



В. Мильман

## Почему сгоревшая спичка изогнута?

Известно, что играть со спичками опасно, — это может привести к пожару. Но давайте все-таки, соблюдая самые тщательные меры предосторожности, проведем серию простых опытов с горящими спичками. Мы предлагаем вам понаблюдать, как меняется форма спички при горении.

Прежде чем приступить к опытам, обеспечим их полную безопасность. Спички нужно будет держать пинцетом над тазом с водой, который должен стоять на металлическом листе. Выполнив соответствующие приготовления, приступим к опытам.

**Опыт 1.** Держим зажженную спичку горизонтально. Пламя передвигается по спичке, и по мере его перемещения сгоревшая часть спички поднимается. У разных спичек высота этого подъема различна. Некоторые спички при этом закручиваются (рис. 1). Важно отметить, что «загибается» уже остывший (обгоревший) участок спички.

**Опыт 2.** Зажженную спичку держим в пламени плиты. Обгоревшая спичка почти не загибается.

**Опыт 3.** Посмотрим, как горят разные по толщине спички. Утолщенные спички загибаются больше обычных, а лучинки, отколотые от спички, — меньше.

Посмотрим еще раз внимательно на горящую спичку, расположенную горизонтально. Пламя медленно продвигается вдоль спички; при этом древесина, находящаяся в пламени, еще ровная (не загибается). Цвет этой

части спички — черный. Значит, температура этого участка сравнительно невелика — не выше  $500 \div 600^\circ\text{C}$ . Сразу за пламенем движется узкий ( $\approx 2$  мм) красный поясok. Это — зона с максимальной температурой ( $\sim 700 \div 750^\circ\text{C}$ ), в которой только что закончилось горение. Если посмотреть на этот поясok сбоку, «в профиль», то видно, что верхняя его часть раскалена докрасна, а нижняя — черного цвета. Значит, верхняя часть спички начинает остывать, имея более высокую температуру, и поэтому дольше сохраняет красный цвет. Причина такого неравномерного горения — конвекционные потоки воздуха.

Может быть, именно этим — разностью температур верхней и нижней частей спички — и объясняется тот факт, что горящая спичка загибается? Причем загибается так, что выпуклость всегда направлена в сторону более низкой (при горении) температуры. Это предположение подтверждается такими опытами: если осторожно (так, чтобы она не погасла) дуть сверху на горящую спичку, то после сгорания получается почти ровный уголек — мы сдуваем пламя вниз, температуры верхней и нижней частей выравниваются; если к горящей спичке прикоснуться снизу холодным металлическим предметом (например, гвоздем) и подержать его немного (так, чтобы спичка не погасла), то спичка будет загибаться сильнее, чем при обычном горении.

Итак, качественно наше предположение о причинах, вызывающих

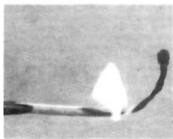


Рис. 1.

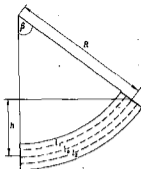


Рис. 2.

загибание спички, как будто оправдывается. Попробуем произвести количественную оценку. Для этого воспользуемся следующей моделью.

Условно разделим спичку горизонтальной плоскостью на две части. Во время горения температура верхней части выше, чем нижней, но их длины одинаковы. При остывании верхняя, более нагретая часть сжимается (укорачивается) сильнее, чем нижняя, так как разность температур этой части спички и окружающего воздуха больше. Поэтому длина верхней части остывшей спички будет меньше, чем длина нижней ее части, и спичка изогнется выпуклостью вниз (в сторону более холодной при горении части). Такая модель напоминает биметаллическую пластинку — пластинку из двух сваренных металлов с разными коэффициентами теплового расширения. Основываясь на этой модели, оценим разность температур верхней и нижней частей спички в области красного пояска.

Пусть  $l_0$  — длина спички,  $d$  — ее толщина. Для приближенной оценки можно считать, что в результате горения эти размеры почти не меняются. Однако длины верхней и нижней частей сгоревшей изогнутой спички не одинаковы. Разность длин средних сечений этих частей равна

$$l_2 - l_1 = l_0 \alpha \Delta t, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплового расширения древесины,  $\Delta t$  — разность максимальных температур верхней и нижней частей спички;

$$l_1 = \beta \left( R - \frac{d}{4} \right), \quad l_2 = \beta \left( R + \frac{d}{4} \right),$$

$$l_2 - l_1 = \frac{\beta d}{2} = \frac{l_0}{R} \frac{d}{2} \quad (2)$$

(см. рис. 2). Сравнивая (1) и (2), получаем выражение для  $R$ :

$$R = \frac{d}{2\alpha \Delta t}. \quad (3)$$

Измерить величину  $R$  нелегко, но через  $R$  можно выразить легко измеримую величину  $h$  (см. рис. 2):

$$h = R(1 - \cos \beta) = R \left( 1 - \cos \frac{l_0}{R} \right).$$

Для нашей оценки с достаточно хорошим приближением можно считать, что  $1 - \cos \beta = \frac{\beta^2}{2}$ , и  $h = \frac{l_0^2}{2R}$ .

Подставив в это выражение значение  $R$  (см. (3)), получим

$$h = \frac{l_0^2 \alpha \Delta t}{d}.$$

Отсюда находим  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{h}{l_0^2} \frac{d}{\alpha}. \quad (4)$$

Итак, чтобы оценить величину  $\Delta t$ , нам нужно экспериментально найти отношение  $h/l_0^2$ . Результаты измерений показывают, что с достаточно хорошим приближением можно считать

$$h/l_0^2 = \text{const} \approx 10^{-2}.$$

Принимая  $d = 1$  мм,  $\alpha = (5 \div 10) \cdot 10^{-5}$  град $^{-1}$ , по формуле (4) находим  $\Delta t = (100 \div 200)$  (град).

Измерения  $\Delta t$ , сделанные с помощью термометра, дали значения  $t_{\text{верхн}} = (730 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{нижн}} = (650 \pm 10)^\circ\text{C}$  и  $\Delta t = (80 \pm 20)^\circ\text{C}$ . Как видно, сделанная нами теоретическая оценка неплохо согласуется с этими данными. Так что можно считать, что рассмотренная модель, которая никоим образом не учитывает химической природы процесса горения, верна.

Возможно, наблюдая за горящей спичкой, вы предложите какое-нибудь другое объяснение причин ее загибания. Тогда постарайтесь обосновать и проверить свои предположения. И проводя свои эксперименты, помните: НЕОБХОДИМО СОБЛЮДАТЬ ОСТОРОЖНОСТЬ!

\* Погрешность формулы не превышает 1% при  $\beta < 38^\circ$  и 10% — при  $\beta < 60^\circ$ .