

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Рассмотрим некоторые базовые понятия физики.

Для начала введем понятие физическая величина. В рекомендациях по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99 «Метрология. Основные термины и определения» дано следующее определение: *физическая величина* – одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них. Таким образом, свойства физических объектов и процессов, которые можно прямо или косвенно измерить, называют физическими величинами. В качестве примера физической величины можно привести следующие свойства физических объектов и процессов: масса тела, его объем, плотность, скорость и т. д.

При измерении физической величины ее значение Q сравнивают с **единицей измерения** $[Q]$, т. е. с однородной величиной, принятой за эталон. Важно отметить, что сравнивать можно только однородные физические величины (например, нельзя сравнивать массу тела с его объемом, поскольку они измеряются в разных единицах: масса в кг, а объем в м³). Число, которое получается при измерениях, называется **численным значением** $\{Q\}$ физической величины:

$$Q = \{Q\} \cdot [Q]. \quad (1)$$

Таким образом, любая физическая величина равна произведению численного значения и единицы измерения. Результат измерения физической величина определяется числом с указанием единицы измерения. Число с указанием единицы измерения называется именованным.

Физические величины связываются математическими уравнениями. Можно выделить несколько независимых величин, которые не сводятся одна к другой, т. е. не могут быть выражены через другие физические величины. Их называют **основными** физическими величинами, а соответствующие им

единицы измерения – **основными единицами измерения**. Эти физические величины, вообще говоря, можно выбрать произвольно. Поэтому до определенного момента существовало множество различных систем измерения. Понятно, что для развития мировой науки использование многочисленных систем измерения, отличающихся в каждой стране, совершенно неэффективно. Поэтому существует международное соглашение, которое определяет базисные физические величины. Их выбор обусловлен только соображениями удобства. Все остальные физические величины называются **производными**. *Производная физическая величина* – физическая величина системы величин, определяемая через основные величины этой системы. Производные физические величины можно представить в виде произведения основных физических величин A_i :

$$Q = A_1^{\alpha_1} \cdot A_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot A_n^{\alpha_n}, \quad (2)$$

где показатели степени α_i принадлежит множеству рациональных чисел. Совокупность взаимосвязанных основных и производных физических величин образуют **систему физических величин (СВФ)**.

Совокупность взаимосвязанных основных и производных единиц образуют **систему единиц физических величин (СЕФВ)**. В октябре 1960 года **XI Генеральной международной конференцией по мерам и весам (ГКМВ, англ. General Conference on Weights and Measures (CGPM))** была принята **Международная системы единиц (СИ)**. СИ основана на **Международной системе величин (англ. International System of Quantities, ISQ)**.

Основных единиц физических величин в системе СИ **семь**:

- *метр (м)* – единица измерения *длины*;
- *килограмм (кг)* – единица измерения *массы*;
- *секунда (с)* – единица измерения *времени*;
- *ампер (А)* – единица измерения *силы электрического тока*;
- *кельвин (К)* – единица измерения *температуры*;

- *моль* (моль) – единица измерения *количества вещества*;
- *кандела* (кд) – единица измерения *силы света*.

Производные единицы измерения в СИ получаются из основных по уравнению (2).

Поначалу, помимо основных и производных, существовал третий класс единиц – **дополнительные единицы**. В него входили единицы измерения плоского угла и телесного (угла радиан и стерadian соответственно). Появление третьего класса единиц системы СИ обусловлено тем, что введение угловых единицы в число основных неизбежно вызвало бы затруднения в трактовке размерности величин, связанных с вращением (например, площади круга). Но угол и телесный угол могут только условно считаться размерными величинами. Они могут быть измерены в радианах и стерadianах в любой системе единиц, следовательно, эти величины фактически безразмерны, так как их численные значения не меняются при переходе от одной системы единиц измерения к другой.

В 1995 г. XX ГКМВ (Резолюция 8) постановила исключить класс дополнительных единиц в СИ, а радиан и стерadian считать безразмерными производными единицами СИ (имеющими специальные наименования и обозначения), которые могут быть использованы или не использованы в выражениях для других производных единиц СИ (по необходимости).

Для основных единиц измерения системы СИ существуют точные определения, хотя на практике эти определения реализуются с конечной точностью. Исследователи всегда стремились связать основные физические величины с фундаментальными постоянными, которые можно в любое время измерить с хорошей **воспроизводимостью**. На сегодняшний день эта задача полностью выполнена.

РАЗМЕРНОСТЬ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Определим понятие **размерности** физической величины. Различные физические величины, как уже было упомянуто, связаны между собой

определенными соотношениями. Поскольку некоторые из этих величин приняты за основные и для них установлены какие-то единицы измерения (как это, например, сделано в системе СИ), то единицы измерения всех остальных величин будут определенным образом выражаться через единицы измерения основных величин. Поэтому нет необходимости отдельно определять единицы измерения для каждой физической величины: они выражаются через произведение единиц измерения основных физических величин с целыми показателями степени, в котором численные множители опущены (равны единице). В СИ были введены следующие обозначения размерностей основных физических величин: длины – L , массы – M , времени – T , силы тока – I , температуры – Θ , количества вещества – N , силы света – J . Символы L , M , T ... и т. д. представляют собой обобщенное обозначение единиц длины, массы, времени и т. д. без указания конкретного размера единиц. Для указания размерностей используют символ \dim . Размерность некоторой величины в общем виде в системе СИ выражается как

$$\dim Q = L^{\alpha_1} \cdot M^{\alpha_2} \cdot T^{\alpha_3} \cdot I^{\alpha_4} \cdot \Theta^{\alpha_5} \cdot N^{\alpha_6} \cdot J^{\alpha_7} . \quad (3)$$

Показатели степени α_i – как правило, небольшие целые числа, которые могут быть положительными, отрицательными или равными нулю, они называются показателями размерностей. Если все они равны нулю, то величина Q будет **безразмерной**. Например, размерность давления имеет вид

$$\dim P = \dim \left(\frac{F_n}{S} \right) = \frac{MLT^{-2}}{L^2} = L^{-1}MT^{-2} . \quad (4)$$

Выражение (3) называется **формулой размерности**, она показывает, как изменяется производная единица при изменении основных единиц. Для того чтобы уяснить понятие размерность, нам нужно сделать несколько замечаний. **Единица измерения и размерность физической величины – это разные понятия**. Проиллюстрируем сказанное на следующем примере. Скорость можно измерять в $м/с$, $км/ч$, $см/ч$, $км/с$. Все зависит от удобства

использования в конкретной ситуации. Все единицы измерения зависят от человека, а в Природе нет никаких единиц измерения. Физические законы ни от человека, ни от единиц измерения не зависят. Скорость материальной точки по определению $\vec{v} = d\vec{r}/dt$, где \vec{r} – радиус-вектор этой точки, t – время. В каких бы единицах вы не измеряли скорость, ее связь с \vec{r} и t не изменится. Более того единица измерения скорости в системе СИ $м/с$, а в СГС (сантиметр-грамм-секунда) $см/с$, а размерность одинаковая $\dim v = LT^{-1}$.

Размерность показывает связь одних физических величин с другими (базисными или основными).

Таким образом, *размерность единицы физической величины, или просто размерность величины* – выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведения сомножителей, соответствующих основным величинам, в некоторых степенях (причем степени эти могут быть положительными и отрицательными, целыми и дробными) и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные, в котором коэффициенты пропорциональности равны единице.

Использование термина «произведение» в определении размерности не совсем корректно, так как это может привести к **ошибочному** суждению о том, что символы размерностей перемножаются.

О размерности можно говорить только применительно к определенной системе единиц измерения. В разных системах единиц измерения формула размерности для одной и той же величины может содержать различное число аргументов и может иметь различный вид. Хотя в пределах выбранной системы единиц измерения формулы размерности всех физических величин имеют форму степенного одночлена вида (3).

Поскольку каждой физической величине сопоставляется ее размерность, то может возникнуть вопрос: не являются ли эти понятия взаимозаменяемыми? Следует отметить, что физическая величина и ее размерность не одно и то же. Одинаковую **размерность могут иметь**

совершенно разные по своей природе физические величины. Например, работа и вращающий момент, линейная плотность электрического тока и напряженность магнитного поля и т. п. Размерность не содержит информации о том, является ли данная физическая величина скаляром, вектором или тензором. Но размерность очень важна для проверки правильности соотношений между физическими величинами.

Все вышесказанное о размерности можно резюмировать следующим образом.

1. Размерностью называется выражение единиц измерения произвольной физической величины через единицы измерения величин, принятых за основные.
2. Размерность любой физической величины может быть только произведением возведенных в степень размерностей величин, принятых за основные.
3. Размерности обеих частей равенства, выражающего некоторую физическую закономерность, должны быть одинаковы.

Эти три тривиальных положения лежат в основе **теории подобия и размерности.**

Третий пункт отражает такую математическую процедуру как анализ размерности, которая позволяет анализировать уравнения, в отношении которых присутствует сомнение, верны ли они. Проиллюстрируем его на простом примере.

Как известно, период колебаний математического маятника длиной l равен:

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

где g – ускорение свободного падения. Многие школьники путают местами величины стоящие под корнем (l и g). Чтобы устранить все сомнения, нужно произвести анализ размерности данного выражения. Мы знаем, что размерности обеих частей равенства, выражающего некоторую физическую

закономерность, должны быть одинаковы. Размерность периода $\dim T = T$. Найдем размерность выражения стоящего справа: 2π – это безразмерный коэффициент, размерность оставшейся части выражения можно получить после некоторого преобразования. Пусть $T = 2\pi C(g, l)$, где $C(g, l) = \sqrt{l/g} = l^{1/2} \cdot g^{-1/2}$, тогда, поскольку $\dim l = L$, а $\dim g = LT^{-2}$, $\dim C(g, l) = L^{1/2} (LT^{-2})^{-1/2} = T$. Как мы видим, размерности обеих частей равенства совпали, а это значит, что равенство верное. Похожим образом еще до проведения эксперимента можно определить (с точностью до константы) зависимость косвенно измеряемой величины, от величин измеряемых напрямую (при условии, что мы учли все величины, которые могут оказывать влияние на значение искомой величины).