Реєстраційний номер	308799
Назва олімпіади	Всеукраїнська учнівська інтернет-олімпіада з фізики
Прізвище, ім’я та по батькові учасника	Шумаєв Олександр Ігорович
Рік народження	1999
Область	Харківська
Місто	Харків
Повна назва навчального закладу	Харківський фізико-математичний ліцей № 27 Харківської області
Клас, до якого перейшов учень	9
Клас, за який виконується конкурсне завдання	9
Статус	учень
Електронна адреса учасника	sashashumaev@rambler.ru

Задача № 1

Условие: В горизонтальном дне сосуда имеется прямоугольное отверстие с размерами $a\times b$. Его закрыли прямоугольным параллелепипедом со сторонами $b\times c\times c$ так, что одна из диагоналей грани $c\times c$ вертикальна (вид сбоку показан на рисунке). В сосуд медленно наливают жидкость плотностью ρ. Какова должна быть масса параллелепипеда M, чтобы он не всплывал при любом уровне воды? Силами трения и поверхностного натяжения пренебречь.

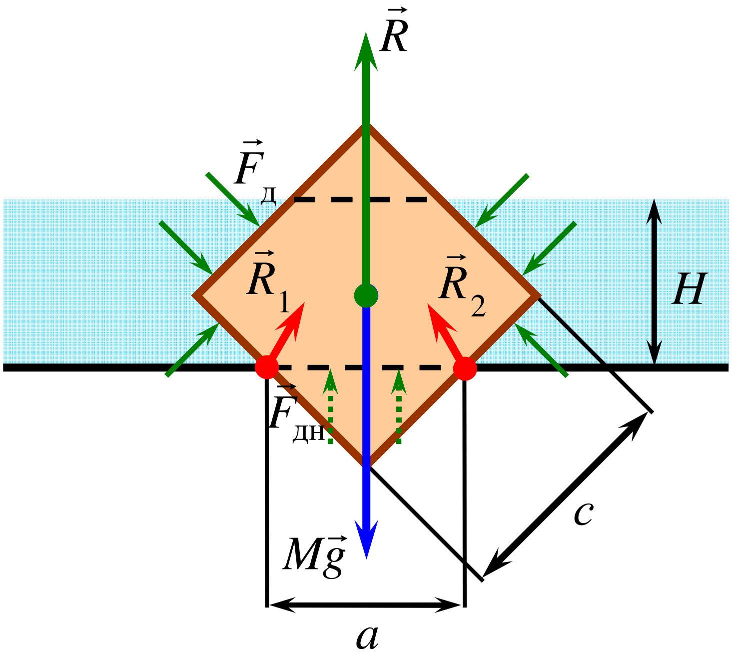


рис.1

Решение: Изобразим вертикальное сечение сосуда схематически и расставим силы, действующие на параллелепипед. На рис.1 $M\vec{g}$ – сила тяжести, действующая на параллелепипед и приложенная к его центру тяжести; $\vec{R}_1$, $\vec{R}_2$ – силы реакции опоры со стороны краев дна, распределенные по контуру касания параллелепипеда с дном (они могут быть не перпендикулярны граням параллелепипеда); $\vec{F}_{\text{д}}$ – силы давления жидкости на поверхность параллелепипеда, распределенные по площади соприкосновения его с водой. Найдем равнодействующую $\vec{R}$ сил давления. Представим себе, что кусок параллелепипеда, находящийся ниже уровня дна сосуда, исчез, а вместо него появилась вода (т.е. дно опустили на малое расстояние). Тогда на оставшуюся часть параллелепипеда начали бы действовать дополнительные силы давления на дно (на рисунке 1 изображены штриховыми стрелками), модуль равнодействующей $F_{\text{дн}}$ которых легко найти: $F_{\text{дн}} = \rho g H S_{\text{дн}}$, где $S_{\text{дн}} = ab$ – площадь “дна”. Равнодействующая же всех сил давления, включая силы давления на “дно”, равна силе Архимеда $\vec{F}_{\text{А}}$ для куска параллелепипеда, заключенного между уровнями воды и дна, $F_{\text{А}} = \rho g S b$, где S – площадь участка вертикального сечения параллелепипеда, находящегося между уровнями воды и дна сосуда. Тогда истинная равнодействующая сил давления, без учета сил давления на “дно”, равна по модулю $R = \rho g S b - \rho g H \cdot ab$ и направлена вертикально вверх. Если же это выражение отрицательно, то сила $\vec{R}$ направлена вниз. Рассмотрим 2 случая:

а) $H \le \dfrac{c}{\sqrt{2}} - \dfrac{a}{2}$. Тогда уровень воды не выше горизонтальной диагонали вертикального сечения параллелепипеда (на рис. 2а и рис. 2б обозначен синим пунктиром). Как видно из

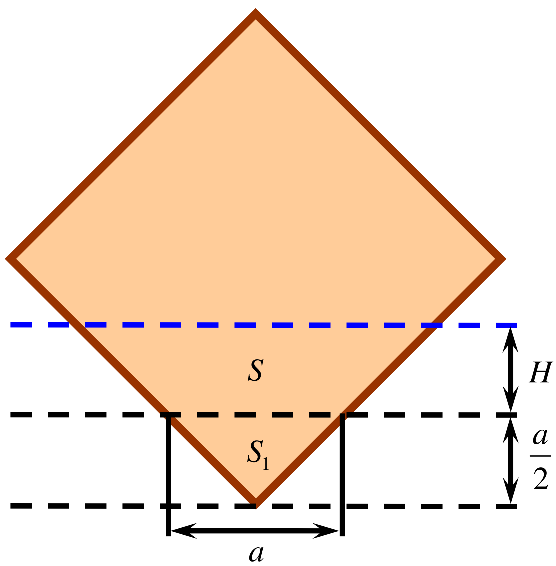


рис. 2а

рисунка 2а, $S_1 = \frac{a^2}{4}$, а также $S + S_1 = \left(\frac{a}{2} + H\right)^2$. Тогда $S = \left(\frac{a}{2} + H\right)^2 - \frac{a^2}{4} = aH + H^2$, и $R = \rho gb(aH + H^2 - aH) = \rho gbH^2$. Зависимость $R(H)$ возрастающая, поэтому максимальное значение модуля $\vec{R}$ достигается при $H = \frac{c}{\sqrt{2}} - \frac{a}{2}$ и равно $R_{\max 1} = \rho gb\left(\frac{c}{\sqrt{2}} - \frac{a}{2}\right)^2 = \frac{\rho gb}{4}(c\sqrt{2} - a)^2$.

б) $H > \frac{c}{\sqrt{2}} - \frac{a}{2}$. В этом случае уровень воды выше горизонтальной диагонали вертикального сечения параллелепипеда. Как видно из рисунка 2б, $S_1 = \frac{a^2}{4}$; $S_2 = (c\sqrt{2} - \frac{a}{2} - H)^2$.

Тогда $S = c^2 - \frac{a^2}{4} - (c\sqrt{2} - \frac{a}{2} - H)^2 = ac\sqrt{2} + 2cH\sqrt{2} - aH - H^2 - c^2 - \frac{a^2}{2}$. Тогда $R = \rho gb\left(ac\sqrt{2} + 2cH\sqrt{2} - 2aH - H^2 - c^2 - \frac{a^2}{2}\right)$.

Чтобы найти максимально возможное значение $\vec{R}$ для данного случая, необходимо найти максимум функции $f(H) = -H^2 + 2H(c\sqrt{2} - a) + ac\sqrt{2} - c^2 - \frac{a^2}{2}$.

График этой функции имеет вид параболы с ветвями вниз и вершиной при $H = c\sqrt{2} - a$. Тогда $f_{\max} = \frac{a^2}{2} - ac\sqrt{2} + c^2 = \left(c - \frac{a}{\sqrt{2}}\right)^2$, и максимальное значение силы $\vec{R}$ для этого случая равно $R_{\max 2} = \frac{\rho gb}{2}(c\sqrt{2} - a)^2$.

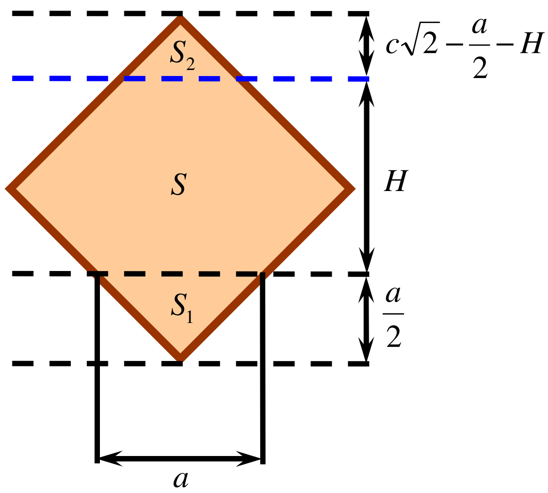


рис. 2б

Значение силы $M\vec{g}$ должно быть не меньше максимально возможного значения силы $\vec{R}$, чтобы брусок не всплыл в предельном случае, когда силы $\vec{R}_1$ и $\vec{R}_2$ равны нулю. Тогда максимально возможное значение силы $\vec{R}$ равно $R_{\max} = R_{\max 2} = \frac{\rho gb}{2}(c\sqrt{2} - a)^2$, и ограничение на M принимает вид

$$Mg \geq \frac{\rho gb}{2}(c\sqrt{2} - a)^2,$$

откуда $M \geq \rho b\left(c - \frac{a}{\sqrt{2}}\right)^2$.

Ответ: $M \geq \rho b\left(c - \frac{a}{\sqrt{2}}\right)^2$.

Задача № 2

<u>Условие</u>: Два одинаковых теплоизолированных калориметра высотой $h = 75$ см заполнены на одну треть один – льдом, другой – водой при температуре $t = 10°\text{C}$. Воду из второго калориметра переливают в первый, и при этом калориметр оказывается заполненным на две трети. После того как температура в калориметре установилась, уровень заполнения его увеличился на $\Delta h = 0{,}5$ см. Какова была начальная температура льда в калориметре?

<u>Решение</u>: Очевидно, уровень заполнения калориметра увеличился вследствие замерзания воды, так как плотность льда меньше плотности воды. Выразим количество воды Δm, которая замерзла. Объем воды до замерзания $V_1 = \Delta m / \rho_0$, после замерзания $V_2 = \Delta m / \rho_i$; где $\rho_0 = 1000\ \text{кг}/\text{м}^3$, $\rho_i = 900\ \text{кг}/\text{м}^3$ – плотности воды и льда соответственно. Изменение объема $\Delta V = S\Delta h = V_2 - V_1$ (сечение калориметров считаем постоянным). Тогда имеем уравнение $\dfrac{\Delta m}{\rho_i} - \dfrac{\Delta m}{\rho_0} = S\Delta h$, откуда $\Delta m = S\Delta h \dfrac{\rho_0 \rho_i}{\rho_0 - \rho_i}$. Очевидно, не вся вода замерзла, ведь в противном случае содержимое калориметра расширилось бы на 1/18 своего объема, в то время как на самом деле оно расширилось на 1/100 своего объема. Тогда температура в калориметре после установления теплового равновесия $T = 0°\ \text{C}$.

В калориметре происходило 3 тепловых процесса: нагревание льда от некоторой температуры T_i до температуры $T = 0°\ \text{C}$; охлаждение воды от температуры $t = 10°\text{C}$ до температуры $T = 0°\ \text{C}$; и замерзание некоторой части воды Δm. Запишем уравнение теплового баланса для этих процессов:

$$c_i m_i (T - T_i) = c_0 m_0 (t - T) + \lambda \Delta m,$$

где $c_i = 2100\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$; $c_0 = 4200\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$ – теплоемкости льда и воды соответственно; $m_i = \rho_i \cdot \dfrac{Sh}{3}$; $m_0 = \rho_0 \cdot \dfrac{Sh}{3}$ – начальные массы льда и воды соответственно; $\lambda = 3{,}3 \cdot 10^5\ \dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ – удельная теплота плавления льда. Подставим выражения для Δm, m_i, m_0, полученные выше:

$$c_i \rho_i \cdot \frac{Sh}{3}(T - T_i) = c_0 \rho_0 \cdot \frac{Sh}{3}(t - T) + \lambda S \Delta h \frac{\rho_0 \rho_i}{\rho_0 - \rho_i},$$

откуда

$$T_i = T - \frac{c_0 \rho_0}{c_i \rho_i}(t - T) - \frac{3\lambda \rho_0 \Delta h}{c_i h(\rho_0 - \rho_i)}.$$

Проверим размерность:

$$[T_i] = °\text{C} - \frac{\dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}} \cdot \dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{\dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}} \cdot \dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3}}(°\text{C} - °\text{C}) - \frac{\dfrac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{см}}{\dfrac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}} \cdot \text{см}\left(\dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \dfrac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)} = °\text{C} - °\text{C} - °\text{C} = °\text{C}.$$

Найдем численное значение:

$$\{T_i\} = 0 - \frac{4200 \cdot 1000}{2100 \cdot 900}(10 - 0) - \frac{3 \cdot 330000 \cdot 1000 \cdot 0{,}5}{2100 \cdot 75(1000 - 900)} \approx -53{,}7\ °\text{C}$$

<u>Ответ</u>: –53,7 °C.

Задача № 3

<u>Условие</u>: Постройте изображение квадрата, даваемое собирающей линзой. Середина стороны квадрата, лежащей на главной оптической оси линзы, находится от линзы на расстоянии, равном фокусному (см. рис.1).

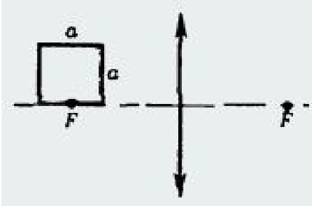


рис.1

<u>Решение</u>: Для начала построим изображение произвольной точки пространства в линзе. Введем декартову систему координат в плоскости, в которой лежат главная оптическая ось линзы и светящаяся точка. Если же светящаяся точка лежит на главной оптической оси, плоскость выбираем произвольно. Выберем за центр координат оптический центр линзы, а ось Ox совместим с главной оптической осью линзы. Пусть точка S имеет координаты $(x_1; y_1)$, $x_1 \neq -F$, где F – фокусное расстояние линзы. Построим два луча, выходящих из этой точки: луч 1, параллельный главной оптической оси линзы; и луч 2, проходящий через ее оптический центр. Луч 1 после преломление в линзе пройдет через ее фокус, а луч 2 не преломится (см. рис.2). Эти лучи пересекутся в точке $S_1(x_2; y_2)$ – изображении точки S, если точка S не лежит на фокальной плоскости линзы. Луч 1 пересекает линзу в точке A(0; y_1). Прямая AS_1 проходит через точки $A(0; y_1)$ и $F_2(F;\ 0)$. Из математики известно, что уравнение прямой, проходящей через точки с координатами $(x_1; y_1)$ и $(x_2; y_2)$, имеет вид $\dfrac{x-x_1}{x_2-x_1} = \dfrac{y-y_1}{y_2-y_1}$.

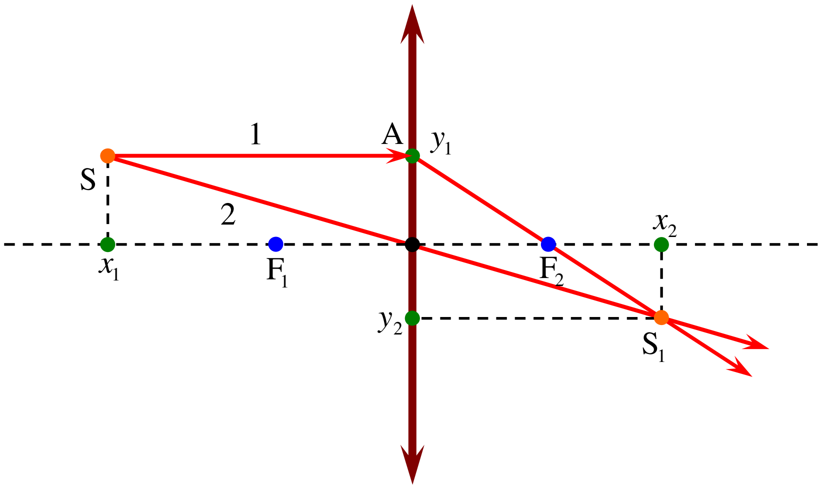


рис.2

Запишем уравнение прямой AS_1:

$$\frac{x-0}{F-0} = \frac{y-y_1}{0-y_1},$$

которое приводится к виду

$$y = y_1\left(1-\frac{x}{F}\right). \tag{1}$$

Запишем также уравнение прямой SS_1, проходящей через точки (0; 0) и $S(x_1; y_1)$:

$$\frac{x-0}{x_1-0} = \frac{y-0}{y_1-0},$$

или

$$y = y_1\frac{x}{x_1}. \tag{2}$$

Координаты точки S_1 удовлетворяют и равенству (1), и равенству (2), поскольку точка S_1 лежит на пересечении прямых AS_1 и SS_1. Подставив $x = x_2$ и $y = y_2$ в систему

$$\begin{cases} y = y_1\left(1 - \dfrac{x}{F}\right); \\ y = y_1 \dfrac{x}{x_1}; \end{cases}$$

и решив ее, получаем

$$x_2 = \frac{Fx_1}{F + x_1};\; y_2 = \frac{Fy_1}{F + x_1} \tag{3}$$

(этот же результат можно было получить, применяя формулу тонкой линзы). Из этих равенств видно, что если $x_1 = -F$, т.е. точка находится в фокальной плоскости линзы, то изображения не существует, т.к. не определен знаменатель дробей $F + x_1$. Заметим также, что если x_1 стремится к $-F$ “слева”, т.е. $x_1 = -F - \varepsilon$ при $\varepsilon \to 0$, абсцисса изображения $x_2 \to +\infty$; но если x_1 стремится к $-F$ “справа”, т.е. $x_1 = -F + \varepsilon$ при $\varepsilon \to 0$, то $x_2 \to -\infty$. Тогда, если некоторый отрезок проходит через фокальную плоскость, то его изображение будет разорвано на две части, одна из которых будет удаляться в бесконечность “слева” от линзы, а другая – “справа”.

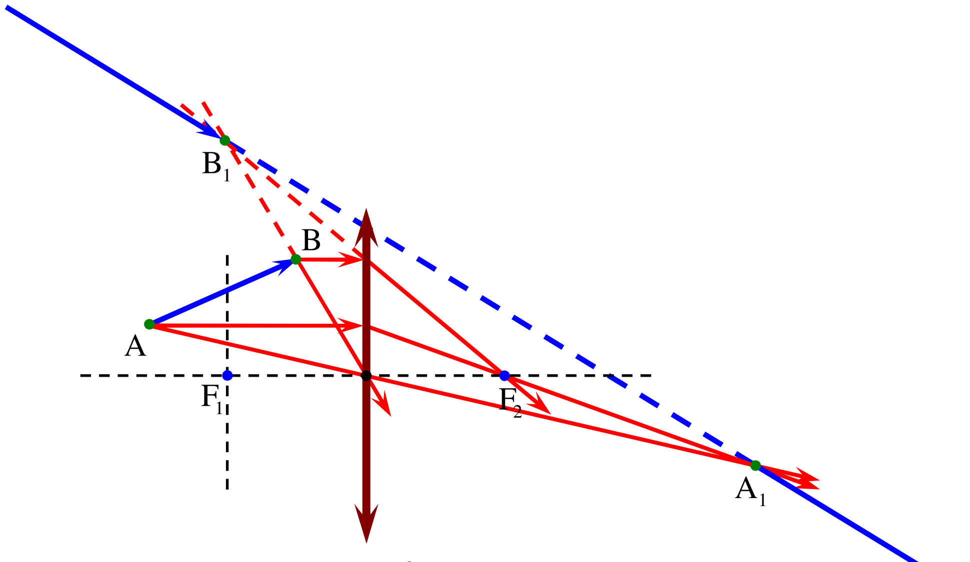


рис.3

Докажем, что изображение отрезка будет полностью лежать на некоторой прямой. Рассмотрим отрезок АВ. Координаты концов его изображения A_1 и B_1 можно найти по формулам (3). Пустим луч из точки А вдоль отрезка АВ. После преломления в линзе он пойдет вдоль прямой A_1B_1. Пустим теперь луч из любой другой точки С вдоль отрезка АВ. Все такие лучи будут совпадать. Так как изображением любой точки отрезка АВ является точка пересечения луча или его продолжения с некоторой прямой, то изображения всех точек будут лежать на этом луче или его продолжении. Если отрезок АВ не пересекает фокальную плоскость, то его изображением является отрезок A_1B_1 с концами в точках A_1 и B_1, которые являются изображениями точек А и В. Но если отрезок АВ пересекает фокальную плоскость, то его изображением является не отрезок A_1B_1, а фигура, дополняющая этот отрезок до прямой, на которой он лежит (см. рис.3). Изображение приходит из бесконечности, “заканчивается” в точке B_1, затем “начинается” в точке A_1 и уходит в бесконечность.

Построим теперь изображение квадрата, пользуясь этим. Вершины квадрата имеют координаты соответственно $A\left(-F - \dfrac{a}{2};0\right)$; $B\left(-F - \dfrac{a}{2};a\right)$; $C\left(-F + \dfrac{a}{2};a\right)$; $D\left(-F + \dfrac{a}{2};0\right)$ (см. рис.4). Соответствующие координаты изображений этих точек $A_1\left(\dfrac{F(a+2F)}{a};0\right)$;

$B_1\left(\dfrac{F(a+2F)}{a};-2F\right)$; $C_1\left(-\dfrac{F(2F-a)}{a};2F\right)$; $D_1\left(-\dfrac{F(2F-a)}{a};0\right)$ (вычислено по формулам (3)). Восстановим теперь изображения всех отрезков. Отрезки AB и CD преобразуются в отрезки A_1B_1 и C_1D_1, отрезки же BC и AD “разрываются” фокальной плоскостью линзы. Все отрезки изображения, находящиеся по ту же сторону от линзы, что и квадрат, являются мнимыми. На рис.4 синим показано изображение (сплошная линия – действительные участки изображения, пунктирная линия – мнимые). Стрелочками изображены лучи, уходящие на бесконечность.

<u>Ответ</u>: См. рис.4

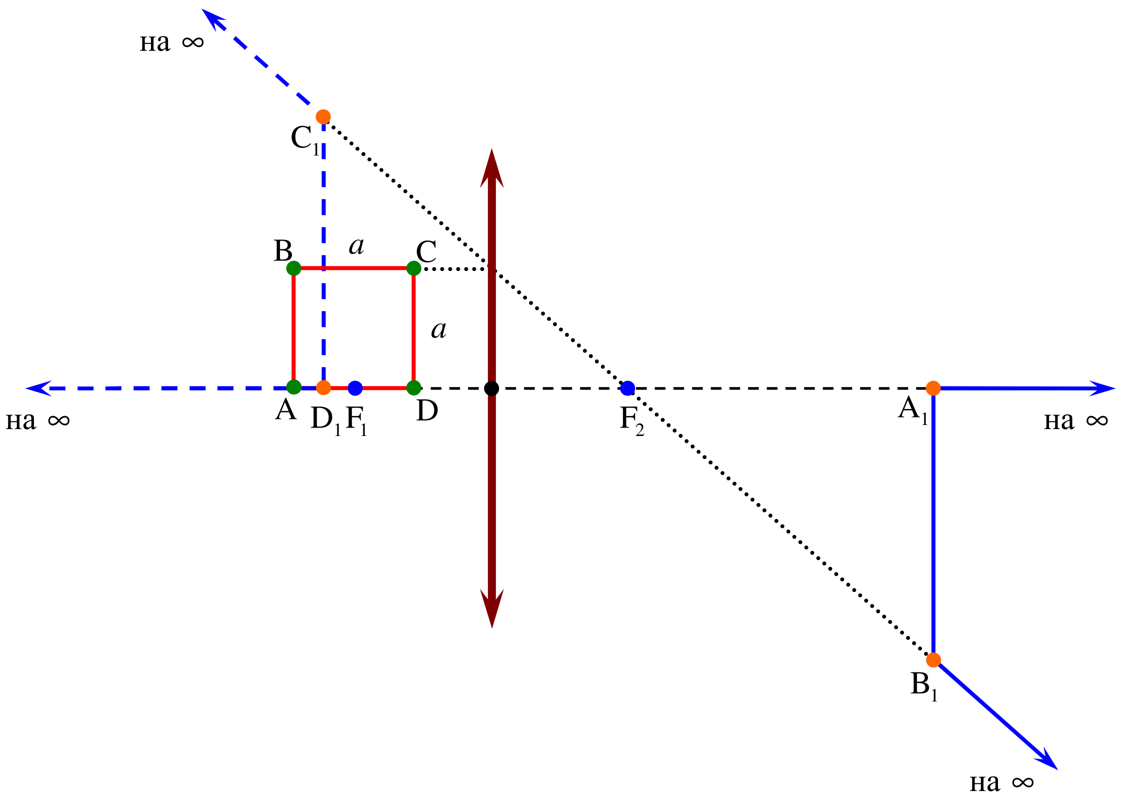
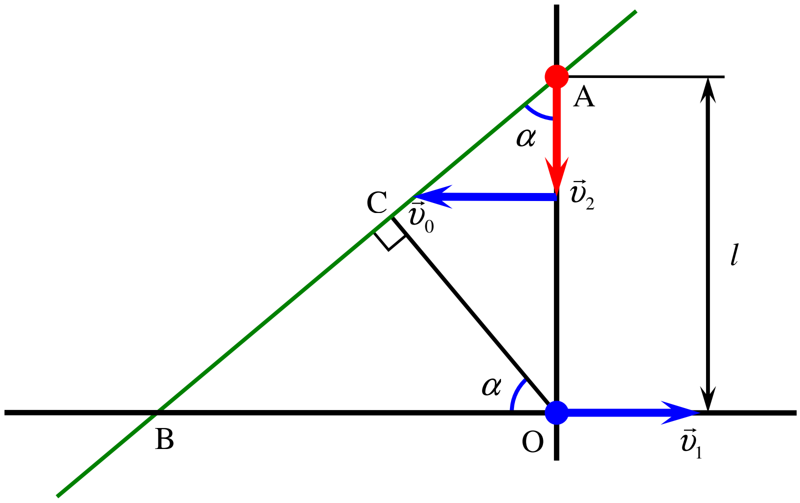


рис.4

Задача № 4

Условие: Две дороги пересекаются под прямым углом. Два автомобиля движутся по этим дорогам к перекрёстку со скоростями υ_1 и υ_2. Когда первый автомобиль проезжал перекрёсток, второй находился на расстоянии l от него. Найти минимальное расстояние между автомобилями в процессе движения.



Решение: Перейдем в систему отсчета (далее СО), связанную с первым автомобилем. По закону сложения скоростей, в этой СО скорость второго автомобиля состоит из двух перпендикулярных компонент: его скорости $\vec{\upsilon}_2$ относительно Земли и скорости $\vec{\upsilon}_0$ Земли в выбранной СО, которая равна по модулю скорости $\vec{\upsilon}_1$, но противоположна ей по направлению, т.е. $\vec{\upsilon}_0 = -\vec{\upsilon}_1$. Тогда траектория второго автомобиля в выбранной СО имеет вид прямой AB, причем $\operatorname{tg}\alpha = \dfrac{\upsilon_1}{\upsilon_2}$ (см. рисунок). Расстояние между автомобилями минимально, когда 2-й автомобиль находится в основании перпендикуляра OC к прямой AB, и оно равно длине отрезка OC. Из прямоугольного Δ AOC находим, что $\mathrm{OC} = \mathrm{OA}\cdot\sin\alpha$. Поскольку $\dfrac{1}{\sin^2\alpha} = 1 + \dfrac{1}{\operatorname{tg}^2\alpha}$, то $\sin\alpha = \dfrac{1}{\sqrt{1+\dfrac{1}{\operatorname{tg}^2\alpha}}} = \dfrac{1}{\sqrt{1+\dfrac{\upsilon_2^2}{\upsilon_1^2}}} = \dfrac{\upsilon_1}{\sqrt{\upsilon_1^2+\upsilon_2^2}}$. Так как $\mathrm{OA} = l$ по условию, то искомое минимальное расстояние $s_{\min} = \mathrm{OC} = l\dfrac{\upsilon_1}{\sqrt{\upsilon_1^2+\upsilon_2^2}}$.

Ответ: $s_{\min} = l\dfrac{\upsilon_1}{\sqrt{\upsilon_1^2+\upsilon_2^2}}$.

Задача № 5

<u>Условие</u>: Изучите удельную теплоту сгорания сосны, дуба, акации. Изменится ли результат Ваших исследований при изменении степени измельчения изучаемого объекта? (Например, от щепы отдирать белее мелкие щепы, а от них еще раз отщеплять). Объясните полученные результаты.

<u>Цель эксперимента</u>: определить удельную теплоту сгорания различных видов дерева.

<u>Оборудование</u>: клей пластиковый, клеевой пистолет, пенопласт, теплоизоляционное покрытие, лампы накаливания, плафон для ламп, батарейка “Крона” 9 В, источник переменного напряжения 8 В, соединительные провода, палочки деревянные (осина, акация, дуб, сосна), скотч, весы электронные, спички, свеча парафиновая, паяльник, олово и канифоль для паяния, пила, кулер (вентилятор) от блока питания компьютера, мультиметр, термометр (см. рис. 4 в конце задачи).

<u>Теоретические сведения</u>: Удельная теплота сгорания q различных видов топлива – это физическая величина, равная отношению теплоты Q, которая выделилась при полном сгорании топлива (теплоты сгорания), к его массе m: $q = \dfrac{Q}{m}$. Также существуют удельная мольная q_{m} и объемная q_{V} теплоты сгорания. Удельная мольная теплота сгорания равна отношению теплоты сгорания топлива к его количеству вещества n: $q_{\mathrm{m}} = \dfrac{Q}{n}$; удельная объемная теплота сгорания равна отношению теплоты сгорания топлива к его объему V: $q_{\mathrm{V}} = \dfrac{Q}{V}$.

Пусть за малое время dt сгорело дерево массой dm. Тогда выделилась теплота $dQ = q \cdot dm$ (скорость сгорания дерева $v = \dfrac{dm}{dt}$ считаем постоянной). При этом часть тепла ушла на нагревание калориметра, а другая часть выделилась в окружающую среду. Теоретически предполагаемая зависимость мощности потерь тепла $\dfrac{dQ_1}{dt}$ от температуры T в калориметре имеет вид $\dfrac{dQ_1}{dt} = \alpha(T - T_0)$, где α – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура внешней среды (она же начальная температура в калориметре). Тогда на нагревание калориметра пошла теплота $dQ_2 = q \cdot dm - \alpha(T - T_0)\,dt$, и калориметр нагрелся на величину $dT = \dfrac{dQ_2}{C} = \dfrac{q \cdot dm - \alpha(T - T_0)\,dt}{C}$, где C – теплоемкость системы. Окончательно уравнение теплового баланса в дифференциальной форме принимает вид

$$q \cdot dm = C \cdot dT + \alpha(T - T_0)\,dt\,,$$

решение которого с учетом начального условия $T(0) = T_0$ имеет вид

$$T = T_0 + \frac{qv}{\alpha}\left(1 - \exp\left[-\frac{\alpha t}{C}\right]\right).$$

Пусть горение длилось в течение времени $t_{\max}$, а затем скачкообразно прекратилось. Тогда максимальная температура в калориметре $T_{\max} = T_0 + \dfrac{qv}{\alpha}\left(1 - \exp\left[-\dfrac{\alpha t_{\max}}{C}\right]\right)$.

После прекращения горения уравнение теплового баланса имеет вид

$$C \cdot dT + \alpha(T - T_0)\,dt = 0,$$

решение которого с учетом начального условия $T(t_{\max}) = T_{\max} = T_0 + \frac{qv}{\alpha}\left(1 - \exp\left[-\frac{\alpha t_{\max}}{C}\right]\right)$:

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0)\exp\left[-\frac{\alpha(t - t_{\max})}{C}\right] = T_0 + \frac{qv}{\alpha}\exp\left[-\frac{\alpha(t - t_{\max})}{C}\right]\left(1 - \exp\left[-\frac{\alpha t_{\max}}{C}\right]\right).$$

Характерный вид зависимости $T(t)$ приведен на рис.1 (на графике положено $q = 2 \cdot 10^7$ Дж/кг; $v = 3 \cdot 10^{-6}$ кг/с; $\alpha = 3$ Вт/К; $C = 10^3$ Дж/К; $T_0 = 30$ °С; $t_{\max}$ = 100 с). Если пренебрегать потерями тепла, т.е. считать $\alpha = 0$, то тогда $T_{\max} = T_0 + \frac{qvt_{\max}}{C}$; т.к. предел выражения $\frac{qv}{\alpha}\left(1 - \exp\left[-\frac{\alpha t_{\max}}{C}\right]\right)$ при $\alpha \to 0$ равен $\frac{qvt_{\max}}{C}$. При этом если обозначить массу сгоревшего топлива $\Delta m = vt_{\max}$, а максимальный перепад температур $\Delta T = T_{\max} - T_0$; то уравнение принимает вид $\Delta T = \frac{q\Delta m}{C}$, откуда $q = \frac{C\Delta T}{\Delta m}$. Это приближение оправдано тем, что за время сгорания топлива потери тепла будут невелики (на графике зависимость $T(t)$ во время горения топлива не сильно отличается от линейной).

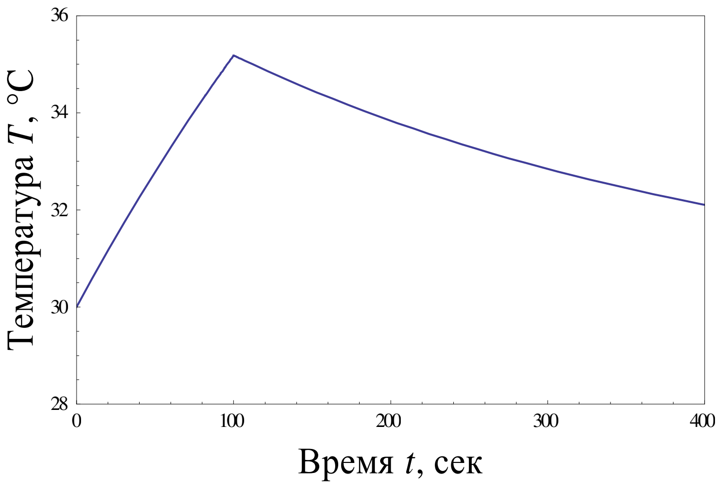


рис. 1

При увеличении степени измельчения топлива оно начнет прогорать глубже, что, вероятно, приведет к увеличению выделяемой теплоты. Количественно зависимость теплоты сгорания от размера частиц топлива получить слишком сложно.

<u>Постановка эксперимента</u>: Чтобы определить количество теплоты, которая выделяется при сгорании топлива, необходимо изолировать процесс горения от окружающей среды. С этой целью из пенопласта была сделана теплоизолированная коробка, в которой производили сжигание дерева. Для дополнительной изоляции стенки коробки были сделаны двойными, а также были обклеены теплоизоляционным покрытием. Дерево в виде палочки поджигали дистанционно при помощи лампочки и спички. В коробку вставляли плафон (держатель) для лампочки, затем жестко приклеивали его к дну коробки. Стекло лампочки разбивали, предварительно обклеив скотчем, чтобы собрать осколки; затем разбитую лампочку вкручивали в плафон. К палочке скотчем прикрепляли спичку и полученную конструкцию вставляли и укрепляли в коробке так, чтобы головка спички касалась нити накаливания лампочки. Теперь, при пропускании через

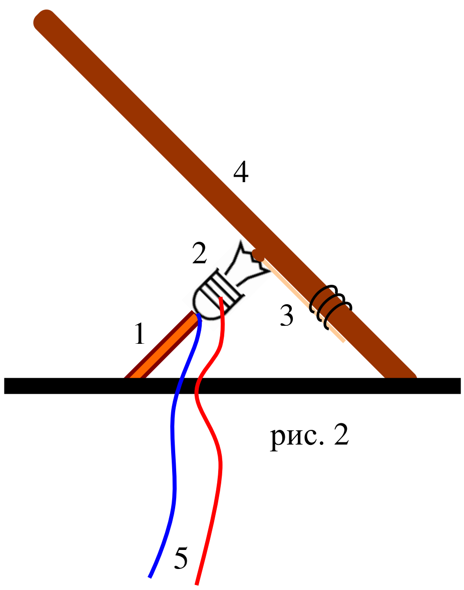


рис. 2

лампочку тока, она на секунду загоралась, а затем перегорала. Тепла, выделенного лампочкой, было достаточно, чтобы зажечь спичку, а далее огонь распространялся по всей палочке. При эксперименте палочка сгорала не вся, поэтому при помощи весов определялся ее вес до сжигания m_0 и после сжигания m (пепел удаляли с палочки до второго измерения). Тогда полностью сгорело дерево массой $\Delta m = m_0 - m$. На рис. 2 схематически изображена моя установка (1 – крепление лампочки; 2 – лампочка с открытой нитью накаливания; 3 – спичка; 4 – палочка; 5 – провода к лампочке), на рис. 3 приведена фотография этой установки. Температуру T в коробке определяли при помощи термометра. В крышке коробки было проделано отверстие, в которое опустили "носик" термометра, а затем загерметизировали клеем. Это было сделано, чтобы можно было наблюдать извне за изменением температуры в коробке с течением времени. Чтобы температура воздуха в коробке была всюду одинаковой, в коробку на подставке был внесен кулер, осуществляющий конвекцию воздуха. К выводам от кулера и лампочки были припаяны дополнительные провода, а затем концы этих проводов были вынесены из коробки через специальные отверстия в стенке, которые затем загерметизировали клеем. Перед началом эксперимента контур соединения крышки и стенок коробки заклеивали скотчем, что не давало возможности обмена воздухом между содержимым коробки и атмосферой. После эксперимента определяли разницу температур ΔT по формуле $\Delta T = T_{\max} - T_0$; где T_0 – температура до поджига, $T_{\max}$ – максимальная наблюдаемая температура. Удельную теплоту сгорания определяли по формуле $q = \dfrac{C\Delta T}{\Delta m}$.

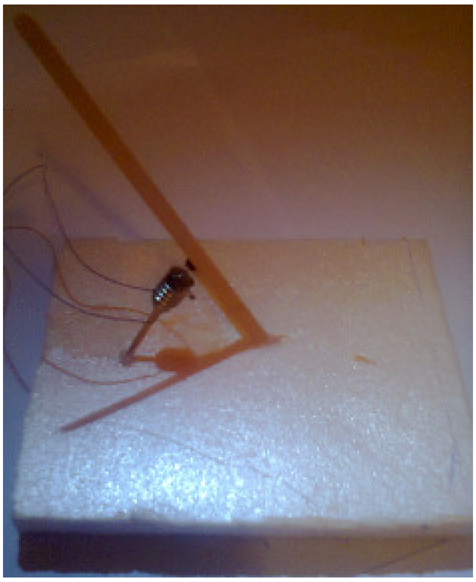


рис. 3

Теплоемкость коробки определяли при помощи парафиновой свечи, удельная теплота сгорания $q_{\text{пар}}$ которой известна. Свечу поджигали, ставили в коробку и быстро ее закрывали. За время эксперимента свеча сгорала не вся, ее горение было ограничено количеством кислорода в коробке, иначе выделилось бы слишком много энергии. Была замерена масса свечи до эксперимента M_0 и после M. Теплоемкость определяли по формуле $C = \dfrac{q_{\text{пар}}(M_0 - M)}{\Delta T_1}$, где ΔT_1 – разница между максимальной и начальной температурами воздуха в коробке.

К сожалению, при такой постановке эксперимента невозможно было проверить зависимость удельной теплоты сгорания от степени измельчения, т.к. тогда дерево сгорало бы незначительно и относительная погрешность в измерении перепада температур была бы слишком велика (если укрепить много тонких длинных палочек, то тогда они перегорят посередине и их верхние концы упадут под действием силы тяжести; если укрепить толстые короткие палочки, то спичка их вообще не подожжет; использовать же "горошинки" не позволяют сложности в их укреплении). Размеры палочек были подобраны оптимально, чтобы они сгорали как можно полнее.

<u>Результаты эксперимента</u>: При сгорании свечи были получены следующие данные:

Начальная масса $M_0 = 8{,}7 \pm 0{,}01$ г; конечная масса $M = 8{,}05 \pm 0{,}01$ г.

Время t, сек	Температура T, °C	Время t, сек	Температура T, °C	Время t, сек	Температура T, °C
0	$29{,}5 \pm 0{,}5$	140 ± 1	$38{,}0 \pm 0{,}5$	400 ± 1	$48{,}0 \pm 0{,}5$
15 ± 1	$30{,}0 \pm 0{,}5$	150 ± 1	$39{,}0 \pm 0{,}5$	450 ± 1	$49{,}0 \pm 0{,}5$
40 ± 1	$31{,}0 \pm 0{,}5$	175 ± 1	$40{,}0 \pm 0{,}5$	520 ± 1	$50{,}0 \pm 0{,}5$
70 ± 1	$33{,}0 \pm 0{,}5$	190 ± 1	$41{,}0 \pm 0{,}5$	770 ± 1	$51{,}0 \pm 0{,}5$
85 ± 1	$34{,}0 \pm 0{,}5$	210 ± 1	$42{,}0 \pm 0{,}5$	830 ± 1	$50{,}0 \pm 0{,}5$
100 ± 1	$35{,}0 \pm 0{,}5$	230 ± 1	$43{,}0 \pm 0{,}5$	880 ± 1	$49{,}0 \pm 0{,}5$
115 ± 1	$36{,}0 \pm 0{,}5$	250 ± 1	$44{,}0 \pm 0{,}5$	940 ± 1	$48{,}0 \pm 0{,}5$
130 ± 1	$37{,}0 \pm 0{,}5$	320 ± 1	$47{,}0 \pm 0{,}5$	1000 ± 1	$47{,}0 \pm 0{,}5$

В таблице приведены данные показаний термометра T от времени t. Тогда $\Delta M = M_0 - M$ = 0,65 ± 0,01 г, и ΔT = 21,5 ± 0,7 °C. Погрешность при измерении массы соответствует классу точности весов и равна 10 мг, тогда погрешность при измерении ΔM равна корню из суммы квадратов погрешностей M_0 и M, т.е. 14 мг, аналогично для погрешности температуры. Погрешность при измерении времени оценивается в 1 секунду, так как приблизительно столько занимает время снятия человеком показаний с термометра. Погрешность в измерении температуры равна половине цены деления термометра. Удельную теплоту горения парафина $q_{\text{пар}} = 4{,}15 \cdot 10^7$ Дж/кг считаем определенной абсолютно точно (данные взяты из сайта ChemicalBook). Исходя из этих данных, получаем C = 1,25 кДж/°C. Погрешность δC оценена по формуле $\delta C = C\sqrt{\left(\frac{\delta \Delta M}{\Delta M}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2} = 0{,}05$ кДж/°C (здесь и далее знак δ перед величиной означает использование вместо величины ее погрешность).

При измерении удельной теплоты сгорания различных сортов дерева были получены следующие результаты:

1) Осина

Начальная масса m_0 = 0,45 ± 0,01 г; конечная масса m = 0,21 ± 0,01 г.

Время t, сек	Температура T, °C	Время t, сек	Температура T, °C
0	$30{,}0 \pm 0{,}5$	90 ± 1	$35{,}0 \pm 0{,}5$
15 ± 1	$31{,}0 \pm 0{,}5$	210 ± 1	$34{,}5 \pm 0{,}5$
25 ± 1	$32{,}0 \pm 0{,}5$	300 ± 1	$34{,}0 \pm 0{,}5$
40 ± 1	$34{,}0 \pm 0{,}5$	500 ± 1	$33{,}0 \pm 0{,}5$
60 ± 1	$34{,}5 \pm 0{,}5$	820 ± 1	$32{,}0 \pm 0{,}5$

Тогда Δm = 0,24 ± 0,01 г, ΔT = 35,0 – 30,0 = 5,0 ± 0,7 °C.

Отсюда получаем $q_1 = \dfrac{1{,}25 \cdot 10^3 \cdot 5{,}0}{0{,}24 \cdot 10^{-3}}$ = 26 МДж/кг, δq_1 = 4 МДж/кг.

На рис. 4.1 изображен график зависимости температуры в коробке от времени.

2) Дуб

Начальная масса m_0 = 0,57 ± 0,01 г; конечная масса m = 0,28 ± 0,01 г.

Время t, сек	Температура T, °C	Время t, сек	Температура T, °C
0	$31{,}0 \pm 0{,}5$	85 ± 1	$36{,}0 \pm 0{,}5$
25 ± 1	$32{,}0 \pm 0{,}5$	120 ± 1	$36{,}5 \pm 0{,}5$
40 ± 1	$34{,}0 \pm 0{,}5$	180 ± 1	$35{,}5 \pm 0{,}5$
55 ± 1	$35{,}0 \pm 0{,}5$	320 ± 1	$35{,}0 \pm 0{,}5$

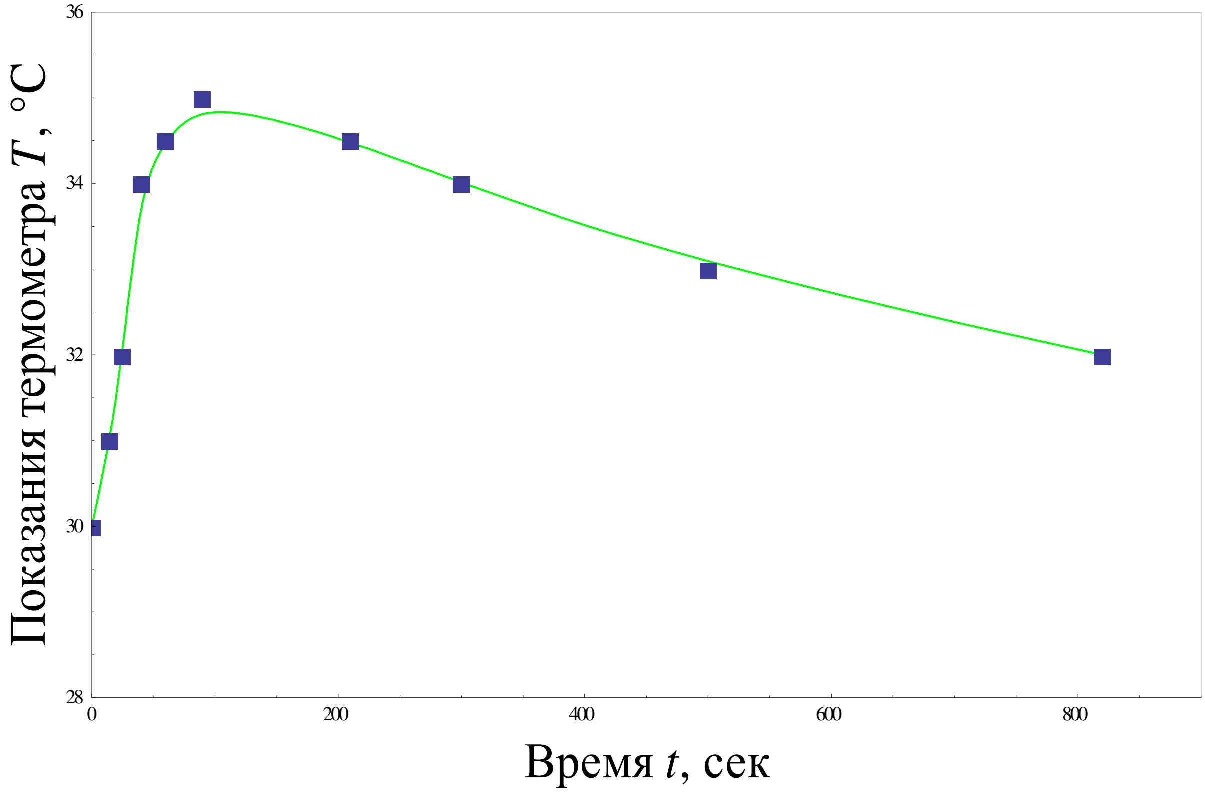


рис. 4.1

Тогда $\Delta m = 0{,}29 \pm 0{,}01$ г, $\Delta T = 6{,}0 \pm 0{,}7$ °C.
Отсюда получаем $q_2 = 24$ МДж/кг, $\delta q_2 = 3$ МДж/кг.

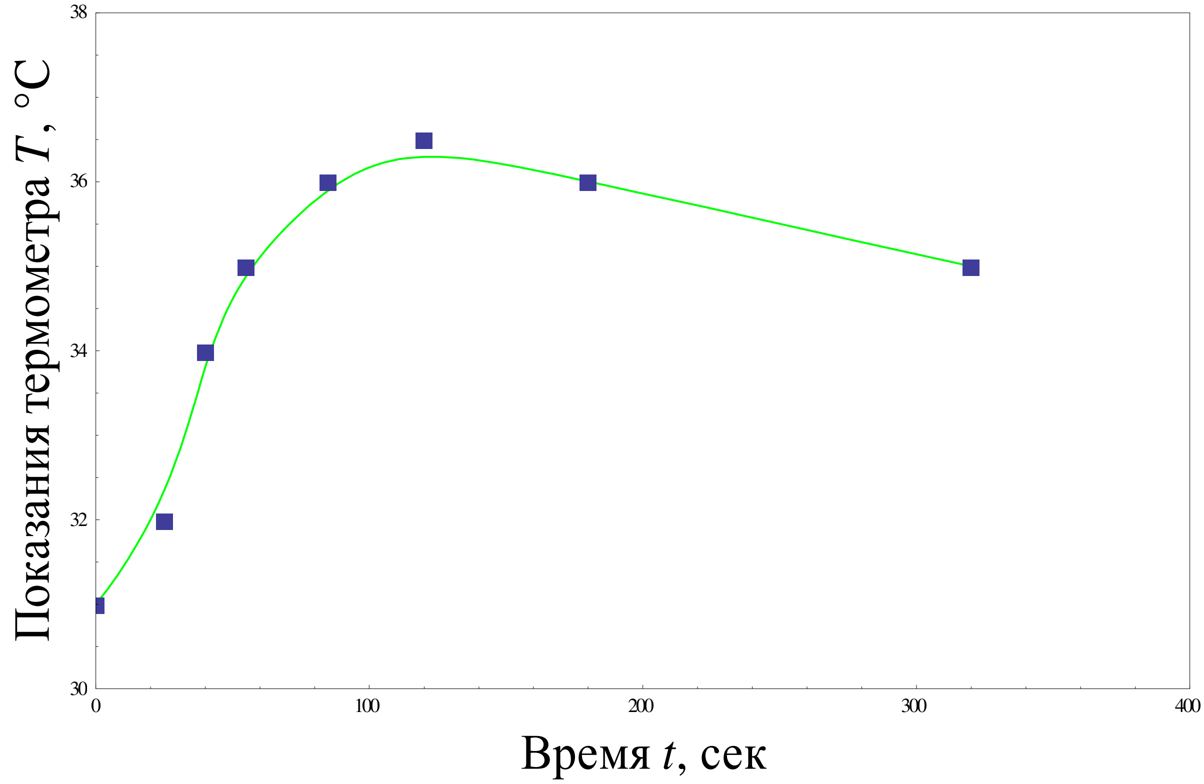


рис. 4.2

На рис. 4.2 изображен график зависимости температуры в коробке от времени.

3) Акация

Начальная масса $m_0 = 0,75 \pm 0,01$ г; конечная масса $m = 0,42 \pm 0,01$ г.

Время t, сек	Температура T, °C	Время t, сек	Температура T, °C
0	29 ± 0.5	110 ± 1	$34,5 \pm 0.5$
15 ± 1	30 ± 0.5	150 ± 1	35 ± 0.5
30 ± 1	31 ± 0.5	220 ± 1	34 ± 0.5
40 ± 1	32 ± 0.5	300 ± 1	33 ± 0.5
50 ± 1	33 ± 0.5	390 ± 1	32 ± 0.5

Тогда $\Delta m = 0,33 \pm 0,01$ г, $\Delta T = 6,0 \pm 0,7$ °C.

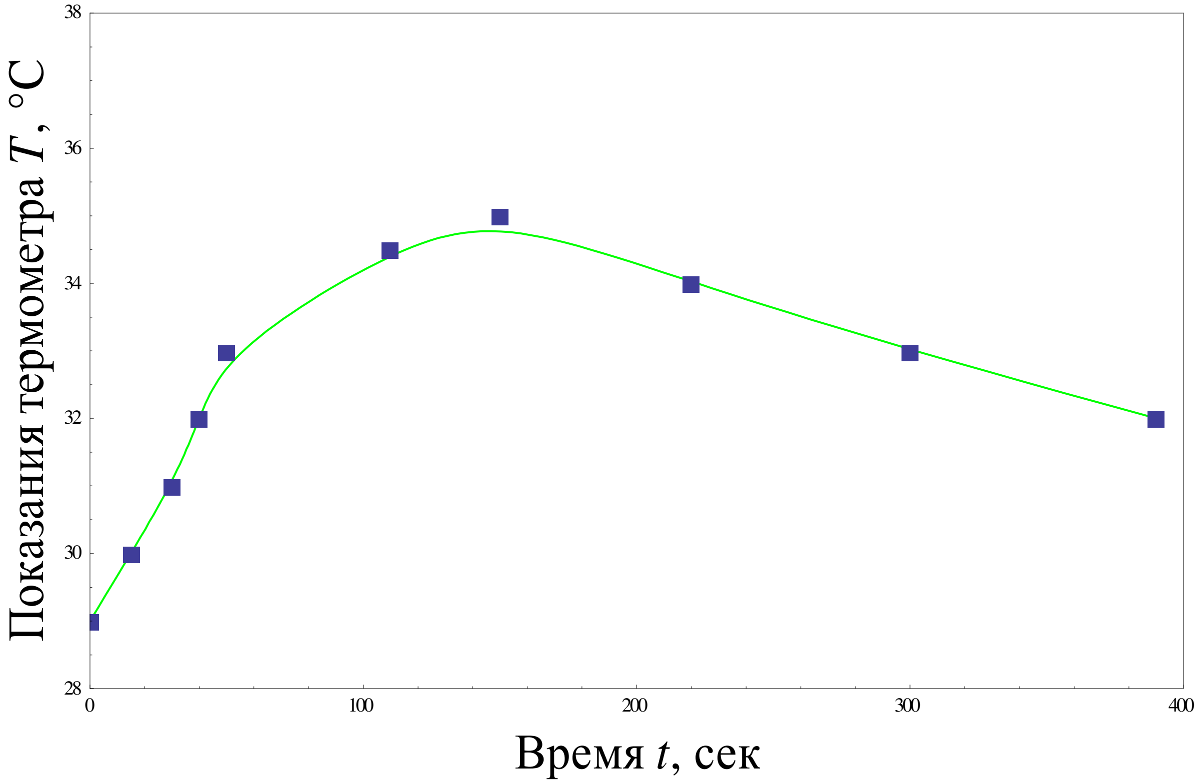


рис. 4.3

Отсюда получаем $q_2 = 23$ МДж/кг, $\delta q_2 = 3$ МДж/кг.
На рис. 4.3 изображен график зависимости температуры в коробке от времени.

4) Сосна
Начальная масса $m_0 = 0,53 \pm 0,01$ г; конечная масса $m = 0,27 \pm 0,01$ г.

Время t, сек	Температура T, °C	Время t, сек	Температура T, °C
0	28 ± 0.5	75 ± 1	34 ± 0.5
30 ± 1	30 ± 0.5	140 ± 1	34 ± 0.5
35 ± 1	31 ± 0.5	220 ± 1	$33,5 \pm 0.5$
40 ± 1	32 ± 0.5	300 ± 1	33 ± 0.5
50 ± 1	33 ± 0.5	470 ± 1	32 ± 0.5

Тогда $\Delta m = 0,27 \pm 0,01$ г, $\Delta T = 6,0 \pm 0,7$ °C.
Отсюда получаем $q_2 = 28$ МДж/кг, $\delta q_2 = 4$ МДж/кг.

На рис. 4.4 изображен график зависимости температуры в коробке от времени.

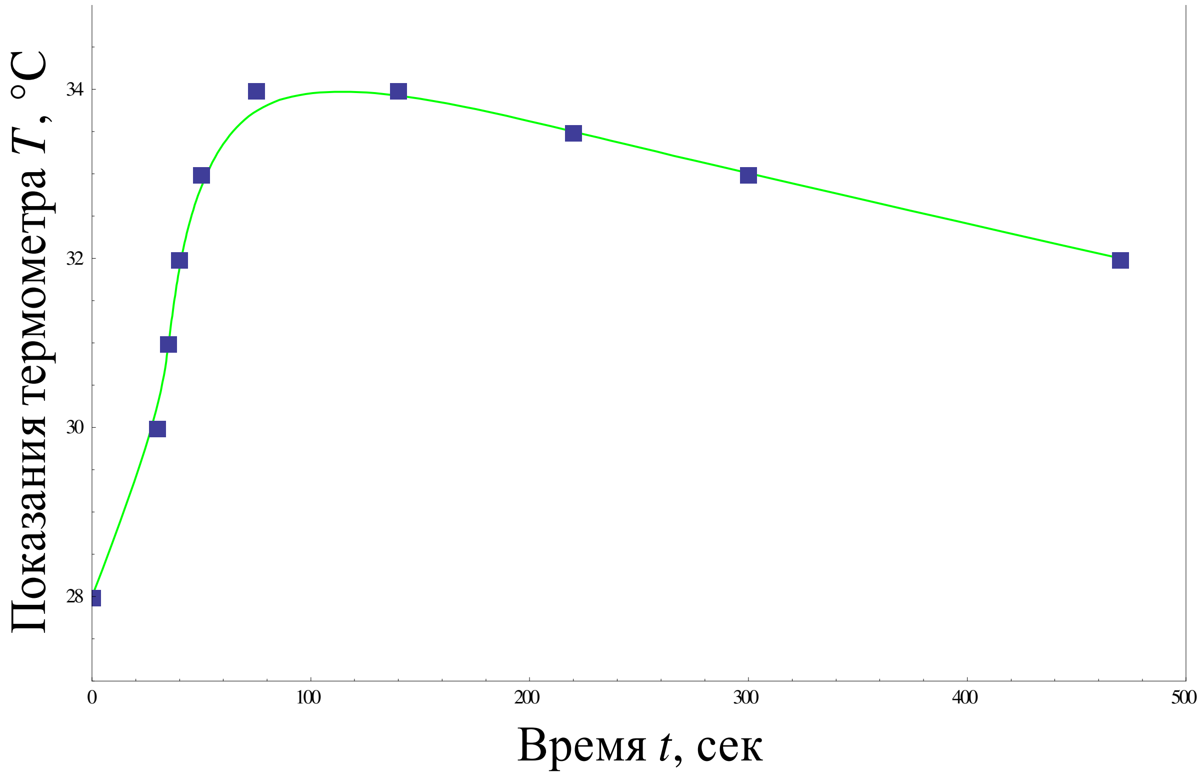


рис. 4.4

Погрешность удельной теплоты сгорания оценена по формуле $\delta q = q\sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta m}{\Delta m}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2}$.

Экспериментальные графики зависимостей температуры от времени похожи на график, предсказываемый теоретически (см. рис. 1). Неровности на этих графиках вызваны неравномерностью сгорания дерева: вначале палочка загорается, затем горит более или менее равномерно, затем медленно гаснет. Кроме того, нет излома в момент, когда дерево гаснет, так как оно гаснет не скачком, а плавно.

Выводы: Приблизительно оценена удельная теплота сгорания различных сортов дерева. Результаты для разных деревьев близки друг к другу: осины 26 ± 4 МДж/кг;
дуба 24 ± 3 МДж/кг; акации 23 ± 3 МДж/кг; сосны 28 ± 4 МДж/кг. Основные источники погрешностей связаны с тем, что коробка как калориметр не может полностью изолировать содержимое от атмосферы, потери тепла значительны (см. графики). Кроме того, горение идет не с постоянной интенсивностью, а также были другие источники тепла: лампочка, спичка и кулер. Теплом, выделенным этими источниками, пренебрегли.

рис. 5

На рис. 5 изображено оборудование для эксперимента: 1 – скотч; 2 – термометр, вставленный в крышку коробки; 3 – соединительные провода; 4 – кулер; 5 – спички; 6 – весы электронные; 7 – пила; 8 – мультиметр; 9 – сжигаемые палочки; 10 – источник напряжения; 11 – батарейка “Крона”; 12 – свеча; 13 – лампочка; 14 – плафон для лампочки; 15 – клеевой пистолет с клеем; 16 – теплоизоляционное покрытие; 17 – олово; 18 – канифоль; 19 – паяльник.

На рис. 6 изображен вид сверху на коробку.

рис. 6