

## ЛЕКЦИЯ 2. СИСТЕМА ЕДИНИЦ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### 2.1 Системы единиц физических величин в их историческом развитии

Как было сказано ранее, объектом процесса измерения являются различные физические величины, а результатом измерения – значение физической величины, представленное в определенных единицах, принятых для данной физической величины.

Существовало и существует большое число разнообразных единиц величин, что создает серьезные трудности прежде всего в международных торговых отношениях и обмене результатами научных исследований.

**Система единиц** – это совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин.

Независимые величины называют – **основными** единицами системы, а величины зависящие от основных – **производными**.

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

В 1832г. немецкий математик Карл Фридрих Гаусс предложил методику построения системы единиц как совокупности основных и производных единиц физических величин. За основу были приняты три независимые друг от друга единицы: миллиметр – единица длины; миллиграмм – единица массы, секунда – единица времени. Все остальные можно было определить с помощью этих трех. Такую систему единиц, связанных определенным образом с тремя основными единицами длины, массы и времени, Гаусс назвал *абсолютной системой*.

В дальнейшем с развитием науки и техники появился ряд систем единиц физических величин, построенных по принципу, предложенному Гауссом, базирующихся на метрической системе мер, но отличающихся друг от друга основными единицами.

**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 принята в 1881г. Первым международным конгрессом электриков. Конгресс основывался на принципах, предложенных Гауссом, и ввел наименование для двух важнейших производных единиц: **дина** – для измерения силы и **эрг** – работы. Для измерения мощности в системе СГС применяется эрг в секунду, кинетической вязкости – стокс, динамической – пауз.

Давление в системе СГС измеряют в динах на квадратный сантиметр. Эта единица в прошлом называлась бар, однако в связи с переименованием в

бар единицы давления, равной  $10^5 \text{ Н/м}^2$ , для единиц давления СГС иногда применяют наименование барий и одновременно микробар (так как она равна одной миллионной нового бара).

В области механических измерений система СГС опирается на три основных единицы, из которых остальные образуются как производные.

Сложнее обстоит дело с применением системы СГС для электрических и магнитных измерений. Исторически сложилось так, что для них к настоящему времени существуют семь видов системы СГС для электрических и магнитных величин, из которых наиболее распространены три:

1) система СГСЭ, построенная на трех основных единицах – сантиметре, грамме, секунде; диэлектрическая проницаемость вакуума принята равной безразмерной единице. Эта система называется также **абсолютной электростатической системой единиц**;

2) система СГСМ, основные единицы которой такие же, как и системы СГСЭ – сантиметр, грамм, секунда, а магнитная проницаемость вакуума принята равной безразмерной единице. Эта система называется также **абсолютной электромагнитной системой единиц**;

3) система СГС, называемая также **симметричной** или **системой Гаусса**. Это синтез систем СГСЭ и СГСМ. В ней электрические единицы совпадают с электрическими единицами СГСЭ, а магнитные – с магнитными единицами СГСМ. Как выяснилось впоследствии, такое слияние оказалось не совсем корректным, так как ряд единиц оказались не согласованными между собой.

**Система МКГСС.** В период установления метрической системы мер, в конце XVIII в., килограмм был принят как единица веса.

Применение килограмма как единицы веса, а в последующем как единицы силы вообще, привело в конце XIX в. к формированию системы единиц физических величин с тремя основными единицами: **метр** – единица длины, **килограмм-сила** – единица силы и **секунда** – единица времени. Килограмм-сила (кгс) – это сила, которая сообщает массе, равной массе международного прототипа килограмма, ускорение  $9,80665 \text{ м/с}^2$  (нормальное ускорение свободного падения).

Эта система единиц широко распространилась в механике и технике, получив неофициальное наименование «техническая». Одной из причин распространения системы МКГСС явилось удобство выражения сил в единицах веса и удобный размер основной единицы силы – килограмм-силы.

За **единицу массы** в системе МКГСС принята масса тела, получающего ускорение  $1 \text{ м/с}^2$  под действием приложенной силы 1 кгс. Эта единица (килограмм-сила-секунда в квадрате на метр) иногда называется **технической единицей массы** или **инертной**, хотя оба эти наименования не установлены ни в одной из рекомендаций на единицы физических величин. Единица массы МКГСС –  $1 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2 / \text{м} \approx 9,81 \text{ кг}$  – единицы массы системы СИ. Широко применялись в технике единицы работы и энергии МКГСС – килограмм-сила-метр (кгс·м) и единица мощности – килограмм-сила-метр в секунду (кгс·м/с).

**Система МТС.** В системе единиц МТС основными единицами являются: единица длины – метр, единица массы – тонна и единица времени – секунда.

Система МТС была разработана во Франции и узаконена ее правительством в 1919 г. Система МТС была принята и в СССР и в соответствии с государственным стандартом применялась более 20 лет (1933 – 1955). Выбор тонны в качестве основной единицы массы казался удачным, так как достигалось соответствие между единицами длины и объема с одной стороны, и единицей массы – с другой (с точностью, достаточной для большинства технических расчетов, 1 т соответствует массе  $1\text{ м}^3$  воды). Кроме того, единица работы и энергии в этой системе (килоджоуль) и единица мощности (киловатт) совпадали с соответствующими кратными практическими электрическими единицами.

В системе МТС единицей силы служит стен (сн), равный силе, сообщаемой массе 1 т ускорение  $1\text{ м/с}^2$ , единицей давления – пьеза –  $1\text{ сн/м}^2$ .

**Абсолютная практическая система электрических единиц.** Эта система также была установлена в 1881 г. первым Международным конгрессом электриков в качестве производной от системы СГСМ и предназначалась для практических измерений в связи с тем, что электрические и магнитные единицы системы СГСМ оказались неудобными для практики (одни слишком велики, другие слишком малы). В числе первых практических электрических единиц были приняты:

- практическая единица электрического сопротивления, равная  $10^9$  единицам сопротивления СГСМ, которая получила впоследствии наименование «ом»;
- практическая единица электродвижущей силы, равная  $10^8$  единицам электродвижущей силы СГСМ, названная «вольт»;
- практическая единица силы электрического тока, равная  $10^{-1}$  электромагнитным единицам силы тока СГСМ, названная «ампер»;
- практическая единица электрической емкости, равная  $10^{-9}$  единицам электрической емкости СГСМ, названная «фарада».

Спустя восемь лет – в 1889 году, Второй Международный конгресс электриков включил в список практических электрических единиц еще три:

- практическую единицу энергии, равную  $10^7$  единицам энергии СГСМ, названную «джоуль» (конгресс проходил в год смерти Джеймса Джоуля);
- практическую единицу мощности, равную  $10^7$  единицам мощности СГСМ, названную «ватт»;
- практическую единицу индуктивности, равную  $10^9$  единицам индуктивности СГСМ, названную «квадрант» (впоследствии это наименование заменено на «генри»).

В дальнейшем решениями МЭК и ГКМВ были установлены другие практические электрические и магнитные единицы (например, вебер, сименс, тесла).

**Система МКСА.** Основы этой системы были положены в 1901г. итальянским ученым Джованни Джорджи, поэтому система имеет и второе наименование, принятое в 1958г. МЭК – «система Джорджи», но не получившая, однако, распространения. Основными единицами системы МКСА являются метр, килограмм, секунда и ампер. В системе МКСА сила измеряется в ньютонах, работа и энергия – джоулях, мощность – ваттах. В системе МКСА механические единицы полностью согласованы с единицами абсолютной практической системы электрических и магнитных единиц – ампером, вольт, ом, кулоном и др. В общем, система МКСА была уже очень похожа на ныне победившую Международную систему единиц СИ.

Несмотря на определенные преимущества, которые дает применение единиц, определяемых той или иной системой, до настоящего времени широко распространены различные единицы, не укладывающиеся ни в одну из систем. Число так называемых **внесистемных единиц** довольно велико, и от многих из них нельзя отказаться в виду удобства их применения в определенных областях, другие из них сохранились в силу исторических традиций.

Так, исторически возникла единица давления – **техническая атмосфера**, равная давлению, производимому силой 1 кгс на площадь 1 см<sup>2</sup>, ибо атмосфера близка по размеру к среднему давлению атмосферного воздуха на уровне моря.

Все внесистемные единицы можно объединить в три группы.

**В первую группу** входят важнейшие внесистемные единицы, имеющие широкое применение: единицы длины – ангстрем, световой год, парсек; площади – ар, гектар; объема – литр; массы – карат; давления – атмосфера, бар, миллиметр ртутного столба, миллиметр водяного столба; количества теплоты – калория; электрической энергии – электрон-вольт, киловатт-час; акустических величин – децибел, октава; ионизирующих излучений – рентген, рад, кюри.

**Вторую группу** образуют внесистемные единицы, построенные из основных единиц системы не по десятичному принципу. К ним в первую очередь относятся такие распространенные единицы времени, как минута и час.

Наконец, **третью группу** образуют единицы, не связанные с какой-либо системой. Сюда входят все устаревшие национальные единицы, такие как старые русские, английские и т.п.

В науке и технике также широко распространены относительные и логарифмические величины и их единицы, которыми характеризуют состав и свойства материалов, отношения энергетических и силовых величин, например, относительное удлинение, относительная плотность, относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, усиление и ослабление мощностей и т. п.

**Относительная величина** представляет собой отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную. Относительные величины могут выражаться в безразмерных единицах (когда отношение двух одноименных величин равно 1), в процентах – % (когда от-

ношение равно  $10^{-2}$ ), промилле – ‰ (отношение равно  $10^{-3}$ ), продецимилле –  $\text{‰‰}$  (когда отношение равно  $10^{-4}$ ) и т. д.

Примером относительных величин могут быть относительные атомные или молекулярные массы химических элементов, которые выражаются по отношению к одной двенадцатой ( $1/12$ ) массы атома углерода-12.

**Логарифмическая величина** представляет собой логарифм (десятичный, натуральный или по основанию 2) безразмерного отношения двух одноименных физических величин. Такие величины применяют для выражения уровня звукового давления, усиления, ослабления, выражения частотного интервала и т. п.

На логарифмической шкале длина отрезка пропорциональна логарифму отношения величин, отмеченных на концах этого отрезка, в то время как на шкале в линейном масштабе длина отрезка пропорциональна разности величин на его концах. Логарифмическая шкала исключительно удобна для отображения очень больших диапазонов значений величин.

Единицами логарифмических величин являются бел (Б) и непер (Нп). Бел определяется соотношением  $1\text{Б} = \lg P_2/P_1$  при  $P_2 = 10P_1$ , где  $P_2$  и  $P_1$  - одноименные энергетические величины (мощности, энергии, плотности энергии и т. п.). Дольной единицей от бела является децибел (дБ), равный 0,1 Б.

Например, в случае характеристики усиления электрических мощностей, если отношение полученной мощности  $P_2$  к исходной  $P_1$  равно 10, то логарифмическая величина усиления будет составлять 1Б или 10дБ, при увеличении или уменьшении мощности в 1000 раз логарифмическая величина усиления составит 3Б или 30дБ и т. д.

## 2.2 Международная система единиц физических величин СИ

В 1950 – 1960-е гг. все чаще проявлялось стремление многих стран к созданию единой универсальной системы единиц, которая могла бы стать международной. В числе общих требований к основным и производным единицам выдвигалось требование когерентности такой системы единиц (производные единицы должны представлять собой произведения степеней основных единиц с коэффициентом пропорциональности, равным единице).

Дело в том, что одновременное применение разных систем единиц в отдельных областях привело по сути дела к засорению многих расчетных формул числовыми коэффициентами, не равными единице, что сильно усложнило расчеты. Например, в технике стало обычным применение для измерения массы единицы системы МКСА – килограмма, а для измерения силы – единицы системы МКГСС – килограмм-силы. Это представлялось удобным с той точки зрения, что числовые значения массы (в кг) и веса (в кгс), т. е. силы притяжения к Земле, оказались равными (с точностью, достаточной для большинства практических случаев). Однако следствием приравнивания значений разнородных по существу величин было появление во многих формулах числового коэффициента 9,81 и к смешению понятий массы и веса, которое породило много недоразумений и ошибок.

Такое многообразие единиц и связанные с этим неудобства породили идею создания универсальной системы физических величин всех отраслей науки и техники, которая могла бы заменить все существующие системы и отдельные внесистемные единицы. Такой системой стала Международная система единиц СИ.

В 1954 г. X Генеральная конференция по мерам и весам установила шесть основных единиц для международных сношений: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча.

В 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам утвердила Международную систему единиц, обозначаемую сокращенно SI (начальные буквы французского наименования *Le Système International d'Unités*), в русской транскрипции – СИ.

В результате некоторых видоизменений, принятых Генеральной конференцией по мерам и весам в 1967, 1971, 1979, 1995 гг., в настоящее время система включает в себя семь основных единиц. До недавнего времени единицы плоского угла и телесного угла были выделены в особую группу так называемых дополнительных единиц. С 1995 года они переведены в разряд производных единиц (см. таблицу 2.1).

Универсальность СИ обеспечивается тем, что семь основных единиц, положенных в ее основу, являются единицами физических величин, отражающих основные свойства материального мира, и дают возможность образовывать производные единицы для любых физических величин во всех отраслях науки и техники.

Таблица 2.1

## Международная система единиц СИ

Величина	Единица измерений	Обозначение		
		международное	русское	формула
Основные единицы системы СИ				
Длина	метр	m	м	$L$
Масса	килограмм	kg	кг	$M$
Время	секунда	s	с	$T$
Сила электрического тока	ампер	A	А	$I$
Термодинамическая температура	кельвин	K	К	$\Theta$
Количество вещества	моль	mol	моль	$N$
Сила света	кандела	cd	кД	$J$
Некоторые производные единицы системы СИ				
Площадь	квадратный метр	m <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>	$L^2$
Объем	кубический метр	m <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	$L^3$
Частота	герц	Hz	Гц	$T^{-1}$
Скорость	метр на секунду	m/s	м/с	$LT^{-1}$
Ускорение	метр на секунду в кв.	m/s <sup>2</sup>	м/с <sup>2</sup>	$LT^{-2}$
Сила	ньютон	N	Н	$LMT^{-2}$
Давление	паскаль	Pa	Па	$L^{-1}MT^{-2}$
Работа	джоуль	J	Дж	$L^2MT^{-2}$
Мощность	ватт	W	Вт	$L^2MT^{-3}$
Электрический заряд	кулон	C	Кл	$IT$
Магнитная индукция	тесла	T	Тл	$I^{-1}MT^{-2}$

Преимущества системы СИ перед другими системами единиц состоят в том, что:

- 1) Система СИ является универсальной, охватывая все области науки, техники, производства.
- 2) Система СИ построена для некоторой системы величин, позволяющих представить явления в форме математических уравнений.
- 3) Коэффициенты пропорциональности в физических уравнениях системы СИ, определяющих единицы производных величин, равны безразмерной единице (выполняется требование когерентности);
- 4) В системе СИ устранена множественность единиц (унификация единиц для всех видов измерений) для выражения величин одного и того же ряда. Например, вместо большого числа единиц давления, применявшихся на практике, единицей давления в системе СИ принята только одна единица – паскаль. В области тепловых измерений произведен переход от отдельного измерения работы и количества теплоты в джоулях и калориях к единому измерению в джоулях.
- 5) Установление в системе СИ для каждой физической величины своей единицы, позволило разграничить понятие массы (кг) и веса (Н). Понятие массы следует использовать во всех случаях, когда имеется в виду свойство тела или вещества, характеризующие его инертность и способность создавать гравитационные поля, а понятие веса необходимо использовать в случаях, когда имеется в виду сила, возникающая вследствие взаимодействия с гравитационными полями;
- 6) Определение основных единиц СИ возможно с высокой степенью точности, что в конечном счете не только позволяет повысить точность измерений, но и обеспечить их единство. Это достигается путем «материализации» единиц в виде эталонов и передачи от них измерений с помощью комплекса образцовых средств измерений.

Международная система единиц СИ, благодаря своим преимуществам, получила широкое распространение в мире. Так все страны перешли на единицы системы СИ. Страны, где ранее применялась английская система мер (Великобритания, Австралия, Канада, США и др.) также внедряют единицы системы СИ.