Лукьянов Андрей Александрович
Кандидат физико-математических наук, доцент, лаборатория по работе с одарёнными детьми МФТИ.

Сюрпризы энергии рядом с нами

Рассмотрено несколько не всегда очевидных примеров из различных разделов физики (молекулярная физика, электричество, ядерная физика; иногда эти примеры просто встречаются в быту), главный «персонаж» которых – энергия.

Энергия – величина удивительная. Её можно встретить абсолютно во всех разделах физики, чего не скажешь о других её «собратьях» – физических величинах. Об энергии рассуждают физики и не физики, причём не физики имеют с ней дело в быту ничуть не реже, чем физики. Не станем подробно говорить о случаях, которые не имеют прямого отношения к физическому понятию «энергия» (пример – словосочетание «энергичное высказывание»). Но каждому доводилось покупать электронагревательные приборы. Хочет физик или «лирик» либо не хочет, но он вынужден узнавать о мощности прибора, то есть об энергии, получаемой (или расходуемой) в единицу времени. Автовладельцам приходится рассуждать о мощности двигателя автомобиля. Каждому физику и «лирику» приходится, в конце концов (в конце месяца), снимать показания домашнего счётчика электроэнергии.

Закончим с примерами. И так ясно, что понятие «энергия», по-видимому, самое распространённое, самое известное из физических понятий. Но понятное ли? Автор утверждает, что энергия полна сюрпризов. Самым большим сюрпризом для самого автора было то, что в масштабах Вселенной (в космологических теориях) не выполняется закон сохранения энергии.

Всё же не о таких больших сюрпризах сегодняшний разговор. Сегодня будут сюрпризы поменьше. Все они когда-то удивили либо автора статьи, либо тех, кому он преподавал физику.

1. Энергия воздуха

1.1. Так ли мало энергии в 1 кубометре воздуха?

Кажется, какая энергия может содержаться в «пустом» кубометре воздуха?! Однако проведём оценку.

Воздух на 99% состоит из двухатомных молекул (на 78% – из молекул азота N_2 и на 21% – кислорода O_2). **С учётом поступательного и вращательного движения каждой молекулы** средняя энергия одной молекулы при температуре T равна:

$$\varepsilon_{\text{ср1молекулы}} = \left(\frac{3}{2} + \frac{2}{2}\right)kT = \frac{5}{2}kT \quad (1.1)$$

(средние энергии молекул разных сортов в условиях термодинамического равновесия равны друг другу). Пусть N – полное число молекул в объеме V, n – концентрация молекул, $N = nV$. Внутренняя энергия газа равна:

$$E_{\text{внутр}} = \frac{5}{2}kT \cdot N = \frac{5}{2}nkT \cdot V. \quad (1.2)$$

Тогда в силу уравнения состояния идеального газа:

$$p = nkT \quad (1.3)$$

имеем

$$E_{\text{внутр}} = \frac{5}{2}pV. \quad (1.2')$$

Учащиеся лучше знают формулы $\varepsilon_{\text{ср1молекулы}} = \frac{3}{2}kT$ и $E_{\text{внутр}} = \frac{3}{2}pV$, в которых, однако, учтена лишь энергия поступательного движения молекул, но не учтена энергия вращения.

(Заметьте, формула $E_{\text{внутр}} = \frac{3}{2}pV$ даёт только 60% энергии воздуха! Это, само по себе, – сюрприз!)

Полагая в (1.2′) $p = p_{\text{норм}} \approx 10^5$ Па и $V = 1$ м^3, получаем:

$$E_{\text{внутр}} \approx 2{,}5 \cdot 10^5 \text{Дж}. \quad (*)$$

Много это или мало? Этой энергии хватит, чтобы нагреть пол-литра (0,5 кг) очень холодной воды с температурой $t_1 = 0\,^\circ\text{C}$ до температуры кипятка $t_1 = 100\,^\circ\text{C}$. В самом деле, подставляя в формулу:

$$Q = c_{\text{уд}}m \cdot \Delta t \quad (1.4)$$

$c_{\text{уд}} = 4200$ Дж/(кг · град), $m = 0{,}5$ кг и $\Delta t = 100\,^\circ\text{C}$, получаем $Q = 2{,}1 \cdot 10^5$ Дж, что меньше, чем (*).

Если вас не впечатлил нагрев двух стаканов воды до состояния кипятка – другой пример. Энергии $2{,}5 \cdot 10^5$ Дж хватило бы, чтобы поднять **легковой автомобиль** массой $M_{\text{авто}} = 1\text{ т} = 1000$ кг **на высоту 5-этажного дома:**

$$M_{\text{авто}}gh = 2{,}5 \cdot 10^5 \text{ Дж} \Rightarrow h = 25 \text{ м}.$$

Выходит, **прямо у нас под руками** – **огромные запасы энергии**. **Казалось бы**, черпай и черпай, – энергии целой атмосферы Земли хватит на всех и надолго! Однако всё не так просто, как кажется. Энергия, конечно, рядом, но её не очень легко зачерпнуть. (Как тот локоток из пословицы, который трудно укусить.)

1.2. Для тех, кто знаком с формулой теории относительности для энергии $E = mc^2$, запасы энергии покажутся ещё более неисчерпаемыми

Полагая здесь $m = 1$ кг (масса одного кубометра воздуха при нормальных условиях даже немного больше – 1,3 кг) и $c = 3 \cdot 10^8$ м/с (скорость света в вакууме), получаем совершенно чудовищное значение энергии $9 \cdot 10^{16}$ Дж $\approx 10^{17}$ Дж. Этой энергии хватило бы, чтобы растопить айсберг размерами примерно $670 \times 670 \times 670$ м^3. Размеры его больше высоты Останкинской телебашни (540 м), а масса равна примерно 1/3 миллиарда тонн. В самом деле, при удельной теплоте плавления льда $\lambda = 3{,}3 \cdot 10^5$ Дж/кг и плотности льда $\rho = 900$ кг/м^3 имеем:

$$M_{\text{льда}}\lambda = 9 \cdot 10^{16}\,\text{Дж} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_{\text{льда}} = 2{,}7 \cdot 10^{11}\,\text{кг} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{\text{льда}} = 3 \cdot 10^8\,\text{м}^3 \approx (670\text{м})^3.$$

Энергия «пустого» воздуха просто дразнит. Приведём ещё кое-какие оценки.

1.3. Сколько энергии попадает на 1 квадратный метр стены комнаты из воздуха?

Известно, что давление воздуха на стенки сосудов, в которых находится газ, осуществляется силами со стороны молекул, которые непрерывно сталкиваются со стенками. В каждом кубометре воздуха содержится огромное количество молекул воздуха. В нормальных условиях (при температуре $t_1 = 0\,°\text{C}$ ($T = 273$ К) и давлении $p \approx 10^5$ Па) это число примерно равно $2{,}7 \cdot 10^{25}$ м^3. Оно на много порядков больше, чем число звёзд в нашей Галактике («всего» порядка 10^{11}); это примерно как в ста триллионах галактик, таких как наша!

Число столкновений молекул со стенами, например, комнаты – невообразимо огромно – порядка $3 \cdot 10^{27}$ ударов о каждый квадратный метр стены в каждую секунду. Но ударяющиеся молекулы обладают кинетической энергией, т. е. заведомо должен быть поток энергии от воздуха к стене. Энергия отдельной молекулы невелика по нашим меркам. Но тут вступает в силу закон **«Сила мелочей в том, что их много!».** В результате оказывается, что **на каждый 1 м^2 стены в каждую секунду** падает примерно $3 \cdot 10^7$ Дж.

Для сравнения скажем, что это значение более чем **в 20 000 превосходит солнечную постоянную.** Напомним: солнечной постоянной называют количество энергии, поступающее от Солнца на 1 м^2 земной поверхности перпендикулярно ей за 1 с в форме электромагнитного излучения (без учёта отражения от атмосферы и поглощения в ней). Она приблизительно равна $I_C \approx 1{,}4$ кВт/м^2.

Многим рассказанное кажется недоразумением или просто нелепой ошибкой счёта. Другие видят в этом Глобальную ошибку всей физической Теории. (Особенно охотно ищут ошибки у Эйнштейна!) Третьи, соглашаясь с приведёнными выше оценками, наивно полагают, что раз рядом столько энергии, то она совершенно доступна, и что Человечество было просто очень лениво, раз до сих пор не забрало ВСЮ имеющуюся прямо под рукой энергию себе.

На самом деле всё не так просто! Например, энергию $\mathbf{2,5 \cdot 10^5}$**Дж** одного кубометра воздуха (см. (формулу (*) п. 1.1)) не так-то легко заставить «работать» (например, заставить двигать какие-то механизмы). Поток энергии от воздуха **на стену** комнаты $3 \cdot 10^7$ Дж/(м$^2 \cdot$ с) из п. 1. 3, конечно, впечатляет. Но, оказывается, примерно такой же величины поток идёт **от стены в сторону воздуха (молекулы отражаются** от стенки!). В условиях термодинамического равновесия два потока в точности равны друг другу; в результате стена сколько энергии приобретает от воздуха, столько же отдаёт ему обратно.

Несколько сложнее с энергией, поступающей к нам от Солнца (см. солнечную постоянную (примерно 1,4 кВт/м^2) из п. 1. 3). Оказывается, Земля примерно такую же энергию переизлучает в космос. Давно установилось примерное равенство потоков энергии в сторону Земли и от неё.

К обсуждению энергии $E = mc^2$ (см. п.1.2) мы вернёмся чуть позже.

Природа полна и сюрпризов. Вот – ещё один.

1.4. Знаменитая задача о том, как протопили печь (или включили электрокамин) в комнате

Температура комнаты была $+7°$C. После того как протопили печь, температура возросла до $+17°$C. Объём комнаты $5\text{м} \cdot 3\text{м} \cdot 3\text{м} = 45\text{ м}^3$, давление в ней 100 кПа. На сколько изменилась внутренняя энергия воздуха в комнате?

Решение. Давление осталось неизменным (оно во все моменты времени равно внешнему атмосферному давлению)! Объём комнаты, конечно, тоже не изменился. Неизбежный вывод:

если $p = const$ и $V = const$,

то $E_{\text{внутр}} = \dfrac{5}{2} p \cdot V = const$,

т. е. **энергия воздуха в комнате осталась неизменной**! Разумеется, в это мало кто верит, узнав об этом впервые.

1.5. Куда же девалась энергия от сгорания дров в печи, если энергия воздуха в комнате не изменилась?

Оказывается, по мере прогревания комнаты **часть воздуха выходит наружу, унося с собой энергию.**

Оценка ухода массы воздуха. До того как протопили печь, эта масса определялась уравнением:

$$pV = \frac{m_1}{\mu} RT_1; \qquad (1)$$

после – уравнением:

$$pV = \frac{m_1 - |\Delta m|}{\mu} R\left(T_1 + \Delta T\right). \qquad (2)$$

Положим: $p \approx 10^5$ Па, $V = 45\text{ м}^3$, $T_1 = 280$ К ($t_1 = 7°$C), $T_2 = 290$ К ($t_2 = 17°$C), $\Delta T = 10$ К.

Начальная масса воздуха в комнате $m_1 = \dfrac{\mu \cdot pV}{RT_1}$, где $\mu \approx 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль есть средняя молярная масса воздуха; в итоге: $m_1 \approx 56$ кг.

Изменение массы найдём из (1)–(2):

$$m_1 T_1 = \left(m_1 - |\Delta m|\right)\left(T_1 + \Delta T\right),$$

откуда получаем:

$$|\Delta m| = \frac{m_1 \Delta T}{T_1 + \Delta T} \approx 1{,}9 \text{ кг}.$$

(из комнаты уйдет наружу, грубо говоря, 1,5 м^3 воздуха).

Оценить, сколько энергии ушло из комнаты на улицу, не так просто. Дело в том, что вначале из комнаты уходил сравнительно холодный воздух. Однако по мере того, как воздух в комнате прогревался, комнату покидал всё более и более тёплый воздух.

(*) Оценка энергии, ушедшей из комнаты наружу (для тех, кто умеет интегрировать).

$$E = \frac{5}{2}N(T)kT = \frac{5}{2}N_1kT_1 = \frac{5}{2}N_2kT_2 = \frac{5}{2}pV \Rightarrow N(T) = \frac{N_1T_1}{T} \Rightarrow dN = -\frac{N_1T_1}{T^2}dT \Rightarrow$$

$$dE_{\text{ex}} = \frac{5}{2}kT|dN| = \frac{5}{2}N_1kT_1\frac{dT}{T} = \frac{5}{2}pV\frac{dT}{T} \Rightarrow \Delta E_{\text{ex}} = \frac{5}{2}pV\int_{T_1}^{T_2}\frac{dT}{T} = \frac{5}{2}pV \cdot \ln\frac{T_2}{T_1} =$$

$$= \frac{5}{2} \cdot 10^5 \cdot 45 \cdot \ln\frac{290}{280} = 1{,}1 \cdot 10^7 \cdot 0{,}035 \approx 3{,}9 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

2. Сюрпризы электрической энергии

Задача 2.1. (Представляет ли опасность заряженный воздушный шарик?) Если воздушный шарик радиусом $R = 10$ см потереть о шерсть, о мех или о волосы, то он приобретёт заряд порядка $q = 0{,}1$ мкКл. Каким будет при этом потенциал шарика?

Решение. Потенциал шара будет равен $\varphi = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{q}{R} = 9000$ В, т. е. почти 10 киловольт (!). Возникают естественные вопросы: не слишком много вольт мы здесь получили? Нет ли ошибки в нашей оценке? А если нет ошибки, не стоит ли тогда опасаться воздушных шаров и доверять играть с ними детям? Опыт говорит, что опасаться не стоит. А что об этом говорит теория? Несмотря на столь внушительный потенциал, шар будет обладать весьма незначительной энергией: W = (1/2) $q\varphi$ $\approx 0{,}0005$ Дж.

С чем можно сравнить эту энергию? Если вы поднимете книгу массой в 1 кг на высоту 1 м, то книга приобретёт потенциальную энергию mgh = 9,8 Дж $\approx$ 10 Дж. Если теперь эта книга упадёт вам на ногу, вы, безусловно, почувствуете удар, – хотя и вряд ли после этого обратитесь за медицинской помощью. А если с высоты 1 метр вам на ногу упадёт льдинка объёмом 1 см^3 (это примерно 1 грамм)? Разумеется, и в этом случае вы почувствуете слабый удар, но уж, конечно, не придадите этому никакого значения. Между тем, потенциальная энергия одного грамма вещества, поднятого на высоту 1 м, составляет 0,0098 Дж $\approx$ 0,01 Дж, т. е. примерно в 20 раз больше энергии рассмотренного выше заряженного воздушного шарика. Так следует ли опасаться

10 тысяч вольт на воздушном шарике? Ответ, думаю, ясен. И после этого вы уже спокойно узнаете, что если, например, перед тем как выйти из машины, вы поёрзаете по сиденью, то потенциал вашего тела может оказаться на 15 000 вольт выше потенциала земли. Того же эффекта вы достигнете, если дома пошаркаете ногой по ковру.

«Здесь всё понятно, – скажете вы. – Но не ясно тогда, почему следует опасаться 220 вольт в розетке?» Ответ состоит в том, что, например, рассмотренный выше заряженный воздушный шарик, разрядившись на вас, «израсходует» и все свои 9 тысяч вольт. А вот «израсходовать» 220 вольт в розетке весьма непросто: их непрерывно поддерживает (если сказать несколько грубо) электростанция (в конечном счёте, безусловно, она).

Задача 2.2. Через нить накаливания в лампочке карманного фонаря проходит ток $J = 0{,}3$ ампера. Какой заряд пройдёт по нити за время $\Delta t = 1$ мин?

Решение.

$$q = J\Delta t = 0{,}3\,\text{А}\cdot 60\,\text{с} = 18\ \text{Кл}.$$

Оказывается, что примерно такой заряд приходит на Землю, когда в неё ударяет **молния средней величины**! Почему же молния может производить сильное разрушающее действие (например, расщепить дерево), а в карманном фонарике тот же заряд не представляет никакой опасности?

Задача 2.3. Продолжительность молнии примерно $\Delta t = 0{,}001$ с. Разность потенциалов между её концами $U = 10^9$ В, а средняя сила тока $J = 2\cdot 10^4$ А (заряд молнии $Q = J\cdot\Delta t = 20$ Кл.). Какая энергия W выделяется при ударе молнии?

Решение. $W = 1/2\cdot UJt$, откуда $W = 10^{10}$ Дж. Заряд 20 Кл прошёл огромную ускоряющую разность потенциалов 10^9 В. В карманном фонарике порядки величин совсем другие: ЭДС батарейки, например, 4,5 В. Энергии 18 Кл · 4,5 В ≈ 80 Дж хватит лишь на то, чтобы нагреть стакан воды (250 г) на 0,1 градуса!

Кстати, если уж речь о лампочках и о нагреве, скажем ещё, что **КПД электрической лампочки** очень мал – порядка 5%. Это означает, что лишь 5% энергии, выделяющейся в нити накала лампочки при прохождении по ней электрического тока, переходит **в энергию световых волн видимого диапазона**. Остальные 95% энергии мы в буквальном смысле не видим! Электрическая лампочка скорее греет окружающие тела, чем освещает их.

А сколько энергии излучает человек?

Ответ. Человек излучает примерно как 100-ваттная лампочка. Соберите в комнате 10 человек, и они вам заменят электрокамин мощностью 1 кВт.

Задача 2.4. В электрокамине перегорела спираль, развалившись на две примерно равные половинки. Не имея под рукой запасной исправной спирали, перегоревшую спираль решают заменить временно на одну из её половинок. Сильнее и слабее будет греть после этого электрокамин?

Решение. Сопротивление целой спирали R пропорционально её длине $(R = \rho L/S)$, поэтому сопротивление половинки спирали в 2 раза меньше сопротивления целой спирали: $R' = R/2$. Если в электрокамине была лишь одна спираль, то до перегорания мощность электрокамина равнялась $P = U^2/R$, после замены целой спирали на её половинку мощность его возрастёт в 2 раза: $P' = U^2/R' =$

$= U^2/(R/2) = 2 \cdot U^2/R = 2P$. (Учёт зависимости сопротивления от температуры, а также учёт лучистого теплоотвода от спирали несколько изменит результат: мощность возрастёт в $\sqrt[5]{8} \approx 1{,}5$ раза.)

Весьма часто дают следующее **неправильное решение задачи**. Запишем закон Джоуля – Ленца в форме $P = J^2 \cdot R$, тогда, казалось бы, после замены целой спирали её половинкой для мощности будем иметь вдвое меньшее значение $P' = J^2 \cdot R/2 = P/2$ (*). Ошибка состоит в том, что молчаливо предполагалось, что ток через половинку спирали будет таким же, как через целую спираль. В действительности это не так. В обоих случаях к электрокамину будет подведено *одно и то же напряжение* (220 вольт), а не ток. Ток через половинку спирали ещё нужно рассчитать; имеем: $J' = U/(R/2) = 2(U/R) = 2 \cdot J$, – т. е. он будет в 2 раза больше, чем через целую спираль. Так что вместо (*) мы должны написать: $P' = J'^2 \cdot R/2 = (2J)^2 \cdot R/2 = 2J^2 \cdot R = 2P$, т. е. получаем то же, что и раньше.

В задаче, разумеется, удобнее пользоваться законом Джоуля – Ленца в форме $P = U^2/R$ (1), а не $P = J^2 R$ (2). Дело в том, что бытовая проводка устроена так, что ко всем приборам в доме приложено одно и то же напряжение, например, 220 В (все электроприборы включены параллельно друг другу), а вот силу тока через конкретный электроприбор надо ещё рассчитывать. (То, что ко всем приборам в доме приложено **примерно** одинаковое напряжение, есть следствие очень малого сопротивления соединительных проводов.)

3. Атомная энергия

3.1. Расход ядерного топлива на АЭС и в атомной бомбе. Уменьшение массы ядерного топлива

Ранее (в п. 1.2) говорилось о том, что согласно формуле $E = mc^2$ теории относительности 1 м^3 воздуха (примерно 1,3 кг при нормальных условиях) обладает совершенно чудовищной величиной **энергии покоя** – порядка 10^{17} Дж. Означает ли это, что учёные и инженеры на атомных электростанциях умеют (уже научились) извлекать эту (или такого рода) энергию?

Не совсем так. В атомных станциях происходят **ядерные превращения** (например, ядра урана ^{235}U под действием медленных нейтронов **делятся** на пару осколков с примерно равными массами.) Существенно, что сумма масс частиц до реакции $\sum m$ больше суммы масс частиц после реакции $\sum m'$, так что $\Delta m = \sum m' - \sum m < 0$. Соответственно оказывается, что сумма энергий покоя частиц до реакции $\sum \varepsilon = \sum m \cdot c^2$ будет больше суммы энергий покоя частиц после реакции $\sum \varepsilon' = \sum m' \cdot c^2$, то есть $\sum \varepsilon - \sum \varepsilon' > 0$. Оставшаяся энергия передаётся турбинам, вращая их, – и в конце концов превращается в энергию электрического тока. Разумеется, разность энергий $\sum \varepsilon - \sum \varepsilon' > 0$ от одной ядерной реакции (с одним ядром урана-235) не способна заставить вращаться турбину. Но таких ядерных превращений в реакторе станции происходит очень-очень много.

В атомной бомбе происходит примерно то же самое. Например, при делении одного ядра ^{235}U получается энергия $W = \sum \varepsilon - \sum \varepsilon' \approx 190\,\text{МэВ} = 190 \cdot 10^6\,\text{эВ} = 190 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{Дж} = 3 \cdot 10^{-11}\,\text{Дж}$. При взрыве американской бомбы в **Хиросиме** в 1945 г. выделилась **энергия порядка 10^{14} Дж.** Это означает: за время взрыва произошло 10^{14} Дж$/(3 \cdot 10^{-11}$ Дж$) \approx 3 \cdot 10^{24}$ актов деления ядер урана-235. Столько ядер ^{235}U разделилось. Какова была их суммарная масса? Масса одного ядра урана-235 равна: $235 \cdot 10^{-3}/(6{,}02 \cdot 10^{23}) \approx 4 \cdot 10^{-25}$ кг. Тогда масса всех разделившихся ядер ^{235}U равна $M = 3 \cdot 10^{24} \cdot 4 \cdot 10^{-25}$ кг ≈ 1 кг.

Заметим, что энергия покоя, соответствующая этой массе, $E = mc^2 \approx 10^{17}$Дж, что в 1000 раз больше энергии взрыва бомбы (10^{14} Дж). Далеко не вся энергия покоя ядерного горючего была превращена в энергию взрыва – лишь одна тысячная часть её. Уменьшение массы бомбы за счёт выделения этой энергии составляет примерно 1 грамм.

Совершенно аналогично делаются оценки для атомных электростанций.

Решите самостоятельно такую задачу.

Задача. Суточное потребление мощности в среднем доме составляет $P = 300$ Вт. Какая масса m урана $^{235}_{92}U$ должна разделиться, чтобы удовлетворить годовую потребность дома в энергии? В одном акте деления высвобождается энергия $W = 190$ МэВ. Постоянная Авогадро $N_A = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$, 1 эВ $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Ответ. $\dfrac{\mu}{N_A} \cdot \dfrac{P\tau}{W} \approx 0{,}1$ г.

3.2. Энергия Солнца

Вернёмся к солнечной постоянной $I_C \approx 1{,}4$ кВт/м^2. Напомним: столько энергии поступает от Солнца в форме электромагнитного излучения за 1 с на 1 м^2 земной поверхности перпендикулярно ей (без учёта потерь энергии в атмосфере). Заметим, что 1,4 кВт/м^2 – это совсем не мало. Мощность электроконфорок бытовой электроплиты 1 – 1,5 кВт. Если поток солнечной энергии $I_C \approx 1{,}4$ кВт/м^2 сфокусировать на площадь одной конфорки, то можно варить суп! (Это полезно знать тем, кто любит погреться на пляже под солнышком!)

Зная солнечную постоянную и расстояние от Земли до Солнца ($R_{СЗ} \approx 150$ млн км), можно оценить, **сколько энергии излучает Солнце за 1 секунду**:

$$\dot{E}_{\text{излС}} = I_C \cdot 4\pi R_{СЗ}^2 \approx 4{,}0 \cdot 10^{26}\,\text{Дж/с}. \quad (1)$$

Тогда по формуле теории относительности $E = mc^2$ легко найти, **какую массу теряет Солнце за 1 секунду**:

$$\dot{M}_C = \dot{E}_{\text{излС}} / c^2 \approx 4{,}4 \cdot 10^9\,\text{кг/с}.$$

Это – примерно масса пирамиды Хеопса. По сравнению с массой всего

Солнца, $M_С \approx 2{,}0 \cdot 10^{30}$ кг, – это, конечно, совершенно ничтожная величина. Даже за 10 млрд лет (возраст Земли примерно 4,5 млрд лет) убыль массы Солнца за счёт излучения составит приблизительно $1{,}4 \cdot 10^{27}$ кг (менее 0,1% его массы). На самом деле масса Солнца даже несколько растёт за счёт столкновений с кометами.

Иногда интересуются **удельными (в пересчёте на 1 кг массы) потерями энергии**. Для Солнца они составят порядка $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ Вт/кг. Удивительно, но для человека удельные потери значительно больше. Принимая мощность энергопотерь человека равной 100 Вт, а массу человека 80 кг, получаем удельные энергопотери человека более 1 Вт/кг.

Правда, если сравнить **потоки энергии с 1 м^2 поверхности** Солнца и человека, они окажутся не в пользу человека. Радиус Солнца $R_С$ примерно в 109 раз больше радиуса Земли, $R_З$ = 6400 км, т. е. примерно равен $R_С \approx 7 \cdot 10^8$ м, поэтому $\dot{E}_С / \left(4\pi R_С^2\right) \approx$ $\approx 6{,}4 \cdot 10^7$ Вт/м^2. Для человека же (с площадью поверхности порядка 2 м^2) $\dot{E}_{чел} / S_{чел} \approx 100$ Вт$/\left(2\,м^2\right) = 50$ Вт/м^2. Так что не стоит удивляться, что Солнце светит ярче, чем человек.

Многие знают, что **источником энергии в звёздах** и в нашем Солнце являются так называемые **термоядерные превращения**. Не вдаваясь в детали, их можно представить как слияние четырёх протонов (ядер водорода H) в ядро атома гелия ^{4}He (альфа-частицу). На самом деле это превращение многоступенчатое (через ряд промежуточных реакций). На выходе вместе с каждой альфа-частицей рождаются два позитрона e^+ (частицы, отличающиеся от электрона только знаком заряда) и ещё два так называемых нейтрино ν (которые быстро уносят с собой часть энергии):

$$4p \to \textit{промежуточные реакции} \to$$
$$\to \alpha + 2e^+ + 2\nu. \qquad (2)$$

Похожие превращения происходят и в **водородной бомбе**. Некоторые даже считают, что на Солнце и на других звёздах непрерывно происходит что-то вроде серии взрывов водородных бомб. На самом деле это не так.

Займёмся **подсчётом энергии в реакции (2)**. Вначале имеем $4m_p c^2$ (кинетической энергией частиц пренебрегаем), в конце – $m_\alpha c^2$ (массой и энергией покоя позитронов и нейтрино пренебрегаем). Масса протона $m_p \approx 1{,}67262 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx$ $\approx 1{,}007276$ а. е. м. (1 а. е. м. (атомная единица массы) равна 1/12 массы атома углерода-12); масса α-частицы $m_\alpha \approx 4{,}002603$ а. е. м. Разность масс $4m_p - m_\alpha \approx 0{,}02650$ а. е. м. Разность энергий $4m_p c^2 - m_\alpha c^2$ выделяется в виде электромагнитного излучения и частично (10%) уносится нейтрино. Одной атомной единице массы отвечает энергия 931,5 МэВ. Поэтому $4m_p c^2 - m_\alpha c^2 \approx 24{,}68 \cdot 10^6$ эВ. Вспоминая, что 1 эВ (электрон-вольт) = $= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Дж, получаем:

$$\varepsilon = 4m_p c^2 - m_\alpha c^2 \approx 3{,}95 \cdot 10^{-12}\,Дж. \qquad (3)$$

Оценим, какая доля ядер водорода на Солнце каждую секунду участвует в термоядерных реакциях [1], т. е. найдём скорость $\dot{N}_p$ расходования ядер водорода (свободных протонов). Для получения одного ядра гелия-4 расходуется 4 протона, поэтому скорость наработки ядер гелия $\dot{N}_\alpha$ в 4 раза меньше, чем $\left|\dot{N}_p\right|$. При образовании одного ядра гелия выделяется энергия (3). Полное энерговыделение на Солнце за 1 секунду, очевидно, равно $\dot{E}_{\text{С}} = \varepsilon \cdot \dot{N}_\alpha$, откуда

$$\dot{N}_\alpha = \frac{\dot{E}_{\text{С}}}{\varepsilon}. \qquad (4)$$

Величина $\dot{E}_{\text{С}}$ включает в себя и энергию, уносимую нейтрино. Последняя составляет примерно 10% от $\dot{E}_{\text{С}}$, остальные 90% переходят в электромагнитное излучение. Для оценок по порядку величины можно считать, что

$$\dot{E}_{\text{С}} \approx \dot{E}_{\text{излС}} \approx 4{,}0 \cdot 10^{26}\ \text{Дж/с (см. (1))}.$$

Поэтому согласно (4) имеем:

$$\dot{N}_\alpha \approx \frac{\dot{E}_{\text{излС}}}{\varepsilon} \approx \frac{4 \cdot 10^{26}\ \text{Дж/с}}{4 \cdot 10^{-12}\ \text{Дж}} = 10^{38}\ 1/\text{с} \ (5)$$

$$\text{и}\ \left|\dot{N}_p\right| \approx 4 \cdot 10^{38}\ 1/\text{с}. \qquad (6)$$

А теперь оценим общее число ядер водорода и гелия и сравним их с числом ядер (5) – (6), ежесекундно участвующих в термоядерных реакциях.

Солнце почти на 90% (по числу частиц) состоит из водорода и почти на 10 % – из гелия (на остальные химические элементы приходится менее 1%). Полное число массивных частиц (не электронов) на Солнце равно поэтому $N \approx N_p + N_\alpha$, причём согласно сказанному $N_p/N \approx 0{,}9$ и $N_\alpha/N \approx 0{,}1$, так что $N_p \approx 9N_\alpha$. Массу Солнца можно представить в виде суммы $M_C \approx N_p m_p + N_\alpha m_\alpha \approx \approx 9N_\alpha m_p + N_\alpha \cdot 4m_p = 13N_\alpha m_p$, откуда находим $N_\alpha = \dfrac{M_{\text{С}}}{13m_p} \approx 0{,}9 \cdot 10^{56} \approx \approx 10^{56}$, поэтому $N_p \approx 10^{57}$.

Сравнивая с (6), видим, что ежесекундно в термоядерных реакциях на Солнце участвует ничтожная доля имеющихся ядер водорода. Расход протонов на Солнце даже за очень большой промежуток времени $\Delta t = 10$ млрд лет составит $\left|\dot{N}_p\right| \Delta t \approx 10^{56}$ частиц, т. е. 10% от имеющихся в настоящее время. Термоядерные реакции на Солнце идут очень спокойно, размеренно, а вовсе не носят взрывной характер.

Как видите, с энергией всё и просто, и не очень просто.

Литература

1. *Бялко А.В.* Наша планета – Земля. – 2-е изд. – М.: Наука, 1989. – 240 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 29).

Мудрые мысли Мудрые мысли Мудрые мысли

Книги следует читать так же неторопливо и бережно, как они писались.

Г. Торо

Наука не является и никогда не будет являться законченной книгой. Каждый важный успех приносит новые вопросы. Всякое развитие обнаруживает со временем всё новые и более глубокие трудности.

А. Эйнштейн