117296 Москва, Ленинский проспект, 64-А, «Квант»
тел. : [095] 930-56-48
e-mail: bquantum@sovam.com (с пометкой “Квант”).

№ 1 - 2001 г. / Школа в “Кванте”

9 класс

Е. Ромишевский

Удивительная бутылка

10 класс

А. Стасенко

Как в землю казан закопали

11 класс

О. Егоров

Изотопные источники энергии

VIVOS VOCO

Образовательный сетевой выпуск

VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!

http://vivovoco.nns.ru
http://vivovoco.rsl.ru
http://www.ibmh.msk.su/vivovoco

Физика 9—11

Публикуемая ниже заметка «Удивительная бутылка» предназначена девятиклассникам, заметка «Как в землю казан закопали» – десятиклассникам и «Изотопные источники энергии» – одиннадцатиклассникам.

Удивительная бутылка

Е.РОМИШЕВСКИЙ

Много загадочных физических явлений связано с обыкновенной стеклянной бутылкой и содержащейся в ней жидкостью. Например, можно спросить себя или друзей: как быстрее наполнить или опорожнить бутылку; как интереснее ее утопить или извлечь из нее плотную пробку? Сейчас мы рассмотрим несколько необычную проблему: как разбить такую бутылку с жидкостью голыми руками (не используя каких-либо других физических тел), при этом, естественно, не поранив руки?

Вообразим такой эксперимент. Возьмем для конкретности обычную поллитровую бутылку, имеющую форму двух цилиндров – основной части и горлышка. Масса пустой бутылки приблизительно равна $m_б = 0{,}5$ кг. Нальем в нее воды столько, чтобы почти полностью заполнить основную цилиндрическую часть. При этом масса воды будет такой же, как и бутылки: $m_в = 0{,}5$ кг. Одной рукой возьмем бутылку за горлышко и поместим ее над пустым открытым ведром. Затем, размахнувшись, резко ударим по горлышку мягкой подушкой ладони... Дно бутылки и ее нижняя часть вместе с водой окажутся в ведре, а верхняя часть бутылки с охватываемым горлышком – в сухой руке. Весьма эффектное зрелище!

Теперь попробуем все это осмыслить и сделать количественные оценки.

Главным результатом опыта является разбитое стекло, имеющее довольно большую толщину (порядка нескольких миллиметров). Чтобы разбить такое стекло, нужно создать довольно большие силы. Откуда они берутся?

Представим себе письменный стол, покрытый толстым прозрачным стеклом. Пусть на стекле лежит стальной упругий шарик массой 100 г. На шарик действуют две силы: сила притяжения $m\vec{g}$, приложенная в центре шарика, и сила реакции поверхности стола $\vec{F}_р$, равная силе притяжения по величине, но противоположно направленная и приложенная в месте касания поверхностей шарика и стола. Непосредственно к поверхности стекла в том же месте касания приложена сила давления $\vec{F}_д$ со стороны шарика, равная (согласно третьему закону Ньютона) по величине силе реакции, но противоположная ей по направлению. Таким образом, в месте касания на стекло действует сила давления

$$F_д = F_р = mg = 0{,}1\ кг \cdot 10\ м/с^2 = 1\ Н.$$

Этой силы явно недостаточно, чтобы разрушить стекло на столе. Однако, если шарик поднять над поверхностью стола сантиметров на двадцать и отпустить, то он, ударившись, несомненно разобьет стекло.

Рассмотрим процесс подробнее. Направим ось Y вверх над поверхностью стекла и изобразим графически зависимости ускорения, скорости и высоты шарика от времени (рис.1). Особенно выделим отрезок времени удара τ, в течение которого шарик взаимодействует со стеклом. Как известно, при свободном падении ускорение шарика $a_y = -g$, скорость $v_y = -gt$ и высота $y = h_0 - gt^2/2$. Для рассматриваемого случая $h_0 = 20$ см, время падения $t_1 = \sqrt{2h_0/g} = 0{,}2$ с, максимальная скорость $v_{max} = gt_1 = \sqrt{2gh_0} = 2$ м/с.

Оценим время τ соударения шарика с поверхностью стекла. Разрушение стекла наступает при некоторой величине деформации его поверхности в

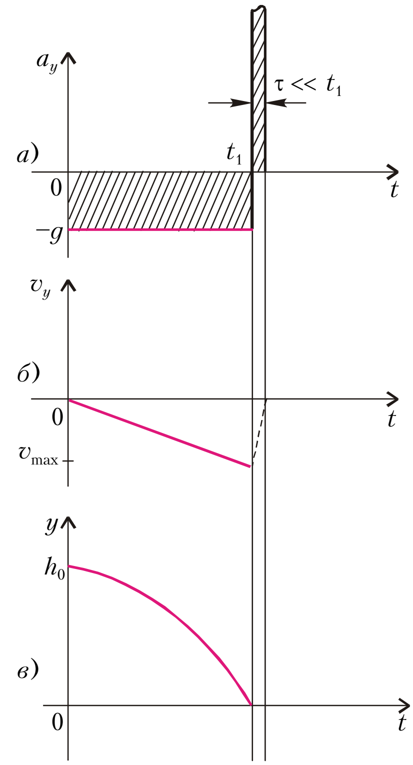


Рис. 1

месте контакта. На основании опытных данных можно принять в качестве такой величины $\delta = 0{,}1$ мм $= 10^{-4}$ м. Значение скорости за время удара изменяется от v_{max} до нуля, откуда время удара $\tau = \delta/(v_{max}/2) = 10^{-4}$ с (здесь считается, что скорость линейно падает со временем). Мы получили, что τ приблизительно в тысячу раз меньше времени падения t_1. Легко понять, что два заштрихованных прямоугольника на рисунке 1,*а* имеют одну и ту же площадь, равную

$$v_{max} = gt_1 = \sqrt{2gh_0}.$$

Изменение скорости в течение времени τ (мы имеем в виду абсолютно неупругий удар, потому что стекло разрушится еще при его сжатии) тоже равно v_{max}, а значит, связанное с этим среднее ускорение (замедление) $\bar{a} = v_{max}/\tau = 10^3 g$ окажется приблизительно в тысячу раз больше g – вот это «перегрузка»! Таким образом, на графике ускорения высота положительного пика, отвечающего величине $\bar{a}$, будет в тысячу раз выше g.

Теперь оценим силу удара шарика по стеклу. Она тоже будет в тысячу раз больше силы тяжести:

$$F_{уд} = m\bar{a} = \frac{mgt_1}{\tau} \approx 10^3\ Н.$$

Это уже вполне ощутимая величина.

Силы, действующие во время удара, называют «мгновенными» силами. В процессе удара, длящегося очень малое время τ, они резко увеличиваются от нуля до некоторого максимума, а затем снова падают до нуля. Под силами удара можно понимать среднее значение мгновенных сил за малое время удара, так чтобы выражение $F_{уд}\tau = m\Delta v$ представляло собой изменение импульса тела за это время (величину $F_{уд}\tau$ называют импульсом силы).

Уже давно было известно: чтобы получить «выигрыш» в силе, можно использовать рычаг. Нужно выбрать его точку опоры так, чтобы малая сила $F_м$ имела большое плечо $l_б$, а «выигрышная» большая сила $F_б$ – малое плечо $l_м$. При этом $F_б = F_м l_б / l_м$. В этом смысле удар является своеобразным рычагом – временны́м рычагом. Малая сила в течение большого времени t_1 разгоняет шарик, а огромная сила удара $F_{уд}$ за малое время τ останавливает его, причем $F_{уд} = mgt_1/\tau \approx mg \cdot 10^3$. Можно образно сказать, что в нашем случае получен «выигрыш» в силе в тысячу раз.

Отметим еще одно важное свойство удара. При соударении очень жестких тел, для которых деформации можно считать бесконечно малыми: $\delta \to 0$, скорости изменяются на конечные величины: $\Delta v \sim v$. Оценка времени удара $\tau \approx \delta/v$ тоже даст бесконечно малую величину: $\tau \to 0$. Из второго закона Ньютона, записанного в виде $m\Delta v = F_{уд}\tau$, видно, что произведение $F_{уд}\tau$ является величиной конечной. Значит, $F_{уд} \to \infty$, т.е. величина ударной силы велика, и по сравнению с ней можно пренебрегать всеми другими конечными силами, действующими во время удара (например, силой тяжести).

Итак, теперь самое время вернуться к эксперименту с бутылкой.

Для того чтобы стекло бутылки лопнуло у ее дна, необходимо по этому дну хорошо ударить. Но чем? Рукой? Нет, потому что рукой произвести удар такой силы невозможно. К тому же, мы ударили рукой по горлышку – казалось бы, должно разбиться горлышко. Остается предположить, что этот удар по дну произвела вода, содержащаяся в бутылке. Но для этого нужно сначала воду «приподнять» от стеклянного дна на некоторую высоту и затем предоставить ей возможность «упасть» на него. Ведь вода несжимаема, и ее соударение с бутылкой напоминает удар тяжелого упругого шарика о стекло. Получается, что нужно ударить по горлышку с такой силой, чтобы ускорение бутылки было больше ускорения массы воды – только тогда между водой и дном бутылки сможет образоваться пустой объем, в котором давление будет близко к нулю. Затем после удара по горлышку, который длится малое время, происходит мощное «схлопывание» воды и бутылки под действием атмосферного давления. Соударение между водой и бутылкой, происходит за очень малое время и, как мы уже отмечали, приводит к очень большим разрушающим силам и давлениям.

Проведем необходимые количественные оценки. Прежде всего поставим главный вопрос: какова минимальная величина силы удара по горлышку, достаточная для того, чтобы оторвать воду от дна бутылки? Для этого рассмотрим основные действующие силы.

На воду сверху действует сила атмосферного давления $F_а^в = p_а S$, где S – сечение основной цилиндрической части бутылки. Будем считать, что $p_а = 10^5$ Па, а $S = \pi r^2 = 30$ см^2 (это соответствует значению радиуса $r \approx 3{,}1$ см); тогда $F_а^в = 300$ Н. Под действием этой силы вся масса воды $m = 0{,}5$ кг приобретет ускорение

$$a_в = \frac{F_а^в}{m} = 600 \text{ м/с}^2 = 60g.$$

На бутылку действуют следующие силы: сверху на горлышко действует сила нашего удара F, а снизу на дно бутылки действует сила атмосферного давления $F_а^б = p_а S = 300$ Н. Для того чтобы бутылка приобрела ускорение больше, чем вода (масса бутылки приблизительно равна массе воды), нужно, чтобы выполнялось неравенство

$$F - F_а^б > F_а^в,$$

т.е. сила нашего удара должна быть больше удвоенной силы атмосферного давления:

$$F > F_а^б + F_а^в = 2F_а = 600 \text{ Н}.$$

Рассмотрим теперь подробнее первую фазу процесса – удар по горлышку. Допустим, что мы немного превысили величину минимальной необходимой силы и ударили с силой $F_1 = 650$ Н. Тогда бутылка будет иметь ускорение

$$a_{б_1} = \frac{F_1 - F_а}{m} = 700 \text{ м/с}^2 = 70g,$$

а вода получит ускорение

$$a_{в_1} = \frac{F_а}{m} = 60g.$$

Будем считать, что время удара порядка сотой доли секунды, т.е. $\tau_1 = 10^{-2}$ с, и оценим толщину вакуумного слоя Δh, т.е. расстояние, на которое разойдутся бутылка и вода:

$$\Delta h = \frac{\Delta a \tau_1^2}{2} = \frac{10g\tau_1^2}{2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5 \text{ мм}.$$

При этом вода и бутылка приобретут следующие скорости:

$$v_{в_1} = 60g\tau_1 = 6 \text{ м/с},$$

$$v_{б_1} = 70g\tau_1 = 7 \text{ м/с}.$$

После прекращения действия внешней силы (т.е. по истечении времени τ_1) начинается вторая фаза процесса. Теперь на бутылку будет действовать только сила атмосферного давления, направленная вверх, которая сообщит бутылке ускорение

$$a_{б_2} = -\frac{p_а S}{m} = -60g.$$

Это ускорение будет замедлять движение бутылки:

$$v_{б_2} = v_{б_1} - \left|a_{б_2}\right| t,$$

вода же будет продолжать движение с ускорением

$$a_{в_2} = a_{в_1} = +60g$$

и скоростью

$$v_{в_2} = v_{в_1} + a_{в_2} t.$$

Столкновение между водой и бутылкой произойдет еще через время τ_2, за которое расстояние между ними сократится от Δh до нуля:

$$\tau_2 = \frac{v_{б_1} - v_{в_1}}{2a_в} + \sqrt{\frac{\left(v_{б_1} - v_{в_1}\right)^2}{\left(2a_в\right)^2} + \frac{\Delta h}{a_в}}.$$

Оценку для этого времени получим из соотношения

$$\Delta h = \frac{\Delta a \tau_2^2}{2},$$

где $\Delta a = a_{в_2} - a_{б_2} = 2a_в = 120g$:

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{2\Delta h}{2a_в}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Затем оценим значения скоростей воды и бутылки непосредственно перед их столкновением:

$$v_{в_2} = v_{в_1} + a_{в_2}\tau_2 = 7{,}8 \text{ м/с},$$

$$v_{б_2} = v_{б_1} - \left|a_{б_2}\right|\tau_2 = 5{,}2 \text{ м/с}.$$

Получается, что вода догоняет бутылку и, ударяя, может разбить ее.

Оценим теперь, какие силы и давления будут возникать непосредственно при соударении – это уже третья фаза процесса. Будем считать удар абсолютно неупругим (разрушение стекла) и его характерное время равным $\tau_3 = 10^{-4}$ с (как для шарика на стекле). Тогда изменение импульса каждого тела будет равно

$$m\Delta v = m\left(v_{\text{в}_2} - \frac{v_{\text{в}_2} + v_{\text{б}_2}}{2}\right) = $$
$$= m\left(\frac{v_{\text{в}_2} - v_{\text{б}_2}}{2}\right) = 0{,}65\,\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}},$$

а сила удара –

$$F_{\text{уд}} = \frac{m\Delta v}{\tau_3} = 6{,}5\cdot 10^3\ \text{Н}.$$

Давление у дна бутылки при этом составит

$$p = \frac{F_{\text{уд}}}{S} = \frac{6{,}5\cdot 10^3\ \text{Н}}{30\cdot 10^{-4}\ \text{м}^2} \approx 22\ \text{атм}$$

– весьма впечатляющая величина! Поскольку толщина стекла боковой поверхности бутылки обычно меньше, чем толщина дна (а «где тонко, там и рвется»), разрушение стекла происходит именно на боковой поверхности бутылки вблизи ее дна.

Подобно рисунку 1, на рисунке 2

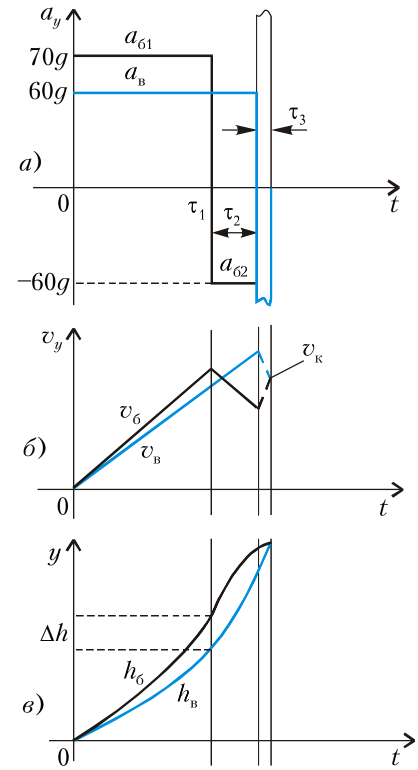


Рис. 2

представлен графически весь процесс в течение суммарного времени $\tau_1 + \tau_2 + \tau_3$, которое имеет порядок сотой доли секунды. На всю систему (бутылку с водой общей массой $m = m_{\text{в}} + m_{\text{б}} = 1$ кг) подействовал импульс ударной силы

$$F_1\tau_1 = 650\ \text{Н}\cdot 10^{-2}\ \text{с} = 6{,}5\ \text{Н}\cdot\text{с}.$$

В результате после окончания процесса, т.е. после неупругого удара со скоростью

$$v_{\text{к}} = \left(v_{\text{в}_2} + v_{\text{б}_2}\right)/2 = 6{,}5\ \text{м/с},$$

получен импульс

$$mv_{\text{к}} = 1\ \text{кг}\cdot 6{,}5\ \text{м/с} = 6{,}5\ \text{кг}\cdot\text{м/с}.$$

Видно, что имеет место равенство

$$F_1\tau_1 = mv_{\text{к}}.$$

Случайно ли это? Конечно, нет! Ведь силы атмосферного давления действуют здесь отдельно на воду и на бутылку, а в общей системе бутылки с водой они уничтожают друг друга, и остается только внешняя сила.

Как в землю казан закопали

А.СТАСЕНКО

ПОИСТИНЕ В ФИЗИКЕ МОЖНО найти применение всему. Так, если у вас есть старый казан (полусферическая кастрюля), не выбрасывайте его, а вкопайте в землю. Затем подключите казан к одной из клемм источника напряжения U, а к другой его клемме подсоедините идеальный длинный провод, который постарайтесь заземлить подальше, желательно на бесконечности (см. рисунок).

Рано или поздно в проводах (отходящем от батареи к казану и подходящем к ней из бесконечности) установится постоянный ток I. Точно такой же ток должен течь от казана в земле – ведь заряды не создаются и не уничтожаются, причем этот поток зарядов должен быть одинаковым через любую полусферу радиусом r и, следовательно, площадью $2\pi r^2$. Все это следствия закона сохранения заряда. А вот плотность тока (т.е. ток через единицу площади поверхности) должна уменьшаться по мере удаления от казана (и, следовательно, увеличения поверхности полусферы).

Если считать картину сферически (точнее, полусферически) симметричной, то плотность тока равна

$$j_e = \frac{I}{2\pi r^2}. \qquad (1)$$

Но что же вызывает движение зарядов в каждой точке проводящей среды? Конечно, локальное электрическое поле. Причем плотность тока $\vec{j}_e$ прямо пропорциональна напряженности поля $\vec{E}$, а коэффициент пропорциональности называется *коэффициентом электропроводности* σ:

$$\vec{j}_e = \sigma\vec{E}. \qquad (2)$$

Обратная σ величина называется удельным электрическим сопротивлением:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Эти коэффициенты очень полезны в электротехнике. Так, если у вас есть кусок проволоки длиной l с поперечным сечением S из материала с удельным электрическим сопротивлением ρ, то его сопротивление R легко найти по формуле

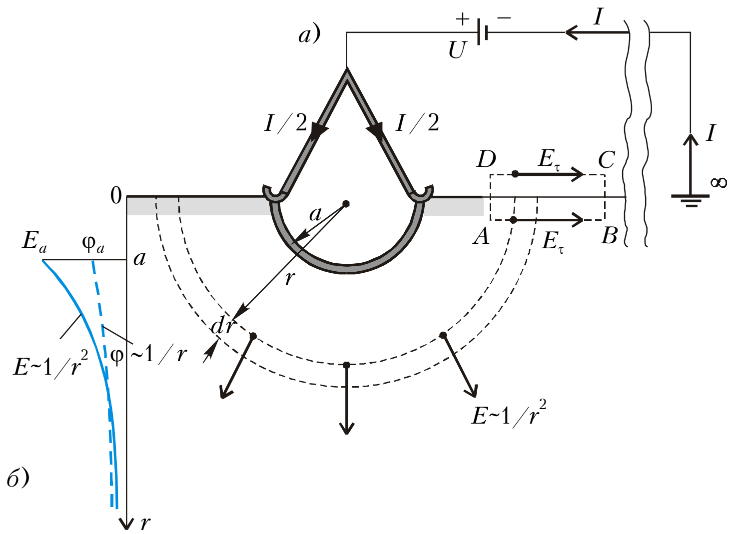
$$R = \frac{l}{S}\rho = \frac{l}{S\sigma}.$$

А эта величина связывает разность потенциалов (напряжение) U, приложенную к концам проволоки, и постоянный ток, который потечет в ней:

$$U = IR. \qquad (3)$$

Но полубесконечное пространство проводящей земли под казаном ($a \le r < \infty$) вовсе не похоже на кусок проволоки. Как бы найти его суммарное сопротивление?

Вспомним, что напряженность электрического поля есть сила, действующая на единичный заряд. Если этот заряд поле перемещает на расстояние dr, то оно совершает при этом работу $E\cdot dr$ (здесь учтено, что в рассматриваемом случае вектор поля $\vec{E}$ направлен вдоль перемещения $\vec{dr}$). А какая работа необходима для того, чтобы «протащить» через единицу площади



поверхности в единицу времени заряд, численно равный j_e? С помощью выражений (1) и (2) получим (в вольтах!)

$$dA = \frac{I}{2\pi r^2 \sigma} dr. \qquad (4)$$

Будем считать, что провода и металлический казан – идеальные проводники (не оказывают сопротивления току), а удельная проводимость земли постоянна в пространстве. Тогда вся работа на пути от $r = a$ (поверхность казана) до $r \to \infty$ получится в результате интегрирования выражения (4):

$$A = \frac{I}{2\pi\sigma} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{2\pi\sigma a}.$$

Но кто совершает эту работу? Конечно же, источник напряжения:

$$A = U.$$

Сравнивая с (3), получим

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma a}.$$

Выходит, что суммарное электрическое сопротивление всего полубесконечного пространства с заданным коэффициентом σ зависит только от радиуса казана a.

Итак, в рассматриваемом случае однородной электропроводящей среды существует радиальное поле с напряженностью $E \sim 1/r^2$ (как бы от точечного заряда, помещенного в центре казана) и постоянный ток с плотностью $j_e \sim 1/r^2$ $(a \le r < \infty)$. Движение зарядов вызывается разностью потенциалов $U = \varphi_a - \varphi_\infty$. Но что такое потенциал в точке r? Он тесно связан с работой поля по перемещению единичного заряда, которую мы уже упоминали выше:

$$d\varphi = -dA = -Edr. \qquad (5)$$

Значит,

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}.$$

Отсюда легко найти радиальную зависимость потенциала:

$$\varphi(r) - \varphi_a = -\int_a^r Edr =$$

$$= -\frac{I}{2\pi\sigma} \int_a^r \frac{dr}{r^2} = \frac{I}{2\pi\sigma}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a}\right). \quad (6)$$

Проверим так называемые граничные условия: при $r = a$ получаем $\varphi(r) = \varphi_a$; при $r \to \infty$ имеем $\varphi_\infty - \varphi_a = -\frac{I}{2\pi a\sigma} = -U$. Таким образом, формулу (6) можно записать также в виде

$$\frac{\varphi(r) - \varphi_\infty}{\varphi_a - \varphi_\infty} = \frac{a}{r}. \qquad (7)$$

Понятно также, зачем взят знак «минус» в формуле (5) – чтобы радиальная зависимость потенциала имела вид горки (см. рис. *б*), по склону которой положительные заряды «скатываются» в область меньших значений φ (как санки с ледяной горы). Кстати, теперь легко объяснить, почему от упавшего на землю высоковольтного провода нужно уходить очень мелким шагом: ведь вблизи него потенциал резко меняется с расстоянием, и при обычном шаге между ногами может возникнуть очень большая разность потенциалов – так называемое шаговое напряжение.

Отметим, что в «новых» терминах соотношение (2) примет вид

$$j_e = -\sigma \frac{d\varphi}{dr}. \qquad (8)$$

Но что творится над землей? Если считать, что воздух не проводит электричество, т.е. положить $\sigma = 0$, то в воздухе не будет и электрического тока: $j_e = 0$. А электрическое поле? Рассмотрим прямоугольный контур *ABCD* (см. рис. *а*), верхняя сторона которого расположена над землей, нижняя – в земле, а боковые стороны очень (ну, очень!) малы. Если протащить некоторый заряд по этому (замкнутому) контуру (например, в указанном порядке расположения букв), то суммарная работа обязана равняться нулю – ведь в этом контуре нет никаких источников тока, а электростатическое поле потенциально. Это значит, что если поле существует в земле, то оно обязано быть и в воздухе около земли. Более того, тангенциальная (касательная) составляющая этого поля E_τ вне земли (направленная вдоль стороны *DC*) должна в точности равняться тангенциальной составляющей поля в земле (направленной вдоль стороны *AB*). Заметим, что здесь ничего не сказано о нормальной составляющей электростатического поля на поверхности земли. Она может существовать, может испытывать скачок на поверхностных зарядах (так же, как нормальная – радиальная – составляющая поля терпит разрыв на зарядах, расположившихся на поверхности казана). Поэтому у поверхности раздела воздух – земля линии напряженности электростатического поля могут быть искривлены.

А что если взять два казана, сложить их в виде сферы и закопать поглубже – тогда, может быть, электрическое поле станет совсем сферически симметричным? Ну хотя бы в некоторой окрестности этого Двухказанья, еще далеко от поверхности? Но и тут вопрос: а провод, подводящий ток, – не нарушает ли он этой прекрасной симметрии? Вот и подумайте. Секрет развития науки в том и состоит, что, ответив на один вопрос, она ставит другие.

Теперь подойдем к казану с другой точки зрения. Представим себе, что он наполнен кипятком, температура которого T_a поддерживается постоянной. Тогда в окружающей почве установится стационарное распределение температуры, и тепловая энергия будет постоянно «течь» от казана на бесконечность, где температура равна T_∞. Иначе говоря, поток тепловой энергии между казаном и бесконечностью обеспечивается разностью температур $T_a - T_\infty$. Значит, по аналогии с электричеством, температуру можно назвать потенциалом, а плотность теплового потока j_T выразить соотношением типа (8):

$$j_T = -\lambda \frac{dT}{dr}, \qquad (9)$$

где λ – *коэффициент теплопроводности* среды.

И это еще не все. Представим себе, что казан «равномерно дырявый», и некий добрый человек поддерживает в нем постоянный уровень супа. Тогда содержимое казана плотностью $\rho_{\text{супа}}$ будет диффундировать через почву, и рано или поздно установится стационарное распределение этого вещества в пространстве. Ясно, что около казана почва плотностью ρ будет больше насыщена супом, а чем дальше – тем меньше. Тут уместно ввести понятие массовой доли диффундирующего вещества $C = \rho_{\text{супа}}/\rho$. Будем считать, что эта величина всюду много меньше единицы («слабый раствор»), хотя и меняется в пространстве. Тогда, по аналогии с двумя ранее рассмотренными случаями, можно сказать, что поток диффундирующего вещества обеспечивается разностью потенциалов $C_a - C_\infty$, а в каждой его точке плотность потока j_m выражается соотношением типа (8) и (9):

$$j_m = -D \frac{dC}{dr}, \qquad (10)$$

где D – *коэффициент диффузии* (или, если угодно, *массопроводности*) среды.

И вот теперь – самое замечательное. Все рассмотренные распределения так называемых потенциалов можно записать совершенно одинаково (!):

$$\frac{\varphi(r) - \varphi_\infty}{\varphi_a - \varphi_\infty} = \frac{T(r) - T_\infty}{T_a - T_\infty} = \frac{C(r) - C_\infty}{C_a - C_\infty} = \frac{a}{r}. \qquad (11)$$

И суммарные потоки соответствующей физической субстанции – заряда I, тепловой энергии Q_T, массы Q_m – тоже можно записать одинаково:

$$I = \frac{1}{R}(\varphi_a - \varphi_\infty),$$

$$Q_T = \frac{1}{R_T}(T_a - T_\infty),$$

$$Q_m = \frac{1}{R_m}(C_a - C_\infty),$$

где видны уже знакомое суммарное сопротивление электрическому току

$$R = \frac{1}{2\pi a \sigma},$$

а также сопротивления потоку тепла и массы

$$R_T = \frac{1}{2\pi a \lambda} \text{ и } R_m = \frac{1}{2\pi a D}.$$

А какая из всего этого польза? Очень большая. Например, вы хотите узнать распределение температуры или концентрации вещества в гораздо более сложной ситуации, чем рассмотренная нами (достаточно симметричная). Скажем, в случае слоистой земли, в которой встречаются к тому же полости, валуны и другие неоднородности. Тогда, пользуясь *электро-тепло-массовой аналогией*, рассмотренной нами, можно распределение температуры или концентрации смоделировать распределением электрического потенциала в среде с таким же распределением коэффициента электропроводности, как и пространственные распределения коэффициентов теплопроводности или диффузии (массопроводности). Измерение токов и разностей потенциалов – более простая проблема, чем измерение температур и концентраций, да и установление электрических полей происходит быстрее. И такое экспериментальное оборудование можно собрать «на столе». Подобные «аналоговые» установки использовались в прикладной физике до развития мощной вычислительной техники. Но и с ее развитием аналогии физических процессов не потеряли смысла – только теперь они понимаются как *одинаковость уравнений и их решений при одинаковых граничных условиях.* Лучше всего эту мысль иллюстрирует цепочка равенств (11).

Итак, если у вас есть старый котел или казан – не выбрасывайте, а ... подумайте о физике.

Изотопные источники энергии

О.ЕГОРОВ

Одним из критериев улучшения условий жизни человека является количество электроэнергии, которое он потребляет. Большая часть электроэнергии, вырабатываемой сейчас, получается из невозобновляемых источников: угля, нефти, газа. Выработка электроэнергии на атомных электростанциях также требует затрат невозобновляемых ресурсов, в частности урана-235. В процессе работы реакторов на этом топливе идет захват тепловых нейтронов ядрами урана-238, при этом «нарабатывается» плутоний-239 и множество других радиоизотопов. Само название «радиоизотопы» означает, что эти вещества радиоактивны, т.е. распадаются с выбросом α-частиц, электронов или γ-квантов; при этом выделяется энергия, которую также хотелось бы использовать.

В этой заметке мы рассмотрим некоторые радиоизотопные источники электроэнергии, нашедшие широкое и разнообразное применение в самых разных сферах жизнедеятельности человека.

В настоящее время накоплено огромное количество радиоактивных изотопов. При их распаде выделяется тепловая энергия, которую при желании можно преобразовать в электрическую. Тепловая энергия – это конечный продукт торможения в веществе частиц, образующихся при радиоактивных распадах. Первоначально такие источники получили распространение в космосе в необитаемых кораблях, поскольку не надо было беспокоиться о радиационной защите. В дальнейшем они нашли применение и в иных областях человеческой деятельности, где использование других источников энергии либо невозможно, либо совершенно нерентабельно.

В 1999 году исполнилось 40 лет со времени разработки первого в мире

(Окончание см. на с. 34)

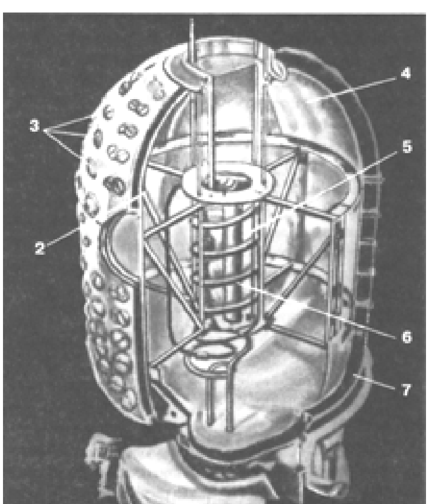
Эта заметка является авторским вариантом статьи, опубликованной в научно-популярном журнале «Электричество и жизнь» (№3, 2000 г.).

(Начало см. на с. 31)

изотопного источника электроэнергии. Тогда в рамках проекта «Орион» комиссия по атомной энергии США приняла решение создать целую серию ядерных вспомогательных источников энергии – сокращенно SNAP. В соответствии с этой программой, в США приступили к разработке устройств, в которых электроэнергия получается при использовании тепла – либо выделяемого при радиоактивном распаде изотопов, либо вырабатываемого при делении ядер урана в небольших ядерных реакторах (таким источникам тока присваивались нечетные номера).

Исторически первым был разработан термоэлектрический генератор SNAP-1A мощностью 125 Вт с ртутной защитой. Работы над установкой были закончены в 1960 году после испытания модели с электрическим подогревом. На рисунке хорошо видны таблетки изотопа церия $^{144}\mathrm{Ce}$, при радиоактивном распаде которого выделяется тепло, и змеевик охлаждения. Все это находится в пространстве, заполненном ртутью. На поверхности изолирующего покрытия расположены термоэлектрические преобразователи.

Примерно тогда же (в 1959 году) был создан изотопный термоэлектрический преобразователь SNAP-3, предназначенный для проверки основных принципов работы таких устройств. Этот преобразователь был загружен изотопом полония $^{210}\mathrm{Po}$. Он имел начальную мощность 3 Вт и проработал долгие годы.



Источник SNAP-1A. Здесь 1 – тепловая изоляция, 2 – тепловые экраны, 3 – термоэлектрические преобразователи, 4 – пространство, заполненное ртутью, 5 – таблетки церия, 6 – охлаждающий змеевик, 7 – изоляция

Радиоизотопные преобразователи типа SNAP-3, загруженные изотопом плутония $^{238}\mathrm{Pu}$, имели мощность 2,7 Вт и массу 1,84 кг (2,5 кг вместе с термоэлектрическим преобразователем). Малые размеры ($11{,}875 \times \times 12{,}25$ см) и относительно небольшая масса позволили использовать их в космосе, в частности как вспомогательные источники электроэнергии в спутниках серии «Транзит-4А» и «Транзит-4Б», запускаемых с 1961 года. Плутоний-238 имеет период полураспада 89 лет, так что преобразователь обеспечивал указанную мощность по крайней мере в течение 5 лет. Следует отметить, что спутник «Транзит-4А» с радиоизотопным источником, запущенный 28 июня 1961 года, – первый случай использования атомной энергии в космосе. Заметим также, что в плутонии-238, в отличие от плутония-239, не может поддерживаться цепная ядерная реакция, а значит, при использовании этого изотопа исключена опасность ядерного взрыва.

Серия радиоизотопных источников типа SNAP-7 с загрузкой изотопом стронция $^{90}\mathrm{Sr}$ предназначалась уже для использования на земле. Так, SNAP-7A мощностью 5 Вт и SNAP-7B мощностью 30 Вт использовались в качестве источников энергии для навигационных маяков, а источники SNAP-7C мощностью 5 Вт и SNAP-7D мощностью 30 Вт – в автоматических метеостанциях, расположенных в удаленных районах.

Источник SNAP-9A мощностью 25 Вт был разработан для установки на спутнике «Транзит-5». Использованный в нем радиоизотоп плутония $^{238}\mathrm{Pu}$ обеспечивал надежную работу в космосе в течение 6 лет.

Термоэлектрический генератор SNAP-11 был предназначен для использования при мягкой посадке на Луну. Загруженный в него радиоизотоп кюрия $^{242}\mathrm{Cm}$ обеспечивал мощность 21 – 25 Вт в течение 120 дней.

Можно сказать, что использование радиоизотопных источников тока вместо химических позволило в десятки и даже сотни раз увеличить длительность пребывания спутников на орбите. Однако при использовании спутников с большим энергопотреблением мощности радиоизотопных генераторов оказывается недостаточно. При энергопотреблении более 500 Вт, по анализу американской комиссии по использованию атомной энергии, более рентабельно использовать ядерные реакции деления, т.е. маленькие атомные станции.

Сделаем теперь несколько численных оценок.

Мы видели, что радиоизотопные преобразователи SNAP-3 загружаются изотопами полония $^{210}\mathrm{Po}$ (период полураспада 0,38 года) или плутония $^{238}\mathrm{Pu}$ (период полураспада 89 лет). Оценим количество радиоизотопа $^{238}\mathrm{Pu}$, необходимого для обеспечения такой же тепловой мощности, как и при загрузке $^{210}\mathrm{Po}$, если тепловая мощность преобразователя 60 Вт, а масса изотопа полония 0,38 г.

Воспользуемся законом радиоактивного распада. Оба изотопа испускают только α-частицы. Для грубой оценки можно составить пропорцию: чем меньше период полураспада, тем больше удельная активность препарата. И если период полураспада изотопа плутония в 234 раза больше периода полураспада изотопа полония, то и масса изотопа плутония, необходимая для создания той же тепловой мощности, должна быть приблизительно в 234 раза больше массы изотопа полония.

Отсюда возникают и особенности применения различных радиоизотопов. Так, если вам нужен источник на короткое время, например в космическом полете, то лучше взять короткоживущий изотоп, масса которого, необходимая для создания нужной тепловой мощности, просто ничтожна. Для использования же таких источников на земле масса загружаемого изотопа ничем не лимитируется, кроме повышения радиоактивного фона вблизи источника. (При толщине стенок контейнера порядка одного сантиметра контейнер полностью поглощает все альфа-частицы. Скажем больше – кожа человека также полностью задерживает эти частицы.)

Оценим теперь активность используемых радиоактивных источников. Зная массу и период полураспада изотопа $^{210}\mathrm{Po}$, найдем его активность и выразим ее в кюри (1 кюри $= 3{,}7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду), если энергия испускаемых α-частиц равна 5,3 МэВ.

Зная молярную массу изотопа полония и число Авогадро, легко сосчитать, что в 0,38 г изотопа содержится $1{,}1 \cdot 10^{21}$ атомов полония. За 0,38 года распадается половина этого количества, а за одну секунду происходит, соответственно, $4 \cdot 10^{13}$ распадов. Значит, активность препарата составляет 1100 кюри. (Для сравнения напомним, что в Чернобыле активность выбросов была на 4 порядка больше.)