

## Лекция 2.3

### О ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИНАХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРАКТИКЕ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Более 40 лет назад была введена обязательная для всех Международная система единиц (СИ), на использование которой давно должен был бы перейти весь мир. Однако до сих пор в силу привычек, а также недостатка на рабочих местах электростанций приборов с соответствующей градуировкой в практике используются и другие многочисленные единицы физических величин и их производные, что часто затрудняет общение, особенно теплоэнергетиков тех стран, в которых используются разные внесистемные единицы. Если при посещении какой-либо ТЭС в Англии на вопрос о начальных параметрах энергоблока вам ответят, что они составляют 3400 psi (3400 фунтов на квадратный дюйм) и 1000 °F (1000 градусов по Фаренгейту), то эти цифры, возможно, вам почти ничего не скажут. Вместе с тем это 239 атмосфер и 538 °C, т. е. параметры, практически совпадающие с параметрами наших энергоблоков на сверхкритические параметры пара. Конечно, использование различных систем единиц неудобно, и выход из этого только один: необходимо иметь под рукой справочник или микрокалькулятор, позволяющие быстро осуществлять перевод в привычные для нас единицы.

Теплотехника и, в частности, теплоэнергетика – это инженерные науки. Поэтому они «начинаются с цифры» и, имея то или иное отношение к теплоэнергетике, нельзя не знать некоторого набора величин и их значений. Нельзя, например, не знать, что КПД типичного паротурбинного энергоблока находится на уровне 40 %, газотурбинной установки – 36 %, а парогазовой – 50 %. Поэтому, напоминая о физических величинах и единицах их измерения, мы одновременно будем касаться диапазона значений этих величин для объектов теплоэнергетики.

Единицей измерения длины в системе СИ является *метр*. В метрах, например, измеряются длины турбоагрегатов (например, длина турбины мощностью 1200 МВт составляет около 48 м), размеры машинного зала тепловых электростанций, высотные отметки установки оборудования.

Для измерения размеров деталей обычно используют *миллиметры*. К примеру, очень редко можно услышать, что длина лопатки последней ступени турбины равна 1,2 м; обычно говорят – 1200 мм. В миллиметрах измеряют зазоры между деталями (например, радиальные зазоры между вращающимся ротором и статором составляют 0,5–1,5 мм),

тепловых расширений турбины на фундаменте (они могут достигать 10 мм) и т.д.

Очень малые линейные величины измеряют в *микрометрах* (микронах):  $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ . В микрометрах измеряют, например, размах вибраций корпусов подшипников турбины, толщину масляной пленки в опорных подшипниках, на вкладышах которых вращается ротор (обычно это 20–30 мкм).

В теплоэнергетической практике нашей страны для измерения длин никогда не используются сантиметры, ангстремы, километры, световые года и парсеки, не говоря уже о милях, ярдах, саженьях и т.д. Сказать, что длина рабочей лопатки равна 96 см, можно, но это плохой тон.

Для измерения массы в системе СИ, и на практике, чаще всего используют *килограмм* и кратные ему величины: грамм и тонну. В килограммах измеряют массы отдельных деталей (например, масса упомянутой рабочей лопатки последней ступени длиной 960 мм равна примерно 12 кг), в *граммах* – например, значения масс балансировочных грузов, в *тоннах* – массу крупных объектов (например, полная масса турбины мощностью 500 МВт составляет 1000 т, а ее наиболее тяжелая часть – 100 т). Однако в практике теплоэнергетики для измерения массы никогда не используют центнеры, пуды и тем более фунты.

Единицей времени в системе СИ является *секунда*. Секундами пользуются для анализа быстропротекающих процессов в системах автоматического регулирования турбин (и даже сотыми ее долями), в проточных частях турбин, насосов, в паропроводах и трубопроводах. Минутами и часами обычно пользуются для описания менее быстрых процессов, например, длительности этапов пуска, нагружения, разгружения и остановки турбины, протекающих от нескольких минут до нескольких часов. Например, пуск паровой турбины после ночного простоя занимает 30–40 мин, а длительность пуска энергоблока после ремонта может достигать 3–5 ч.

В часах обычно измеряется наработка турбины и ресурсы различного типа. Например, назначенный ресурс составных частей оборудования энергоблоков за редким исключением должен быть не менее 200 тыс. ч, наработка турбины на отказ работоспособности (он должен быть не менее 5000 ч для паровых турбин и 3000 ч для газовых турбин).

Днями или *сутками* измеряются продолжительность ремонтов (например, продолжительность плановых ремонтов для энергоблоков мощностью 800 МВт: капитального – 72–73 дня, среднего – 37–42 дня, текущего – 10 дней). *Годами* измеряются межремонтный срок службы турбины (он должен быть не менее 4 лет), срок службы турбины до списания (не менее 40 лет).

Очень полезно запомнить, что 1 год = 8760 ч.

*Температура* в системе СИ измеряется в кельвинах (К) (но не в градусах Кельвина!). Численно  $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ К}$ , а температуры в кельвинах  $T$  и градусах Цельсия  $t$  связаны соотношением:

$$T = t + 273,15.$$

В практике стационарной теплоэнергетики пользуются исключительно стоградусной шкалой (градусами Цельсия).

Рассмотренные единицы – длины, массы, времени и температуры (в кельвинах) входят в состав основных единиц СИ. Все остальные единицы являются производными от основных.

Площадь и объем обычно измеряются соответственно в  $\text{м}^2$  и  $\text{м}^3$ . Гектары и литры в практике теплоэнергетики не используются.

Особо необходимо сказать о единицах измерения количества природного газа. Проще всего для этой цели было бы использовать единицы массы (кг или т). Однако исторические и технические причины привели к тому, что количество природного газа измеряется в единицах объема ( $\text{м}^3$ ). Это очень неудобно, так как в равных объемах при разных давлениях содержится разная масса природного газа, содержащая различную тепловую энергию. Поэтому количество природного газа измеряют в так называемых *нормальных кубометрах*, т.е. приведенных к «нормальным» условиям (отсутствию влаги, температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлению 1 атм – см. ниже). В большинстве случаев слово «нормальный» перед кубометром опускают, но при проведении расчетов всегда следует помнить, что речь идет именно о них.

*Скорость* среды (пара, воды) и линейная скорость перемещения деталей турбины измеряется в м/с, но никогда в км/ч. Например, скорость течения пара в элементах турбины составляет 50–500 м/с. Как правило, интенсивность вибрации измеряется так называемой *виброскоростью*, измеряемой в мм/с непосредственно прибором. Каждый машинист турбины знает, что нормальный уровень вибрации составляет 2,8 мм/с, а при возрастании вибрации до 7,1 мм/с он должен немедленно остановить турбину.

*Частота вращения* измеряется числом оборотов в секунду или минуту. Поскольку частота сети в нашей стране 50 Гц, то частота вращения турбоагрегатов, включенных в электрическую сеть составляет 50 или 25 об/с (соответственно 3000 и 1500 об/мин).

*Сила* и вес тел в системе СИ измеряется в *ньютон*ах (Н). Однако на практике часто пользуются внесистемной единицей – *килограмм-силой* (кгс). Легко запомнить, что

1 кгс = 9,8 Н ≈ 10 Н.

*Давление и механическое напряжение* (возникающее в теле под воздействием приложенных к нему сил) в системе СИ измеряются в *паскалях* (1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>). Паскаль – это очень малая величина, поэтому используют кратные величины: *килопаскаль* (кПа) и *мегапаскаль* (МПа).

Иногда используют бары:

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа},$$

что примерно соответствует атмосферному давлению.

Полезно запомнить, что атмосферное давление равно примерно 100 кПа, а давление за паровой турбиной составляет 3–8 кПа. Давление пара перед современными паровыми турбинами 12–30 МПа, перед газовыми турбинами 1,0–1,8 МПа. Рассмотренные единицы измерения давления в условиях эксплуатации оборудования электростанций не прижились, главным образом, по причине отсутствия на ТЭС приборов с градуировкой в паскалях. Эксплуатационный персонал ТЭС обычно пользуется *техническими атмосферами* (ат):

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па} = 98 \text{ кПа} = 0,098 \text{ МПа}.$$

Кроме технических атмосфер, применяемых в технике, используют физические атмосферы (*атм*):

$$1 \text{ атм} \approx 1,033 \text{ ат} \approx 1,013^5 \text{ Па}.$$

Физическая атмосфера равна среднему давлению атмосферного воздуха на уровне океана и на 45° географической широты. Это давление называется часто «нормальным».

В ряде случаев давление в сосудах измеряют с помощью ртутных приборов – высотой ртутного столба (*мм рт. ст.*). Например, упомянутое выше нормальное давление 1 атм = 760 мм рт. ст. и соответственно 1 мм рт. ст. = 133,3 Па.

Многочисленное оборудование тепловых электростанций работает при давлении  $p$  меньшем, чем атмосферное давление  $B$ . Их разность

$$H = B - p$$

называется *разрежением*, и оно измеряется непосредственно прибором. Отношение

$$V = (H/B) \cdot 100\%$$

называется *вакуумом*, и этот термин чаще всего используется на ТЭС, когда речь идет о разрежении. Если вакуум в конденсаторе составляет 95 %, а атмосферное давление 100 кПа, то значит, разрежение в конденсаторе составляет 95 кПа, а давление – 5 кПа.

Давления *абсолютное и избыточное*:

Допустим, что имеется сосуд, к которому присоединена U-образная трубка с какой-нибудь жидкостью (рис. 1).

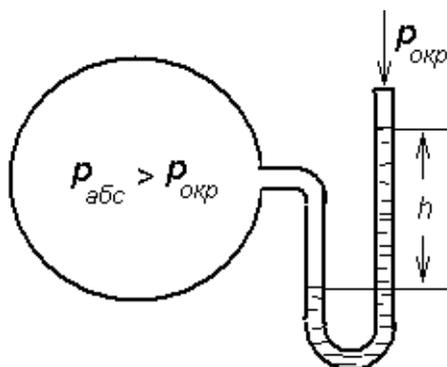


Рис. 1. Измерение избыточного давления U-образным манометром

При открытом сосуде давление внутри него будет, очевидно, равно давлению окружающей среды (атмосферы)  $p_{окр}$ , и в этом случае жидкость в обоих коленах U-образной трубки по закону сообщающихся сосудов будет находиться на одном уровне.

Если закрыть сосуд и увеличить в нем давление, то часть жидкости из левого колена трубки будет вытеснена в правое, вследствие чего образуется разность уровней.

Теперь давление в сосуде будет уравниваться давлением атмосферного воздуха и, кроме того, весом столба жидкости высотой  $h$ . В этом примере участвуют три вида давлений: атмосферное давление, равное  $p_{окр}$ ; давление, создаваемое столбом жидкости высотой  $h$  и называемое избыточным давлением  $p_{изб}$ , и, наконец, давление внутри сосуда, равное сумме обоих этих давлений и называемое абсолютным давлением  $p_{абс}$ .

Таким образом,

$$p_{абс} = p_{окр} + p_{изб}.$$

В термодинамических уравнениях давление всегда берется абсолютное. Атмосферное

давление измеряется, как известно, барометрами. Так как величина этого давления изменяется обычно незначительно, то при измерении давлений в кг/см<sup>2</sup> иногда его принимают равным единице. В этом случае

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{изб}} + 1 \text{ ат.}$$

Избыточное давление, когда оно невелико, удобно измерять как уже говорилось, высотой столба жидкости. При значительных давлениях эта высота получилась бы очень большой, поэтому в таких случаях давление измеряют специальными приборами – манометрами, шкалы которых градуируются в технических атмосферах.

Для того чтобы можно было знать, о каком именно давлении идет речь – об абсолютном или избыточном, после числа, показывающего величину этого давления в технических атмосферах, пишут: ата – для абсолютного давления и ати – для избыточного. Так, например, если давление, показываемое манометром, равно 15 ат, пишут: давление равно 15 ати.

Вернемся к нашему опыту с сосудом, но теперь уменьшим давление в сосуде ниже атмосферного. Так как абсолютное давление в сосуде стало при этом меньше атмосферного, то часть жидкости из правого колена U-образной трубки переместится в левое, как это показано на рис. 2. В результате наружное давление  $p_{\text{окр}}$  будет уравниваться давлением внутри сосуда  $p_{\text{абс}}$  и, кроме того, давлением, создаваемым весом столба жидкости высотой  $h$ .

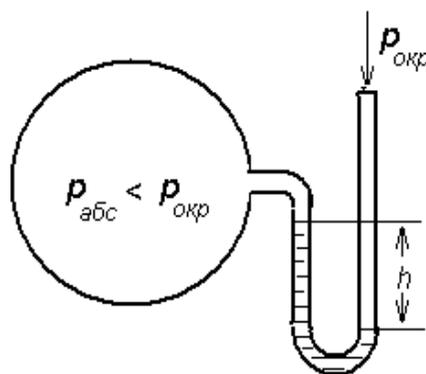


Рис. 2. Измерение разрежения U-образным вакуумметром

Таким образом, в данном случае, выражая все эти давления высотой столбов жидкости, получим

$$h_{\text{окр}} = h_{\text{абс}} + h_{\text{разр}} \quad \text{или} \quad h_{\text{абс}} = h_{\text{окр}} - h_{\text{разр}}.$$

Величина  $h_{\text{разр}}$  называется *разрежением*. Из приведенных уравнений видно, что величина разрежения  $h_{\text{разр}} = h_{\text{окр}} - h_{\text{абс}}$ . При неизменном  $p_{\text{окр}}$  она будет, очевидно, тем больше, чем меньше давление внутри сосуда  $p_{\text{абс}}$ .

Разрежение определяется по вакуумметрам и измеряется обычно высотой столба ртути или воды в миллиметрах.

Электрическая и тепловая энергия в системе СИ измеряется в *джоулях* (Дж), а мощность – в *ваттах* (Вт):  $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ .

*Электрическую мощность* турбоагрегатов и электростанций обычно представляют в *мегаваттах* ( $1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$ ) или миллионах киловатт ( $1 \text{ МВт} = 10^3 \text{ кВт}$ ). Реже, когда речь идет о мощности энергосистем, используют *гигаватты* ( $1 \text{ ГВт} = 10^3 \text{ МВт}$ ).

Электрическую энергию в практике теплотехники обычно измеряют в *киловатт-часах* (кВт·ч). Очевидно,

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 3600 \text{ кДж}.$$

Мощность на электростанциях никогда не измеряют в лошадиных силах. Количество *тепловой энергии* измеряется либо в джоулях, либо в *калориях* (кал):  $1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}$ . Чаще используются величины, кратные калории – *килокалория* (ккал), *мегакалория* (Мкал) и, особенно, *гигакалория* (Гкал):

$$1 \text{ Гкал} = 10^3 \text{ Мкал} = 10^6 \text{ ккал} = 10^9 \text{ кал}.$$

*Тепловая мощность* (теплопроизводительность) обычно измеряется в Гкал/ч, но иногда и в менее привычных единицах – мегаваттах. Полезно запомнить, что  $1 \text{ Гкал/ч} = 1,163 \text{ МВт}$ . Например, теплопроизводительность мощной ТЭЦ с 5 энергоблоками 250 МВт составляет  $1650 \text{ Гкал/ч} = 1940 \text{ МВт}$ .

*Плотность* или обратная ей величина – *удельный объем* измеряются соответственно в  $\text{кг/м}^3$  или  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

В заключение приведем несколько полезных таблиц, содержащих соотношения между различными единицами, часто используемыми в практике (табл. 1 – 3).

Таблица 1

## Соотношения между единицами давления

Единицы	Па	бар	ат	мм. рт. ст.	атм
1 Па	1	$10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$0,987 \cdot 10^{-5}$
1 бар	$10^5$	1	1,02	750	0,987
1 ат	$9,81 \cdot 10^4$	0,981	1	736	0,968
1 мм. рт. ст.	133,3	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
1 атм	1,013	$1,013 \cdot 10^5$	1,033	760	1

Таблица 2

## Соотношения между единицами энергии

Единицы	Дж	Кал	кВт·ч
1 Дж	1	0,239	$0,278 \cdot 10^{-6}$
1 Кал	4,1868	1	$1,163 \cdot 10^{-6}$
1 кВт·ч	$3,6 \cdot 10^6$	$0,86 \cdot 10^6$	1

Таблица 3

## Соотношения между единицами мощности

Единицы	кВт	ккал/ч
1 кВт	1	860
1 кКал/ч	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1