

## Перенос энергии энергоносителями в физических системах

### СОДЕРЖАНИЕ.

1. Что понимается под энергоносителями в физических системах.
2. Термин "перенос энергии" не точен.
3. Схема переноса энергии через физическую систему.
4. Перенос энергоносителей в непроточных системах.
5. Перенос энергоносителей в проточных системах.
6. Работа сторонних сил и моментов по перемещению энергоносителей.
7. Коэффициент полезного действия (кпд) при переносе энергоносителей.

#### 1. Что понимается под энергоносителями в физических системах.

Энергию через контрольную поверхность физической системы могут переносить только реальные физические объекты (тела, молекулы, электроны, волны и т.д.). В физике эти объекты называют **материальными носителями энергии** или сокращенно **энергоносителями**. Свойства энергоносителей и выступают в качестве характеристик процесса движения.

В технической литературе под термином "энергоноситель" чаще всего имеются в виду различные виды топлива, запасенная энергия которых может быть использована для целей энергоснабжения. В данной статье этот термин применяется лишь в том значении, о котором сказано в предыдущем абзаце.

Энергоносители обычно переносят одновременно энергию различных форм движения, то есть они выступают как носители нескольких координат состояния. Поэтому их можно назвать "**ансамблями координат состояния**". А.Вейник (1968) называл их "ансамблями зарядов".

К сожалению, вследствие математических операций с физическими величинами, характеризующими энергоносители, характеристики движения часто не указывают на реальное физическое содержание энергоносителей.

#### 2. Термин "перенос энергии" не точен.

В физике часто применяют термин "перенос энергии". Но энергия это физическая величина, а физическая величина переноситься не может. Переносятся материальные объекты, содержащие энергию, которых называют **энергоносителями**. Энергоносители можно в отдельных случаях отождествить с координатами состояния форм движения.

Но при этом следует иметь в виду, что координаты состояния форм движения часто бывают представлены удельными физическими величинами, получающимися в результате математических операций, и это приводит к недопониманию сути явлений. Например, в механической форме движения энергию переносят через контрольную поверхность энергоносители, имеющие массу. То есть координатой состояния должна быть масса энергоносителей. Но если массу тела поделить на его плотность, то в роли координаты состояния станет выступать переносимый объем тела, и форма движения будет иметь уже другое название. Если же поделить объем тела на площадь поперечного сечения потока, то в роли координаты состояния выступит уже перемещение, и форма движения будет иметь уже третье название.

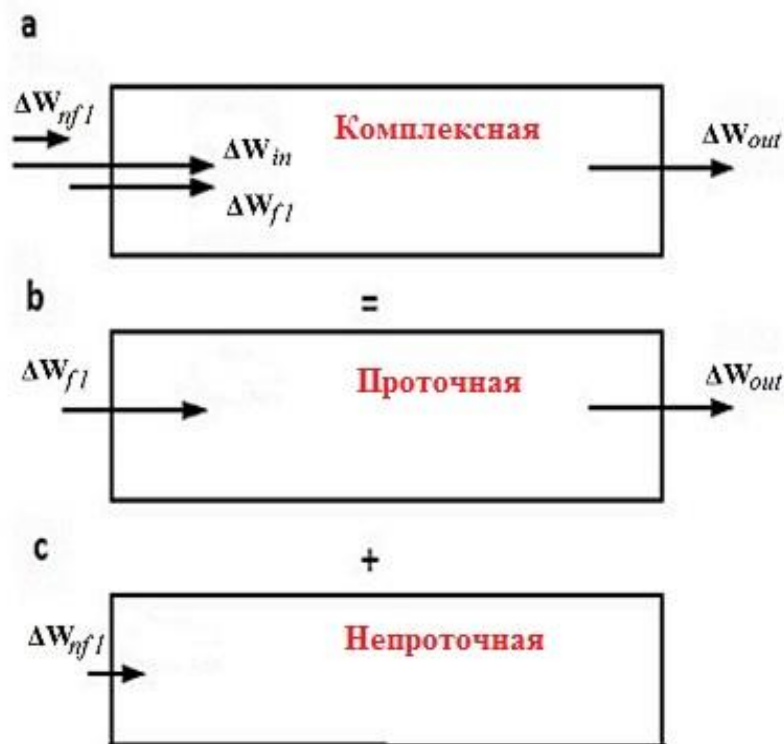
Очевидно, что ни объем, ни перемещение по своей природе не являются энергоносителями. Это просто кинематические величины (абстрактные величины). Так в результате математических операций теряется истинное физическое содержание процесса переноса энергии. Таким образом, не каждая характеристика движения является динамической величиной (реальной величиной).

В приведенных двух примерах координаты состояния получаются вследствие математических операций. Это удобно при математическом анализе явлений, но при преподавании физики требуется разъяснять, что скрывают математические операции, каково истинное (первоначальное) физическое содержание энергоносителей.

### 3. Схема переноса энергии через физическую систему.

Для упрощения пояснений приведем пример физической системы, в которой изучается только одна форма движения. Дисбаланс энергообмена  $\Delta W_{in}$  на входе в систему, то есть разность между энергиями энергоносителей по обе стороны контрольной поверхности, отделяющей систему от среды (см. рис. а), в общем случае не равен дисбалансу энергообмена  $\Delta W_{out}$  на выходе из системы. Пусть для примера  $\Delta W_{in} > \Delta W_{out}$ , хотя это принципиальной роли не играет.

Разделим мысленно рассматриваемую систему на две части. В первой части, названной **проточной** системой (см. рис. б), на входе и на выходе значения энергообмена  $\Delta W_{fl}$  равны. Нижний индекс "fl" происходит от английского слова flowing – проточный. Для проточной системы  $\Delta W_{fl} = \Delta W_{in} = \Delta W_{out}$ . Процесс перемещения энергоносителей через проточную систему называют технологическим процессом. В большинстве производств используются проточные системы.



На рис. с показана система, названная **непроточной**, у которой  $\Delta W_{in} = \Delta W_{nfl}$  и  $\Delta W_{out} = 0$ . Нижний индекс "nfl" происходит от английского слова non-flowing – непроточный. Энергоносители могут либо вводиться в непроточную систему ( $\Delta W_{in} = \Delta W_{nfl}$ ), либо выводиться из нее ( $\Delta W_{out} = -\Delta W_{nfl}$ ), других вариантов нет.

Систему, изображенную на рис. а, будем называть **комплексной системой**. Любую комплексную систему можно рассматривать, как состоящую из двух систем: из проточной и непроточной. В комплексной системе  $\Delta W_{in}$  можно представить в виде суммы двух слагаемых:  $\Delta W_{in} = \Delta W_{fl} + \Delta W_{nfl}$ .

Необходимость разделения комплексных систем на непроточные и проточные вытекает из того, что для физических величин, характеризующих эти два вида систем, различны и определяющие уравнения, и уравнения состояния, и размерности, и единицы. В принципе, физическая система с разными формами движения может быть одновременно

непроточной для одной формы движения, проточной – для другой формы движения и комплексной – для третьей формы движения. На практике же удобно анализировать системы с какой-либо одной превалирующей формой движения.

#### 4. Перенос энергоносителей в непроточных системах.

В непроточных системах энергообмен  $\Delta W_{нп} \neq 0$ . Поэтому и полное количество энергоносителей в непроточной системе изменяется до тех пор, пока  $\Delta W_{нп}$  не станет равным 0, и система окажется равновесной. Этот процесс изменения количества энергоносителей в системе называется **переходным процессом**.

Обобщенным обозначением координаты состояния любой формы движения примем символ  $q$  с дополнительными индексами при необходимости. Будем различать характеристику **единичного энергоносителя**  $q_e$  и характеристику суммарного **количества энергоносителей**  $q$  в конкретной форме движения системы. Под единичным энергоносителем понимается энергоноситель, неделимый на данном уровне структуры материи. (Например, в электрической форме движения единичными энергоносителями являются элементарные заряды: электроны и позитроны.) Суммарное количество энергоносителей  $q$  может изменяться лишь при проникаемой контрольной поверхности системы при переходном процессе.

Символом  $dq$  обозначим элементарное (бесконечно малое) изменение суммарного количества энергоносителей в системе. В закрытых системах количество энергоносителей не изменяется, то есть  $dq = 0$ , но может меняться интенсивность движения энергоносителей внутри неравновесной системы. В электродинамике и в гравидинамике количество энергоносителей измеряется в единицах заряда системы, то есть в кулонах или килограммах.

Обозначения, названия и размерности для наглядности сведены в таблицу (Q – символ размерности заряда, N – символ размерности количества объектов).

| Название   | Обозначение | Размерность |
|--|-------------|-------------|
| Характеристика единичного энергоносителя                               | $q_e$       | $QN^{-1}$   |
| Характеристика суммарного количества энергоносителей в системе         | $q$         | Q           |
| Элементарное изменение суммарного количества энергоносителей в системе | $dq$        | Q           |
| Скорость изменения суммарного количества энергоносителей               | $dq/dt$     | Q           |

В равновесных системах энергоносители движутся внутри системы хаотически. Направленное движение энергоносителей внутри системы возникает лишь в период возникновения дисбаланса энергообмена в течение переходного процесса, по завершению которого система вновь приходит в равновесное состояние, но уже при другом количестве энергоносителей в системе.

Скорость изменения суммарного количества энергоносителей  $dq/dt$  является скалярной величиной и никакого отношения к электрическому току при не имеет.

#### 5. Перенос энергоносителей в проточных системах.

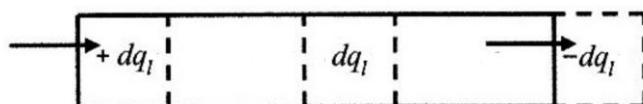
Процесс переноса энергоносителей в проточных системах отличается тем, что он происходит постоянно. В проточной системе количество энергоносителей, входящих в систему, всегда равно количеству энергоносителей, выходящих из системы. Следовательно, полное количество энергоносителей в проточной системе постоянно. Если при этом значение энергии потока не изменяется со временем, то процесс переноса

энергоносителей называется **равновесным**. Соответственно, если значение энергии потока со временем изменяется, то процесс переноса называется **неравновесным**.

При равновесном процессе локальное значение координаты состояния в любой точке проточной системы неизменно. Вдоль системы уменьшается лишь значение той части энергии потока, которая переходит в тепловую энергию вследствие диссипации. При рассмотрении проточных систем механизм этого перехода является основным интересующим фактором.

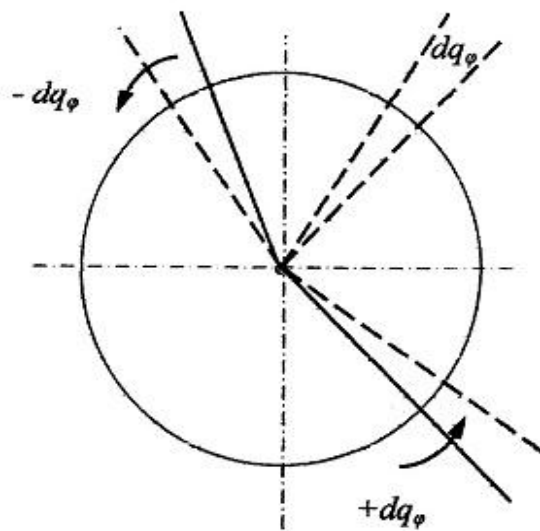
### 5.1. Понятие о перемещающемся энергоносителе.

Рассмотрим изображенную на рисунке схему проточной системы, на которой для упрощения показано прямолинейное перемещение энергоносителей вдоль оси  $O1$ .



На рисунке штриховыми линиями очерчен участок проточной системы элементарной длиной  $dl$ , содержащий элементарное **количество перемещающихся энергоносителей**  $dq$ . Обозначать этот участок будем  $dq_l$  (или  $dq_{fl}$ ). Величина  $dq_{fl}$  измеряется в тех же единицах, что и элементарное количество энергоносителей  $dq$  в непроточной системе, но  $dq$  и  $dq_{fl}$  – это две величины, имеющие различное физическое содержание, так как  $dq$  относится к неподвижному участку в непроточной системе, а  $dq_{fl}$  относится к движущемуся участку.

Рассмотрим векторную физическую величину  $\mathbf{q}_{fl} = (q_{fl} \mathbf{v})$ , которую назовем **движущимся энергоносителем** (по аналогии с термином "движущийся заряд" в электродинамике) или **перемещающимся энергоносителем**, если речь идет о прямолинейном движении. Величина  $\mathbf{q}_{fl}$  является характеристикой **процесса переноса** энергоносителей от входа проточной системы к ее выходу и характеризует элементарное количество энергоносителей, присутствующее на движущемся участке.



При прямолинейной форме движения цилиндрический участок перемещается с линейной скоростью  $\mathbf{v} = dl/dt$ , где  $l$  – линейное перемещение центра участка. А при вращательном движении сектор поворачивается с угловой скоростью  $\omega = d\phi/dt$ , где  $\phi$  – угловое перемещение центра сектора.

На рисунке слева штриховыми линиями очерчены участки системы с углом при вершине поворачиваемого сектора  $d\phi$ , обозначенные  $dq_\phi$ .

Векторную величину  $\mathbf{q}_\phi$  можно назвать **поворачиваемым энергоносителем**, который является псевдовекторной величиной.

### 5.2. Характеристики движущихся энергоносителей в проточных системах.

В проточных системах линейное **перемещение энергоносителей** является векторной величиной  $\mathbf{l} = (ln)$ , где  $\mathbf{n}$  – орт направления перемещения энергоносителей (орт направления, перпендикулярного поперечному сечению потока энергоносителей). Соответственно, скорость перемещения энергоносителей  $\mathbf{v} = d\mathbf{l}/dt$ .

**Линейную плотность** движущегося энергоносителя  $\mathbf{i}_{fl} = \mathbf{q}_{fl} / l$  назовем **током энергоносителей**.

В электродинамике  $\mathbf{i}_{fl}$  соответствует электрическому току  $\mathbf{i}$ , который является фактически векторной величиной и не равен скалярному выражению  $(dq/dt)$ . Это означает, что принятое в современной физике представление о том, что электрический ток является скалярной величиной и функцией от плотности тока, неверно.

**Объемную плотность движущихся энергоносителей** (плотность тока энергоносителей) обозначим символом  $\mathbf{j}_{fl} = \mathbf{i}_{fl} / S$ , где  $S$  – площадь поперечного сечения, через которое переносятся движущиеся энергоносители.

Все обозначения, названия и размерности сведены для наглядности в одну таблицу.

| Название   | Обозначение                             | Размерность     |
|--|---|-----------------|
| Длина участка, на котором перемещаются энергоносители                          | $l$                                     | L               |
| Перемещение энергоносителей  | $\mathbf{l}$                            | L               |
| Скорость перемещения энергоносителя  | $\mathbf{v} = d\mathbf{l}/dt$           | $LT^{-1}$       |
| Количество движущихся энергоносителей  | $q_{fl}$                                | Q               |
| Движущийся энергоноситель  | $\mathbf{q}_{fl} = (q_{fl} \mathbf{v})$ | $LQT^{-1}$      |
| Линейная плотность движущихся энергоносителей (ток энергоносителей)            | $\mathbf{i}_{fl} = q_{fl} / l$          | $QT^{-1}$       |
| Объемная плотность движущихся энергоносителей (плотность тока энергоносителей) | $\mathbf{j}_{fl} = \mathbf{i}_{fl} / S$ | $L^{-2}QT^{-1}$ |

### 5.3. Примеры переноса энергии в открытых проточных системах.

Приведем четыре примера:

**1.** Проточную систему можно представить в виде несжимаемой жидкости, движущейся в трубе с жесткими стенками. Общее количество жидкости в трубе постоянно несмотря на движение жидкости вдоль трубы. (Сколько жидкости вливается на входе в трубу, столько же и выливается на ее выходе.) Уменьшается лишь энергия упорядоченного движения молекул жидкости, о чем свидетельствует уменьшение статического давления вдоль трубы и увеличение температуры жидкости. То есть часть потенциальной энергии жидкости, вошедшей в трубу, переходит в энергию неупорядоченного теплового движения молекул жидкости. Последнее не всегда заметно вследствие перехода тепловой энергии из трубы в окружающую среду через стенки трубы.

**2.** Проточную систему можно представить в виде мысленно выделенного участка пространства, заполненного движущимися через участок частицами твердого тела. В этом случае в технике говорят о перемещении сыпучей среды. Особенно интересен частный случай такой проточной системы, в котором рассматривается одна единственная перемещающаяся частица (тело), координатой состояния которой является перемещение центра масс тела в направлении движения.

**3** Продолговатое тело, вращающееся вокруг неподвижной оси (вал), можно представить в виде проточной системы, передающей вращающий момент. В этом случае вдоль системы перемещается элементарный сектор вращающегося тела, вращающийся вместе с телом. Координатой состояния является угол поворота этого сектора.

**4.** В электрической форме движения проточную систему можно рассматривать как систему, через которую перемещаются электрические заряды (электрический проводник с постоянным значением электрического тока).

### 5.4. Примеры переноса энергии в закрытых проточных системах.

В закрытых проточных системах также имеет место поток энергоносителей, хотя он и не сопровождается переносом вещества. Чаще всего речь идет о переносе импульса колеблющихся молекул в направлении переноса энергии. Энергоносителями является волны. Диссипативные потери энергии при переносе энергии в таких системах заключаются в том, что значение колебательной скорости молекул снижается в направлении переноса энергии. Приведем два примера закрытых проточных систем.

1. При теплопередаче через твердую стенку эту стенку можно рассматривать как проточную систему, через которую перемещается тепловой заряд. От слоя к слою изменяется скорость тепловых колебаний атомов или молекул вещества.

2. При переносе энергии излучением участок среды, через который распространяется излучение, можно рассматривать как проточную систему, в которой энергоносителями являются волны.

### **6. Работа сторонних сил и моментов по перемещению энергоносителей.**

Разность потенциалов  $\Delta U$  между системой и средой в  $i$ -ой форме движения определяется уравнением

$$\Delta U = [dW/dq] e_{\Delta U} , \quad (1)$$

в котором изменение энергообмена  $dW$  является работой  $dA$  **сторонних сил**  $F_{for}$  по линейному перемещению энергоносителей или работой  $dA$  **сторонних моментов**  $M_{for}$  по их угловому перемещению. Определяющее уравнение для работы записывается в обобщенном виде как:

$$dA = F_{for} dq_l \quad (2) \quad \text{или} \quad dA = M_{for} dq_\varphi . \quad (3)$$

Сторонние воздействия на систему называют обычно **движущими силами**, добавляя к слову "движущие" в виде префикса название той формы движения, чьи энергоносители перемещаются в проточной системе. Это может быть, например, **электродвижущая сила**, если под  $q_l$  подразумевается перемещаемый электрический заряд, или **термодвижущая сила**, если под  $q_l$  подразумевается перемещаемый тепловой заряд. Сторонние моменты называют **вращающими моментами**.

Размерности движущих сил в разных формах движения различны, и они определяются размерностями координаты состояния. Лишь в механической прямолинейной форме движения размерность движущей силы совпадает с размерностью силы в механике. По этой причине термин "разность потенциалов" звучит правильнее, чем термины "движущая сила" и "вращающий момент".

### **7. Коэффициент полезного действия (кпд) при переносе энергоносителей.**

Коэффициент полезного действия  $\eta$  процесса переноса энергоносителей через проточную систему (**кпд**) или через проточную часть комплексной системы определяют в физике и, особенно, в технике по-разному. Иногда таким образом, что **кпд** становится больше 1. Последним особенно грешат различные "новаторы" и "первооткрыватели". Подобное происходит в случае неполного учета переходов энергии из одной формы движения в другую.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  процесса переноса энергоносителей через проточную систему (**кпд**) или через проточную часть комплексной системы определяют в физике и, особенно, в технике по-разному. Иногда таким образом, что **кпд** становится больше 1. Последним особенно грешат различные "новаторы" и "первооткрыватели". Подобное происходит в случае неполного учета переходов энергии из одной формы движения в другую.

В метрологическом справочнике А.Чертова (1990) **кпд** определяется, как “*величина, равная отношению энергии, полезно использованной системой, к энергии, полученной системой*“. Для иллюстрации этого определения приведем схему перехода друг в друга разных видов энергии внутри проточной системы.



Как только значение потенциальной энергии системы-источника  $(W_p)_{in}$  становится больше значения потенциальной энергии системы-стока  $(W_p)_{out}$ , возникает процесс переноса энергоносителей через проточную систему, находящуюся между ними, а одновременно с этим процесс переноса энергии в неупорядоченную тепловую форму движения. Это и является процессом полезного использования энергии, переносимой через проточную систему.

Разность потенциальных энергий  $(W_p)_{in} - (W_p)_{out}$  обычно поддерживается искусственно. Та часть потенциальной энергии системы-источника  $(W_p)_{in}$ , которая переносится энергоносителями в проточную систему, преобразуется в кинетическую энергию упорядоченной формы движения  $W_k$  внутри проточной системы. На схеме это преобразование имеет вид скачкообразного процесса, показанного жирной ломаной линией, но в реальности оно происходит плавно, захватывая частично область перехода от системы-источника к проточной системе с обеих сторон. Обратное преобразование кинетической энергии проточной системы в потенциальную энергию системы-стока происходит аналогично, только с другим знаком.

При равномерном процессе переноса значение кинетической энергии  $W_k$  в каждом сечении внутри проточной системы постоянно постольку, поскольку существует разность между значениями потенциальной энергии системы-источника и системы-стока. Если бы в процессе переноса энергоносителей через систему не стало бы диссипации энергии, то значение потока энергоносителей могло бы вырасти до бесконечности. В электродинамике такое явление называется коротким замыканием.

Часть кинетической энергии  $W_k$  упорядоченных форм движения переходит по длине системы в энергию других видов энергии, совершая при этом полезную работу, а часть переходит в энергию неупорядоченного теплового движения, то есть в энергию диссипации  $W_R$ . Совершение полезной работы также сопровождается переходом в энергию диссипации, но уже в технологическом объекте. Разность между потенциальными энергиями на входе и на выходе из системы составляет в итоге энергию тепловой формы движения диссипации

$$W_R = (W_p)_{in} - (W_p)_{out} \quad (4)$$

В соответствии с вышеприведенным определением **кпд** из справочника А.Чертова (1990) его следует определять по уравнению

$$\eta = W_R / [(W_p)_{in} - (W_p)_{out}] \quad (5)$$

В принципе, следует учитывать все процессы перехода энергии, в том числе, и по причине перехода части внутренней энергии системы в любой вид энергии любой формы движения физической системы. Например, энергии потока, возникающего вследствие уменьшения энергии связи, сконцентрированной в системе, химической энергии, энергии, выделяемой в результате спонтанного радиоактивного распада.

**Кпд** процесса присущ и непроточным системам тоже. Различие между непроточными и проточными системами состоит в том, что в непроточных системах говорить о **кпд** можно лишь при переходном процессе внутри системы, а в проточных системах процесс диссипации присутствует постоянно.

### **Литература**

1. Вейник А.И., 1968, Термодинамика. 3-е изд. – Минск, Высшая школа, 464 с.
1. Чертов А.Г., 1990, Физические величины. – М.: Высшая школа, 336 с.