

УДК 53(077)

## РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ТРАКТОВКА ПОНЯТИЯ ЭНЕРГИИ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Т. П. ЖЕЛОНКИНА

Е. Б. ШЕРШНЕВ, кандидат технических наук, доцент

С. А. ЛУКАШЕВИЧ

*Учреждение образования «Гомельский государственный университет  
имени Ф. Скорины», Республика Беларусь*

Рассмотрены вопросы изложения одного из фундаментальных понятий в физике – энергии, которая входит в закон сохранения природы. Учтено введение понятия энергии на основе классических представлений, ее связь с массой тела. Используя закон релятивистской физики, дано введение энергии на основе релятивистских законов.

**Ключевые слова:** масса тела, масса покоя, энергия покоя, кинетическая энергия, релятивистский импульс, закон сохранения энергии.

### Введение

Понятие энергии является одним из наиболее фундаментальных понятий в физике. Как показывает опыт, тела часто оказываются в состоянии совершать работу над другими телами. Физическая величина, характеризующая способность тела или системы тел совершать работу, называется энергией. Энергия тела может быть обусловлена причинами двоякого рода: во-первых, движением тела с некоторой скоростью и, во-вторых, нахождением тела в потенциальном поле сил. Энергия первого рода называется кинетической энергией. Энергия второго рода называется потенциальной энергией.

Закон сохранения энергии является одним из основных законов природы. Энергия при физических и химических процессах переходит от одного тела (или системы тел) к другому телу (или системе тел); она ни при каких процессах не создается вновь. Движение материи может менять свою форму, но величина энергии при всех изменениях формы движения материи остается постоянной.

Естественно, что трактовке данного понятия в курсе общей физике должно быть уделено особое внимание. Исходя из этого, мы считаем, что наиболее глубокие и четкие представления об энергии можно создать на базе релятивистских представлений [1].

### Основная часть

На основе анализа результатов эксперимента (движение частиц в ускорителях и т. д.) вводится понятие о релятивистской массе

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

и релятивистском импульсе

$$\vec{P} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (2)$$

Полная энергия тела вводится по определению

$$E = mc^2. \quad (3)$$

Энергия покоя (иначе внутренняя энергия) представляет собой энергию тела в соответствующей системе отсчета, относительно которой тело покоится:

$$E_0 = m_0c^2. \quad (4)$$

Тогда кинетическая энергия

$$K = E - E_0 = mc^2 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) = \frac{mv^2}{1 + \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5)$$

В нерелятивистском приближении ( $v \ll c$ ) кинетическая энергия

$$K = \frac{mv^2}{2}. \quad (6)$$

Отметим, что под «телом» мы понимаем не элементарную частицу, а совокупность частиц, каждая из которых, в свою очередь, может иметь произвольную сложную структуру. Внутренняя энергия системы невзаимодействующих частиц (идеальный газ) равна сумме их полных энергий:

$$E_0^{\text{сист}} = \sum E_i = \sum E_{0i} + \sum K_i = \sum E_{0i} + K_{\text{внутр}}, \quad (7)$$

где под  $K_{\text{внутр}}$  понимается суммарная кинетическая энергия хаотического движения частиц, из которых состоит тело.

По аналогии можно записать выражение для внутренней энергии системы взаимодействующих частиц:

$$E_0^{\text{сист}} = \sum E_{0i} + K_{\text{внутр}} + U_{\text{внутр}}, \quad (8)$$

где под  $U_{\text{внутр}}$  понимается суммарная энергия взаимодействия частиц между собой. Разбиение энергии системы на три слагаемые не является однозначной операцией и зависит от характера задачи. Так, при низких температурах, когда не возбуждаются колебательные степени свободы молекул газа, энергия движения и взаимодействия атомов молекул входит в  $\sum E_{0i}$ , а при повышении температуры эти степени свободы мы уже включили в  $K_{\text{внутр}}$  и  $U_{\text{внутр}}$ . То же относится и к внутриатомным и внутриядерным степеням свободы. Поэтому невозможно выделить из всей энергии слагаемое, которое можно было бы назвать «тепловой» энергией.

Из (4) и (8) следует, что масса покоя системы частиц

$$m_0^{\text{сист}} = \sum m_{0i} + \Delta m, \quad (9)$$

где  $\Delta m$  – дефект массы;

$$\Delta m = \frac{K_{\text{внутр}} + U_{\text{внутр}}}{c^2}. \quad (10)$$

В зависимости от знака энергии взаимодействия дефект массы может быть положительным или отрицательным.

Путем элементарного преобразования выражения (1) получаем соотношение между энергией и импульсом тела:

$$E^2 = E_0^2 + \vec{p}^2 c^2. \quad (11)$$

Дифференцируя это выражение, получим после сокращений:

$$dE = dE_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \vec{v} d\vec{p}. \quad (12)$$

В случае, когда внутренняя энергия тела не меняется, имеем:

$$dE = dK = \vec{v} d\vec{p} = \frac{d\vec{p}}{dt} \vec{v} dt = \vec{F} d\vec{l}. \quad (13)$$

По определению величина  $\delta A = \vec{F} d\vec{l}$  представляет собой элементарную работу. Итак, при  $E_0 = \text{const}$  работы сила равна изменению кинетической энергии:

$$\delta A = dK. \quad (14)$$

В приближении ньютоновской механики существуют консервативные силы, работа которых не зависит от формы траектории, т. е.

$$\oint \vec{F} d\vec{l} = 0.$$

Элементарная работа консервативных сил есть полный дифференциал некоторой функции состояния, которая называется потенциальной энергией взаимодействия между частями системы:

$$\delta A_{\text{конс}} = -dU. \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) следует:

$$W = K + U = \text{const}, \quad (16)$$

т. е. полная механическая энергия замкнутой консервативной системы сохраняется.

Следует обратить внимание на тот факт, что закон сохранения энергии в виде (16) справедлив лишь в приближении ньютоновской механики. В теории относительности в общем случае невозможно из энергии системы однозначным образом выделить слагаемое, которое можно было бы назвать потенциальной энергией.

Изменение полной энергии тела (системы частиц) проходит как за счет изменения энергии покоя, так и за счет изменения импульса, который меняется не только при изменении скорости тела, но и при изменении его массы покоя, а следовательно, и его внутренней энергии.

Внутренняя энергия тела меняется при его деформации, при этом совершается работа, которая также совершается и при изменении импульса тела за счет изменения его скорости. С другой стороны, внутреннюю энергию тела можно измерить путем те-

плообмена; переданная при этом процессе энергия называется количеством теплоты  $\delta Q$ . Как было изложено выше, при этом изменяется и импульс тела.

Итак, мы не можем однозначно решить вопрос о том, какое из слагаемых в правой части равенства (12) характеризует теплообмен, а какое работу, ведь и то и другое в равной мере относится к обоим слагаемым. Следовательно, вполне однозначный смысл имеет лишь изменение полной энергии. Что касается понятий работы и количества теплоты, то разделение  $dE$  на слагаемые  $\delta A$  и  $\delta Q$  может быть выполнено разными способами. Таким образом, мы вновь убеждаемся в бессодержательности термина «тепловая энергия».

Если сохранить, согласно выражению (13), за величиной  $\vec{v}d\vec{p}$  смысл элементарной работы и в том случае, когда импульс меняется не только за счет изменения скорости, но и за счет изменения массы покоя, и по определению назвать величину

$$\delta Q = dE_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \delta Q_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (17)$$

элементарным количеством теплоты, то выражение (12) примет вид:

$$\delta Q + \delta A = dE. \quad (18)$$

Это и есть наиболее общая форма первого начала термодинамики. Из него следует общая формулировка закона сохранения энергии: в замкнутой ( $\delta A = 0$ ) и адиабатически изолированной ( $\delta Q = 0$ ) системе полная энергия сохраняется ( $E = \text{const}$ ).

Закон преобразования выражения для количества теплоты (17) был предложен Планком. В таком виде им пользовались Эйнштейн [2] и де Бройль [3]. В последнее время Отт и Меллер [4] выдвинули идею, что нужно пользоваться другим законом:

$$Q = \frac{Q_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Учитывая рассмотренную выше неоднозначность самого определения понятия количества теплоты, можно было бы и не возражать против предлагаемой трактовки. Но никак нельзя согласиться с мнением Меллера, что выражение (17) «ошибочно».

Рассмотрим тепловую машину, работающую по циклу Карно. Полезная работа в соответствующей системе отсчета

$$A^0 = Q_1^0 \left( 1 - \frac{T_2^0}{T_1^0} \right), \quad (19)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  температуры нагревателя и холодильника. В системе отсчета, движущейся вдоль оси абсцисс со скоростью  $v$ , имеем соответственно:

$$A = Q_1 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (20)$$

Из выражений (16) и (17) видно, что работа и количество теплоты преобразуются одинаково.

Положим, что поршень перемещается вдоль оси ординат. Учитывая, что поперечная сила  $F_y = F_y^0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ , а поперечная координата  $y = y_0$ , имеем:

$$A = \int_{y_1}^{y_2} F_y dy = \int_{y_1^0}^{y_2^0} F_y^0 dy^0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = A^0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \quad (21)$$

что совпадает с законом преобразования (17).

### **Заключение**

Понятие энергии является фундаментальным понятием как в классической, так и в релятивистской физике. Самые общие и важные законы физики – это законы сохранения, которые представляют собой форму выражения принципов инвариантности. Закон сохранения энергии выражает инвариантность к смещению системы отсчета во времени, а закон сохранения импульса – инвариантность к смещению в пространстве. Законы сохранения не зависят от вида траектории и от характера действующих сил.

### **Литература**

- 1 Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1990. – 470 с.
- 2 Эйнштейн, А. Собрание научных трудов : в 4 т. / А. Эйнштейн. – М. : Наука, 1965. – Т. 1. – С. 103–104.
- 3 Де Бройль, Л. Эйнштейновский сборник / Л. Де Бройль. – М. : Наука, 1970. – С. 7–10.
- 4 Меллер, Х. Эйнштейновский сборник / Х. Меллер. – М. : Наука, 1970. – С. 11–39.

*Поступила в редакцию 22.02.2012*

### **T. Zhelonkina, E. Shershnev, S. Lukashevich RELATIVISTIC TREATMENT THE CONCEPT OF ENERGY IN THE COURSE OF GENERAL PHYSICS**

In the paper are viewed questions in what follows one of the fundamental concept in physics – energy, which enter to the conservation law of a nature. Is considering entering concept of energy on the basis of the classical concepts, its connection with body weight. Using the law of relativistic physics is given entering of energy on the basis of relativistic laws.