Для выполнения декрета от 14 сентября 1918 г. в условиях гражданской войны и разрухи нужно было:

- разработать, изготовить и заменить несколько десятков миллионов гирь и линейных мер;
- обеспечить их клеймение и поверку, для чего требовалось создать сеть поверочных учреждений;
- создать исходные образцовые средства для оснащения этих учреждений;
- создать эталоны единиц метрической системы и средства для передачи информации о размерах этих единиц;
- переработать всю техническую документацию, реорганизовать все измерительное хозяйство на промышленных предприятиях, обеспечить производство измерительного инструмента;
- обеспечить пропаганду метрической системы и обучение населения ее использованию, издать десятки брошюр, книг, преодолеть инерцию мышления и старые привычки.

Одной из первых государственных задач, возложенных на Главную палату мер и весов, было практическое осуществление метрической реформы в стране. Эта грандиозная работа заняла девять лет. Нет ничего удивительного, что дело продвигалось медленно. Сплошь и рядом возникали непредвиденные трудности:

- только для изготовления необходимого количества гирь потребовалось 4,5 млн. пудов дефицитного чугуна;
- по любому вопросу требовалось решение центральных органов власти.

Восьмого января 1919 г. был подписан декрет "О введении нового счета времени по международной системе поясов", в 1921 г. – постановление "О всероссийской поверке мер и весов". Всего за семь послереволюционных лет правительство пять раз принимало решения по различным метрологическим вопросам. В 1924 г. было утверждено "Положение о мерах и весах", с выходом которого завершилась организация государственной метрологической службы СССР.

В 1925 г. было принято постановление "О признании заключенной в Париже 20 мая 1875 г. Международной метрической конвенции для обеспечения международного единства и усовершенствования метрической системы, имеющей силу для СССР". Тем самым были возобновлены международные связи нашей страны в области метрологии.

К 1927 г. завершилась метрическая реформа в СССР. Палаты мер и весов были созданы во всех союзных республиках, государственной службой мер и весов охвачена вся страна.

В годы первых пятилеток правительством был осуществлен также ряд других крупных мер по дальнейшему совершенствованию метрологической службы и стандартизации. 23 ноября 1929 г. было принято постановление об уголовной ответственности за несоблюдение обязательных стандартов и "Положения о мерах и весах".

Война подтвердила высокий уровень метрологического обеспечения народного хозяйства СССР. Перебазирование многих промышленных предприятий на восток при одновременном изменении всей номенклатуры изделий, связанном с переводом промышленности на военные рельсы, не вызвало нарушений в системе обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости.

Четвертый (послевоенный) этап развития отечественной метрологии. Данный этап характеризуется небывалым размахом всей метрологической деятельности. Отличительной его особенностью является повсеместное внедрение стандартизации как главной организационно-правовой формы обеспечения единства измерений. Разработана и внедрена **Государственная система стандартизации (ГСС)**. Организационные принципы построения и основные задачи метрологической службы страны в рамках ГСС регламентируются установленной Госстандартом СССР в 1973 г. структурой метрологической службы и основополагающим ГОСТ 1.25-76 "ГСС. Метрологическое обеспечение. Основные положения". Государственная метрологическая служба к этому времени состояла из почти полутора десятков

институтов и около 250 территориальных органов, возглавляемых Госстандартом СССР с 15 республиканскими управлениями.

Повсеместное использование измерений и измерительной техники в промышленном производстве обусловило создание, наряду с государственной метрологической службой, органов ведомственного контроля за мерами и измерительными приборами. В 1970–80-е гг. в большинстве министерств и ведомств, в производственных объединениях и на крупных предприятиях были организованы ведомственные метрологические службы (отделы главного метролога) с широкими полномочиями в области обеспечения единства измерений.

Появление квалитметрии – раздела метрологии, посвященного проблемам измерения качества продукции, стимулировало распространение идей и методов этой науки на область измерения нефизических величин и ознаменовало начало современного этапа развития метрологии. В настоящее время измерения применяются в экономике, психологии, социологии, истории и многих других гуманитарных науках. Практически не осталось областей человеческой деятельности, где применение измерений для получения достоверной количественной информации не оказало бы существенного влияния на их развитие. Метрология и стандартизация применяются не только в науке и технике, на производстве, но и в быту, в искусстве, в общественной и политической жизни. Поэтому знание основ метрологии, стандартизации, измерений и контроля качества необходимо не только специалистам в области техники, но и каждому культурному человеку.

Современный этап метрологии. В настоящее время в Беларуси формируется принципиально новая национальная система технического нормирования и стандартизации. Это связано с переменами в белорусской экономике, развитием рыночных отношений и внешнеэкономических операций, подготовкой Республики к вступлению во Всемирную торговую организацию (ВТО). В связи с выходом на мировой рынок, предъявляются все более высокие требования к качеству продукции промышленного производства и сельского хозяйства, товарам повседневного спроса (они должны соответствовать уровню международных стандартов).

На сегодняшний день сделан большой шаг и в реформировании технического законодательства Республики Беларусь. **Приняты и вступили в действие законы** “Об обеспечении единства измерений”, “О техническом нормировании и стандартизации” и “Об оценке соответствия требованиям технических нормативных правовых актов в области технического нормирования и стандартизации”, разработанные с учетом соглашений ВТО, практики Европейского Союза, опыта Российской Федерации, Украины, других стран. Данные законы отражают перемены, происходящие в мире для устранения технических барьеров в торговле, создают благоприятные условия предприятиям и организациям для решения задач в области качества.

1.2 ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА, ЕДИНИЦА ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Понятие о физической величине - одно из наиболее общих в физике и метрологии.

Физическая величина — это свойство общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

Мы оперируем такими физическими величинами, как длина, время, температура, сила, давление, скорость и многими другими. Все они определяют общие в качественном отношении физические свойства, количественные же характеристики их могут быть совершенно различными.

Однако объектами измерений могут быть не только физические величины, но и экономические, измерения (органолептические), основанные на использовании органов чувств человека (оценка спортивных выступлений в фигурном катании, гимнастике) и т. д. Другими словами, термин «измерение» не ограничен нахождением значения физической величины, так как часто измеряют и нефизические величины. **Применяются измерения и в нематериальной сфере.** Так, в математике широко используются меры неопределенности, значимости и другие. *Эти величины принципиально отличаются от реальных тем, что не подвержены изменениям вследствие внешних воздействий, для их измерений не требуются технические средства.*

В общем смысле величины можно сгруппировать по признакам: **реальные**, включающие в себя физические и нефизические величины; **идеальные**, включающие в себя математические величины, причем физические можно измерить, нефизические можно оценить или вычислить, математические — вычислить.

Метрология занимается изучением, обработкой, передачей и хранением физическими величинами.

Единица физической величины (единица измерения) — это физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице.

Для выбранной единицы измерения результат измерения может быть представлен в виде

$$\frac{Q}{[q]} = a, \text{ где } Q - \text{измеряемая величина; } q - \text{единица измерения; } a - \text{численное значение.}$$

Эта запись в виде $Q = a[q]$ называется **основным уравнением измерений**.

С древних времен люди пользовались различными единицами для количественного оценивания расстояния, массы тел, продолжительности дня и т. д. Самые древние из единиц относятся к антропометрическим, т. е. те, которые отождествлялись с названиями частей человеческого тела. Например, ладонь (ширина четырех пальцев без большого), пядь (расстояние между паль-

цами расставленного большого и среднего пальцев), фут (длина ступни), шаг и др.

С развитием человеческого общества **антропометрические единицы** заменялись другими. Так, в Англии в XIV веке были узаконены дюйм (равный длине трех приставленных друг к другу ячменных зерен), фут (ширина 64 ячменных зерен, положенных бок о бок) и др. В России была установлена точная величина аршина и полусажени (длиной в 14 английских дюйма).

Начали появляться так называемые сопряженные единицы, т. е. единицы, находящиеся во взаимной связи — верста, сажень, аршин (верста=500 сажням= 1500 аршинам).

Различные меры применялись не только в различных государствах, но и внутри отдельного государства, **что к началу XVIII века привело к хаосу мер и единиц**. Достаточно сказать, что для измерения длины в Европе использовалось около 50 различных по размеру миль.

Развитие науки, техники, торговли потребовало ликвидации, многочисленности единиц. Решение этой проблемы позволило создать метрическую систему мер, в основу которой были положены единицы длины, площади, объема и массы. Впервые это произошло во Франции в конце XVIII века. Основанная на единице длины — метре, она и получила название **метрической**. **Метр был получен путем геодезических измерений и равнялся одной десятиллионной части четверти дуги парижского меридиана**.

Исторически первой системой единиц физических величин была **принятая в 1791 г.** Национальным собранием Франции метрическая система мер. Она не являлась еще системой единиц в современном понимании, а включала в себя единицы длин, площадей, объемов, вместимостей и веса, в основу которых были положены две единицы: **метр и килограмм**.

В 1875 г. после подписания Метрической конвенции метрическая система мер получила международное признание. Однако метрическая система не являлась системой единиц в том смысле, какой придают этому понятию в настоящее время, поскольку в нее входят единицы весьма ограниченного числа величин — длины, массы, времени, площади, объема (вместимости)

Метрическая конвенция создала условия для расширения и укрепления сотрудничества в деле унификации единиц метрической системы мер. После подписания Метрической конвенции было разработано множество систем единиц для различных областей измерений.

Система Гаусса. Впервые понятие системы единиц физических величин было введено немецким математиком К. Гауссом (1832). Идея Гаусса состояла в следующем. Сначала выбирается несколько величин, независимых друг от друга. Данные физические величины называются основными, а их единицы — **основными единицами** системы единиц. Основные величины выбираются так, что бы, пользуясь формулами, выражающими связь между физическими величинами, можно было образовать единицы других величин. Единицы, полученные с помощью формул и выражений через основные единицы, Гаусс назвал производными единицами.

Пользуясь своей идеей Гаусс построил систему единиц магнитных величин. Основными единицами этой системы были выбраны: миллиметр — единица длины, миллиграмм — единица массы, секунда — единица времени.

Хотя система Гаусса не получила широкого распространения из-за малого размера основных единиц, идеи Гаусса оказались весьма плодотворными и все последующие системы единиц строились на предложенных принципах.

Система СГС. Система единиц физических величин СГС, в которой основными единицами являются сантиметр как единица длины, грамм как единица массы и секунда как единица времени, была установлена в 1881 г. В системе СГС с использованием указанных трех основных единиц установлены производные единицы механических и акустических величин. С использованием единицы термодинамической температуры — кельвина — и единицы силы света — канделы — система СГС распространяется на область тепловых и оптических величин.

Система МКС. Основные единицы системы МКС: метр — единица длины, килограмм — единица массы, секунда — единица времени. Эта система была предложена в 1901 г. итальянским инженером Джорджи и содержала кроме основных производные единицы механических и акустических величин.

Система МКСА. В отличие от системы МКС здесь была введена четвертая основная единица ампер (единица силы тока).

Система МТС. Система МТС была разработана во Франции и узаконена ее правительством в 1919 г. Основные единицы системы МТС: метр — единица длины, тонна — единица массы, секунда — единица времени. Данная система была принята и в СССР и в соответствии с государственным стандартом применялась более 20 лет (1933-1955)..

Система МКГСС. Применение килограмма как единицы веса, а в последующем как единицы силы вообще, привело в конце XIX века к формированию системы единиц физических величин с тремя основными единицами: метр - единица длины, килограмм-сила - единица силы и секунда - единица времени. Основной недостаток системы МКГСС — весьма ограниченные возможности применения в физике.

Далее возникла необходимость унификации единиц. В этих условиях XI Генеральная конференция по мерам и весам в 1960 году приняла Международную систему единиц физических величин, получившую у нас в стране сокращенное название СИ (от начальных букв System Internationale — Международная система единиц). В нашей республике Международная система мер является обязательной с 1 января 1980 г.

В настоящее время каждую единицу оценивают по ее отношению к СИ. В связи с этим в измерительной технике используют понятия «система единиц», «системная единица», «внесистемная единица», «основная единица», «производная единица», «дополнительная единица», «кратная единица», «дольная единица» Таким образом, **система единиц физических величин** — это совокупность основных и производных единиц, относящихся к некоторой системе величин и образованная в соответствии с принятыми принципами.

1.3 МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

Наличие ряда систем единиц физических величин, а также значительного числа внесистемных единиц, неудобства, связанные с пересчетом при переходе от одной системы единиц к другой, требовало унификации единиц измерений. Рост научно-технических и экономических связей между разными странами обуславливал необходимость такой унификации в международном

масштабе. Требовалась единая система единиц физических величин, практически удобная и охватывающая различные области измерений. При этом она должна была сохранить принцип *когерентности* (равенство единице коэффициента пропорциональности в уравнениях связи между физическими величинами).

В 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам установила шесть основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин и свеча) практической системы единиц. Система, основанная на утвержденных в 1954 г. шести основных единицах, была названа Международной системой единиц, сокращенно СИ (*SI* - начальные буквы французского наименования *Systeme International*).

Основные единицы СИ

Основные и дополнительные единицы СИ с указанием сокращенных обозначений русскими и латинскими буквами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единицы	
		русское	международное
Основные			
Длина	метр	м	<i>m</i>
Масса	килограмм	кг	<i>kg</i>
Время	секунда	с	<i>s</i>
Сила электрического тока	ампер	А	<i>A</i>
Термодинамическая температура	кельвин	К	<i>K</i>
Сила света	кандела	кд	<i>cd</i>
Количество вещества	моль	моль	<i>mol</i>
Дополнительные			
Плоский угол	радиан	рад	<i>rad</i>
Телесный угол	стерадиан	ср	<i>sr</i>

Определения основных единиц, соответствующие решениям Генеральной конференции по мерам и весам, следующие.

Метр равен длине пути, проходимого светом в вакууме за $1/299792458$ долю секунды.

Килограмм равен массе международного прототипа килограмма.

Секунда равна 9192631770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Кельвин равен $1/273.16$ части термодинамической температуры тройной точки воды.

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0.012 кг.

Кандела равна силе 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.

Дополнительные единицы СИ

Международная система единиц включает в себя две дополнительные единицы - для измерения плоского и телесного углов.

Единица плоского угла - **радиан** (рад) - угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми по длине равна радиусу. В градусном исчислении радиан равен $57^{\circ}17'48''$.

Стерадиан (ср), принимаемый за единицу телесного угла, - телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который вырезает на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, по длине равной радиусу сферы.

Измеряют телесные углы путем определения плоских углов и проведения дополнительных расчетов по формуле

$$Q = 2\pi(1 - \cos \alpha / 2),$$

где Q - телесный угол; α - плоский угол при вершине конуса, образованного внутри сферы данным телесным углом.

Дополнительные единицы СИ использованы для образования единиц угловой скорости, углового ускорения и некоторых других величин. Сами по себе радиан и стерадиан применяются в основном для теоретических построений и расчетов, так как большинство важных для практики значений углов (полный угол, прямой угол и т.д.) в радианах выражаются трансцендентными числами (2π , $\pi/2$ и т.д.).

Производные единицы СИ

Производные единицы Международной системы единиц образуются с помощью простейших уравнений между величинами, в которых числовые коэффициенты равны единице. Так, для линейной скорости в качестве определяющего уравнения можно воспользоваться выражением для скорости равномерного прямолинейного движения $v = l/t$.

При длине пройденного пути (в метрах) и времени t , за которое пройден этот путь (в секундах), скорость выражается в метрах в секунду (м/с). Поэтому единица скорости СИ - метр в секунду - это скорость прямолинейно и равномерно движущейся точки, при которой она за время 1 с перемещается на расстояние 1 м.

Если в определяющее уравнение входит числовой коэффициент, то для образования производной единицы в правую часть уравнения следует подставлять такие числовые значения исходных величин, чтобы числовое значение определяемой производной единицы было равно единице. Например, единица кинетической энергии СИ – килограмм · метр в квадрате на секунду в квадрате - это кинетическая энергия тела массой 2 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, или кинетическая энергия тела массой 1 кг, движущегося со скоростью $\sqrt{2}$ м/с. Эта единица имеет особое наименование - джоуль (сокращенное обозначение Дж).

Кратные и дольные единицы

Наиболее прогрессивным способом образования кратных и дольных единиц является принятая в метрической системе мер десятичная кратность между большими и меньшими единицами.

В табл. 2 приводятся множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования.

Таблица 2

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		русское	международное
10^{18}	экса	Э	<i>E</i>
10^{15}	пета	П	<i>P</i>
10^{12}	тера	Т	<i>T</i>
10^9	гига	Г	<i>G</i>
10^6	мега	М	<i>M</i>
10^3	кило	к	<i>k</i>
10^2	гекто	г	<i>h</i>
10^1	дека	да	<i>da</i>
10^{-1}	деци	д	<i>d</i>
10^{-2}	санти	с	<i>c</i>
10^{-3}	милли	м	<i>m</i>
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	<i>n</i>
10^{-12}	пико	п	<i>p</i>
10^{-15}	фемто	ф	<i>f</i>
10^{-18}	атто	а	<i>a</i>

Следует учитывать, что при образовании кратных и дольных единиц площади и объема с помощью приставок может возникнуть двойственность прочтения в зависимости от того, куда добавляется приставка. Так, сокращенное обозначение 1 км² можно трактовать и как 1 квадратный километр и как 1000 квадратных метров, что, очевидно, не одно и то же (1 квадратный километр = 1.000.000 квадратных метров). В соответствии с международными правилами кратные и дольные единицы площади и объема следует образовывать, присоединяя приставки к исходным единицам.

Основными достоинствами и преимуществами системы СИ перед другими системами единиц являются:

- универсальность, т. е. охват всех областей науки и техники;
- унификация всех областей и видов измерений;

УНИФИКАЦИЯ (от латинского unus - один и...фикация), приведение чего-либо к единой системе, форме, к единообразию. • возможность воспроизведения единиц с высокой точностью в соответствии с их определением;

- упрощение записи формул в физике, химии, а также в технических науках в связи с отсутствием переводных коэффициентов;
- уменьшение числа допускаемых единиц;
- единая система образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования;
- облегчение педагогического процесса в средней и высшей школах, так как отпадает необходимость в изучении множества систем единиц и внесистемных единиц;
- лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между различными странами.

1.4 РАЗМЕРНОСТЬ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Размерность физической величины – одна из важнейших ее характеристик, которую можно определить как буквенное выражение, отражающее связь данной величины с величинами, принятыми за основные в рассматриваемой системе величин. Так, система величин, которая именуется Международной системой единиц, содержит семь основных системных величин: l , m , t , I , T , v и J , где l – длина, m – масса, t – время, I – сила электрического тока, T – термодинамическая температура, v – количество вещества, J – сила света. Для этих величин условно приняты следующие размерности: для длины – L , массы – M , времени – T , силы электрического тока – I , термодинамической температуры – Θ , количества вещества – N и силы света – J . Размерности записывают прописными буквами и печатают прямым шрифтом.

Размерность величины x обозначается через $\dim x$. Например:

$$\dim t = T; \dim l = L; \dim m = M$$

Над размерностями величин, как и над самими величинами, можно производить действия умножения, деления, возведения в степень и извлечения корня. Показатель степени, в которую возведена размерность основной величины, входящей в степенной одночлен, называют показателем размерности.

Размерность производных физических величин определяется исходя из уравнения связи между физическими величинами. Например,

$$\dim v = \frac{\dim l}{\dim t} = \frac{L}{T} = L \cdot T^{-1}; \dim a = \frac{\dim v}{\dim t} = \frac{L \cdot T^{-1}}{T} = L \cdot T^{-2};$$

$$\dim F = \dim m \cdot \dim a = M \cdot L \cdot T^{-2}; \dim A = \dim F \cdot \dim l = M \cdot L^2 \cdot T^{-2}.$$

Различают как размерные, так и безразмерные физические величины. К первым относят такие величины, в размерностях которых хотя бы один из показателей размерности не равен нулю. Безразмерными физическими величинами называют физические величины, в размерностях которых все показатели размерности равны нулю.

По поводу физического смысла размерностей физических величин существуют различные взгляды. М.Планк писал: «Ясно, что размерность какой-либо физической величины не есть свойство, связанное с существом ее, но представляет просто некоторую условность, определяемую выбором системы измерений». Другой точки зрения придерживался известный ученый А.Зоммерфельд. Он связывал выбор основных физических величин и их размерностей с самой сущностью физических величин.

Важно знание не столько размерностей физических величин, сколько использование их для освоения физических знаний. В этой связи интересным является тот факт, что во многих областях физики и смежных науках применяется метод исследования, который получил название **анализа размерностей**.

Анализ размерности — метод, используемый физиками для построения обоснованных гипотез о взаимосвязи различных размерных параметров сложной физической системы. Иногда анализ размерности можно использовать для получения готовых формул (с точностью до безразмерной константы). Суть метода заключается в том, что из параметров, характеризующих систему, составляется выражение, имеющее нужную размерность.

Особенно плодотворным он оказывается в тех случаях, когда нахождение искомой закономерности прямым путем либо встречается значительные математические трудности, либо требует знания таких деталей, которые заранее неизвестны». Применение метода анализа размерностей началось со времени И.Ньютона. Его развивали и уточняли У.Томсон, Дж.Рэлей. Э.Ферми утверждал, что действительно понимающие природу того или иного явления должны уметь получать основные закономерности из соображений размерностей

1.5 Шкалы измерений

Понятия физическая величина и измерение тесным образом связаны с понятием шкалы физической величины - упорядоченной совокупностью значений физической величины, служащей исходной основой для измерений данной величины. **Шкалой измерений называют порядок определения и обозначения возможных значений конкретной величины или проявлений какого-либо свойства.** Понятия шкалы возникли в связи с необходимостью изучать не только количественные, но и качественные свойства природных и рукотворных объектов и явлений. Различают несколько типов шкал.

Шкала наименований (классификации) – это самая простая шкала, которая основана на приписывании объекту знаков или цифр для их идентификации или нумерации. Например, атлас цветов (шкала цветов) или шкала (классификация) растений Карла Линнея. Данные шкалы характеризуются только отношением эквивалентности (равенства) и в них отсутствуют понятия больше, меньше, отсутствуют единицы измерения и нулевое значение. Этот вид шкал приписывает свойствам объектов определенные числа, которые выполняют функцию имен. Процесс оценивания в таких шкалах состоит в достижении эквивалентности путем сравнения испытуемого образца с одним из эталонных образцов. Таким образом, шкала наименований отражает качественные свойства.

Шкала порядка (ранжирования) – упорядочивает объекты относительно какого-либо их свойства в порядке убывания или возрастания, например, землетрясений, силы ветра. Эти шкалы описывают уже количественные свойства. В данной шкале невозможно ввести единицу измерения, так как эти шкалы в принципе нелинейны. В ней можно говорить лишь о том, что больше или меньше, хуже или лучше, но невозможно дать количественную оценку во сколько раз больше или меньше. В некоторых случаях в шкалах порядка может быть нулевая отметка. Например, в шкале Бофорта оценки силы ветра (отсутствие ветра). **Примером шкалы порядка является также пятибалльная шкала оценки знаний учащихся.** Ясно, что «пятерка» характеризует лучшее знание предмета, чем «тройка», но во сколько раз лучше, сказать невозможно. Другими примерами шкалы порядка являются шкала силы землетрясений (например, шкала Рихтера), шкалы твердости, шкалы силы ветра. Некоторые из этих шкал имеют эталоны, напри-

мер, шкалы твердости материалов. Другие шкалы не могут их иметь, например, шкала волнения моря. Шкалы порядка и наименований называют неметрическими шкалами.

Шкала интервалов (разностей) содержит разность значений физической величины. Для этих шкал имеют смысл соотношения эквивалентности, порядка, суммирования интервалов (разностей) между количественными проявлениями свойств. Шкала состоит из одинаковых интервалов, имеет условную (принятую по соглашению) единицу измерения и произвольно выбранное начало отсчета - ноль. Примером такой шкалы являются различные шкалы времени, начало которых выбрано по соглашению (от Рождества Христова, от переселения пророка Мухаммеда из Мекки в Медину). Другими примерами шкалы интервалов являются шкала расстояний и температурная шкала Цельсия. Результаты измерений по этой шкале (разности) можно складывать и вычитать.

Шкала отношений – это шкала интервалов с естественным (не условным) нулевым значением и принятые по соглашению единицы измерений. В ней ноль характеризует естественное нулевое количество данного свойства. Например, абсолютный ноль температурной шкалы. Это наиболее совершенная и информативная шкала. Результаты измерений в ней можно вычитать, умножать и делить. В некоторых случаях возможна и операция суммирования для аддитивных величин. Аддитивной называется величина, значения которой могут быть суммированы, умножены на числовой коэффициент и разделены друг на друга (например, длина, масса, сила и др.). Неаддитивной величиной называется величина, для которой эти операции не имеют физического смысла, например, термодинамическая температура. Примером шкалы отношений является шкала масс – массы тел можно суммировать, даже если они не находятся в одном месте.

Абсолютные шкалы – это шкалы отношений, в которых однозначно (а не по соглашению) присутствует определение единицы измерения. Абсолютные шкалы присущи относительным единицам (коэффициенты усиления, полезного действия и др.), единицы таких шкал являются безразмерными.

Условные шкалы – шкалы, исходные значения которых выражены в условных единицах. К таким шкалам относятся шкалы наименований и порядка. Шкалы разностей, отношений и абсолютные называются метрическими (физическими) шкалами.