

## Потенциал системы и разность потенциалов между системой и средой.

### СОДЕРЖАНИЕ

1. Потенциал физической системы и потенциал физического поля – понятия разные
2. Как следует понимать “обобщенный потенциал системы“?
3. Как следует понимать “локальный потенциал физической системы“?
4. Что называется разностью потенциалов системы?
5. В чем состоит принципиальное различие между потенциалом системы и разностью потенциалов.
6. Разность потенциалов как основа уравнения переходного процесса.
7. Обобщенное уравнение энергообмена

#### 1. Потенциал физической системы и потенциал физического поля – понятия разные

Термин “**потенциал**” применяется в науке почти в тридцати случаях. Он происходит от латинского слова *potentia*, что означает “возможность” в переводе на русский язык. В современной физике (в электродинамике и гравитационной динамике) рассматривается и разъясняется потенциал физического поля  $\varphi$ , и это приводит к затруднениям при изучении термодинамики, в которой рассматривается **потенциал физической системы**, имеющий другое физическое содержание. В статье И.Когана (1998) обращается внимание на то, что физическая величина, сопряженная с координатой состояния системы и побуждающая энергоносители к перемещению, имеет в научной литературе различные названия, не совпадающие друг с другом по их физическому содержанию: обобщенная сила, обобщенный потенциал, обобщенный напор, разность потенциалов. А в справочниках по физике и метрологии понятие “потенциал системы” не рассматривается.

В термодинамике применяют понятие “**термодинамический потенциал**”, но оно имеет косвенное отношение к понятию “потенциал системы”. К термодинамическим потенциалам относят внутреннюю энергию, энтальпию, свободную энергию Гельмгольца, потенциал Гиббса, хотя сам Гиббс применял в этом случае термин “**фундаментальные уравнения**”. Перечисленные величины являются функциями термодинамического состояния системы.

Понятие **обобщенный потенциал системы** ввел А.Вейник (1968), обозначив его символом  $P$ . В.Эткин (2008) обозначил его символом  $\Psi$ , встречается для этой цели и символ  $U$ . Заметим, что символом  $U$  в электродинамике обозначается не потенциал, а разность потенциалов (напряжение). Совпадение символов для электрического напряжения и внутренней энергии физической системы создает ненужные методологические трудности. Мы остановимся на символе  $P$ .

#### 2. Как следует понимать “обобщенный потенциал системы“?

Изменение полной энергии системы  $dW$  влечет за собой изменение внутренней энергии системы  $dU$ . Если рассматривать систему с произвольным числом форм движения, равным  $i$ , то изменение внутренней энергии  $dU$  системы будет определяться уравнением

$$dU = \sum_i (\partial U / \partial q_i) dq_i = \sum_i P_i dq_i, \quad (1)$$

где  $dq_i$  – изменение координаты состояния  $i$ -ой формы движения. Физическую величину  $P_i = (\partial U / \partial q_i)$  называют **обобщенным потенциалом системы**. Потенциал системы относится к **интенсивным величинам**, значение которых не зависит от размера системы,

они не аддитивны. С точки зрения метрологии потенциал  $P_i$  является удельной производной величиной (изменением внутренней энергии, приходящимся на единицу изменения координаты состояния). Примерами потенциала системы являются термодинамическая температура, давление, плотность, концентрация.

Уравнение (1) не учитывает возможность неравновесного состояния системы, при котором присутствует перенос энергоносителей внутри системы вследствие различного рода флуктуаций внутри нее.

### 3. Как следует понимать "локальный потенциал системы"?

К неравновесным системам применимо понятие "локальный потенциал", под которым следует понимать потенциал подсистемы бесконечно малых размеров, находящейся внутри системы. Локальный потенциал этой подсистемы для  $i$ -ой формы движения можно представить в виде

$$P_{ij} = \lim_{l_j \rightarrow 0} (dU_{ij} / dq_{ij}), \quad (2)$$

где  $dU_{ij}$  – изменение внутренней энергии  $i$ -ой формы движения  $j$ -ой подсистемы, а  $dq_{ij}$  – изменение координаты состояния той же формы движения  $j$ -ой подсистемы. Бесконечно малый размер системы лишает возможности определить направление движения энергоносителей внутри подсистемы, и поэтому  $dU_{ij}$  и  $dq_{ij}$  в уравнении (3) являются скалярными величинами. В разных местах неравновесной системы значения локального потенциала, естественно, разные. При рассмотрении равновесной системы нет необходимости в применении понятия "локальный потенциал".

### 4. Что называется разностью потенциалов системы?

Окружающая систему среда также имеет потенциал для каждой формы движения. Если потенциалы системы и среды для  $i$ -ой формы движения не совпадают, то возникает **разность потенциалов** между системой и средой  $\Delta P_i$  для этой формы движения. Разность потенциалов  $\Delta P_i(t)$  является векторной величиной, поскольку она определяет направление движения энергоносителей при энергообмене: из среды в систему или в обратном направлении. Она определяется **уравнением переходного процесса** от одного равновесного состояния системы к другому.

В отличие от разности потенциалов между средой и равновесной системой, внутри неравновесной системы существует разность локальных потенциалов. Поэтому следует привести два разные определения:

**1. Разность потенциалов по отношению к равновесной системе** – это разность между потенциалом системы в целом и потенциалом окружающей среды (или потенциалом соседней системы).

**2. Разность потенциалов внутри неравновесной системы** – это разность между локальными потенциалами подсистем внутри этой системы.

### 5. В чем состоит принципиальное различие между потенциалом системы и разностью потенциалов.

Разность потенциалов, в отличие от потенциала системы, является аддитивной величиной, но ее нельзя назвать **экстенсивной величиной**, так как она не зависит от массы и характеризует не систему, а различие между системой и средой. В качестве примеров разности потенциалов приведем:

а) перепад давлений на противоположных концах трубы  $\Delta p$ , обуславливающий течение в ней жидкости;

б) перепад давлений  $\Delta p$  по обе стороны поверхности системы, содержащей газ, обуславливающий изменение объема системы;

- в) электрическое напряжение на зажимах проводника  $\Delta U$ , обуславливающее электрический ток в проводнике;
- г) температурный напор  $\Delta T$  с двух сторон теплопроводящей стенки или в двух точках неравновесной тепловой системы, обуславливающий теплопередачу;
- д) разность вращающих моментов  $\Delta M$  на обоих концах вала трансмиссии, обуславливающая передачу вращающего момента;
- е) разность силы воздействия на систему и силы противодействия системы  $\Delta F$ , которую обычно неверно записывают просто как  $F$ . Когда говорят о силе, воздействующей на систему, то под ней следует подразумевать именно разность сил воздействия и противодействия.

С точки зрения метрологии потенциал  $P$  и разность потенциалов  $\Delta P$  являются различными физическими величинами, имеющими одинаковую размерность, но различное физическое содержание. С точки зрения принципа причинности потенциал создает лишь возможность движения, а инициирует процесс движения разность потенциалов. Именно разность потенциалов является воздействием среды, вызывающим противодействие системы.

Примером применения локальной разности потенциалов является уравнение для определения разности сил воздействия и противодействия

$$\Delta F = \lim_{S \rightarrow 0} \Delta p S, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения потока энергоносителей. То есть определяется локальная разность потенциалов, воздействующих на граничную поверхность в точке. Сила является такой же абстракцией, как и точка, на которую она воздействует. Фактически на граничную поверхность воздействует разность потенциалов, коей в данном примере является перепад давлений  $\Delta p$ . Существующее в современной механике определение давления, как интегральной суммы сил, действующих на участок поверхности, противоречит принципу причинности. Наоборот, под силой, действующей на систему, следует понимать разность давлений в окружающей среде и в системе, деленную на площадь разграничивающей поверхности (то есть сила это удельная производная величина).

## **6 . Разность потенциалов как основа уравнения переходного процесса**

Разность потенциалов между равновесной системой и средой или разность потенциалов внутри неравновесной системы является причиной перехода  $i$ -ой формы движения системы из одного состояния в другое. Перевод слова "потенциал" на русский язык словом "возможность" делает понятнее суть этого перехода: различие возможностей равновесной системы и среды или различие возможностей подсистем внутри неравновесной системы обуславливают перемещение энергоносителей из места с большей возможностью к месту с меньшей возможностью, что и предопределяет выравнивание возможностей.

Изменение состояния системы в течение какого-то промежутка времени называется **переходным процессом.** Реальные переходные процессы происходят с конечной скоростью, их можно описать с помощью теории автоматического регулирования, в которой **уравнение переходного процесса** системы от одного равновесного состояния к другому после воздействия на систему разности потенциалов приобретает вид линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами. Это уравнение связывает ступенчатое изменение входного сигнала  $x(t)$  (воздействия на систему) с изменением выходного сигнала  $y(t)$  (следствия воздействия). В упрощенном виде уравнение переходного процесса выглядит так:

$$a_0 y(t) + a_1 (dy/dt) + a_2 (d^2y/dt^2) = x(t) . \quad (4)$$

Уравнение переходного процесса можно записать также в виде:

$$D \mathbf{q}_{fl} + R d\mathbf{q}_{fl}/dt + I d^2\mathbf{q}_{fl}/dt^2 = -\Delta\mathbf{P}, (5)$$

где  $\Delta\mathbf{P}(t)$  – входной сигнал  $x(t)$  в виде разности потенциалов между системой и окружающей ее средой;  $\mathbf{q}_{fl}(t)$  – выходной сигнал в виде [перемещающейся координаты состояния](#) системы (нижний индекс fl от слова flowing – текущий).

В уравнении (5)  $D$ ,  $R$  и  $I$  – это постоянные коэффициенты (параметры системы), соответствующие  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$ . Их названия:  $D$  – жесткость системы (обратная величина  $C = 1/D$  – ёмкость или упругость системы);  $R$  – диссипативное сопротивление системы (резистивность);  $I$  – инертность системы. Уравнение типа (5) применяется в современной механике в виде

$$D\mathbf{x} + R\mathbf{v} + I\mathbf{a} = -\mathbf{F}, (6)$$

где  $\mathbf{F}$  – сила воздействия на систему как разность механических потенциалов,  $\mathbf{x}$  – перемещение,  $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$  – скорость,  $\mathbf{a} = d^2\mathbf{x}/dt^2$  – ускорение,  $D$  – жесткость системы,  $R$  – сопротивление внешнего трения,  $I$  – линейная инертность.

Уравнение переходного процесса применяется и в современной электродинамике, только в скалярном виде

$$(1/C)q + RI + L dI/dt = \Delta U, (7)$$

где  $\Delta U$  – разность электрических потенциалов,  $q$  – электрический заряд,  $I = dq/dt$  – электрический ток,  $C$  – электрическая ёмкость,  $R$  – омическое сопротивление,  $L$  – индуктивность. Фактически же в уравнении переходного процесса (7)  $q$  – это перемещающийся (текущий) электрический заряд из уравнения (5)  $\mathbf{q}_{fl}$ , и, соответственно, электрический ток  $\mathbf{I}$  также является векторной величиной.

## 7. Обобщенное уравнение энергообмена

В Физическом энциклопедическом словаре сказано: "Если система не изолирована, то ее энергия может изменяться либо при одновременном изменении энергии окружающих тел на такую же величину, либо за счет изменения энергии взаимодействия тела с окружающими телам". Этот процесс носит название [энергообмен](#). Таким образом, изменение энергии системы  $dW$  определяется не только изменением внутренней энергии  $dU$ , но и изменением энергообмена с окружающей средой  $dW_{ch}$  в соответствии с уравнением

$$dW = dU + dW_{ch} = \sum_i P_i dq_i + \sum_i \Delta\mathbf{P}_i (d\mathbf{q}_{fl})_i. (8)$$

в котором  $(d\mathbf{q}_{fl})_i$  это элементарное количество перемещающихся из системы в среду (или в обратном направлении) энергоносителей  $i$ -ой формы движения.

## Литература

1. Вейник А.И., 1968, Термодинамика. 3-е изд. – Минск, Высшая школа, 464 с.
2. Коган И.Ш., 1998, О возможном принципе систематизации физических величин. – "Законодательная и прикладная метрология", 5, с.с. 30-43.
3. Коган И.Ш., 2006, Обобщение и систематизация физических величин и понятий. – Хайфа, 207 с.
4. Эткин В.А., 2008, Энергодинамика (синтез теорий переноса и преобразования энергии). – СПб.: Наука, 409 с.