

Соль, огонь и вода

А. СТАСЕНКО

Математика – это вам не физика, где можно химичить.

Однажды на лекции в МФТИ

ВСПОМИНАЕТСЯ ОДИН ИЗВЕСТНЫЙ ФИЗИК, КОТОРЫЙ в молодости был шалуном: «Вуд знал, что натрий, мягкий серебристый металл, если его бросить в воду, внезапно загорается со взрывом и горит ослепительным желтым пламенем, извергая снопы искр и облака белого дыма... он положил в карман, в маленькой жестяной коробочке, шарик из натрия, величиной с грецкий орех ...громко закашлялся и, на виду у всех плюнув в лужу, незаметно бросил шарик в том же направлении. Раздался страшный удар, полетели искры, и большое желтое пламя поднялось на поверхности воды. За ними разверзся ад – вопли, молитвы, перевернутые стулья и один голос...: «Спасайся кто может, негры! Этот человек плюнул огнем!.. только сам Старый Сатана умеет это делать!» (из книги В.Сибрука «Роберт Вуд»).

Однако, и мы кое-что умеем. По крайней мере, постараемся понять происходящее.

Натрий ${}_{11}^{23}\text{Na}$ относится к интересной группе металлов, называемых щелочными. Мы ежедневно употребляем его в пищу – конечно, не в виде металла (ни-ни!), а в соединении с хлором. Это всем известная и вкусная поваренная соль NaCl . В человеческом сознании она почему-то таинственно связана с огнем; в некоторых языках слова «соль» и «солнце» звучат одинаково. В Писании хорошие люди называются «солью земли» и есть удивительное словосочетание – «осолиться огнем».

Чем же интересны щелочные металлы? А тем, что их внешний электрон, называемый валентным, очень слабо связан с остальной структурой атома, так что атом натрия можно назвать водородоподобным – у атома водорода один протон и один электрон.

Но ведь молекула воды тоже состоит из протона H^+ и гидроксид-иона OH^- (поэтому порой трудно решить – щелочь она или кислота). Значит, все, что происходит при соприкос-

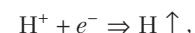
новении натрия с водой, можно представить в виде такого процесса:



Тут слева представлены нейтральный атом натрия, содержащий электрон e^- , слабо связанный с положительным ионом Na^+ , и диссоциированная молекула воды – положительно заряженное ядро атома водорода (протон) H^+ и гидроксил OH^- . Заметим, что свободных протонов в жидкой воде нет – они «прилипают» к нейтральной молекуле, образуя ион гидрония: $\text{H}_3\text{O}^+ \equiv \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$, так что можно в обеих частях приведенной выше реакции написать по одной нейтральной молекуле воды. Но это для нас несущественно, а существенно то, что протон тоже слабо связан с молекулой воды и его можно считать почти свободным.

Да уж не химия ли это? – спросит вдумчивый читатель.

А что же такое химия, как не физический процесс обмена веществ электронными оболочками! (Не случайно существуют такие интересные науки, как физическая химия и химическая физика.) Вот справа и изображен результат перестройки электронных оболочек: «почти свободный» электрон атома натрия объединяется с «почти свободным» протоном гидрония, образуя нейтральный атом водорода ${}^1_1\text{H}$ (горючий газ!):



а в воде остается диссоциированная щелочь NaOH .

Так что же происходит с шариком натрия на поверхности воды? Плотность натрия $0,97 \text{ г/см}^3$ меньше плотности воды 1 г/см^3 , и уже поэтому шарик не тонет, а тут еще взрывное тепловыделение при соприкосновении с поверхностью, которое заставляет шарик натрия хаотически метаться, удовлетворяя жажду его атома отдать свой валентный электрон протону воды. Если перейти к энергетическому описанию, то можно сказать, что все эти атомы, ионы, радикалы и электроны сваливаются в потенциальную яму, а разность начального и конечного уровней энергии выделяется в виде кинетической энергии теплового движения конечных продуктов реакции. И вот – освобожденная теплота реакции Q разогревает образовавшийся газ (водород), который вспыхивает в кислородосодержащей атмосфере, выделяя дополнительную теплоту сгорания.

Можно сделать численные оценки энергетических характеристик некоторых процессов – например, оценить, какая

энергия выделится при захвате электрона протоном, в результате чего образуется нейтральный атом водорода. Конечно, она в точности равна энергии, которую нужно затратить, чтобы «вытащить» электрон с самого нижнего уровня атома водорода «на бесконечность» – эту энергию называют энергией ионизации. Используем старую теорию Бора, согласно которой электрон движется по круговой «орбите» радиусом r со скоростью v . Тогда сумма кинетической и потенциальной энергий электрона равна

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

где m – масса электрона, e_0 – его заряд, ϵ_0 – электрическая постоянная. «Скорость электрона» определяется из второго закона Ньютона

$$ma = F, \text{ или } \frac{mv^2}{r} = \frac{e_0^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}.$$

Отсюда и из предыдущего соотношения, считая, что «на бесконечности» электрон покоится, т.е. и кинетическая, и потенциальная энергии равны нулю, получим искомую энергию ионизации (разность конечной и начальной энергий). Однако почему слова «орбита», «скорость электрона» взяты в кавычки? А дело в том, что современная квантовая механика описывает состояние электрона в атоме в других терминах. Но для наших оценок это несущественно.

Итак,

$$E_i = 0 - \left(-\frac{e_0^2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r} \right) = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 9 \cdot 10^9}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-10}} \text{ Дж} = \\ = 23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}$$

– знаменитая энергия ионизации атома водорода. Здесь использовано значение классического боровского радиуса $r = 0,5 \text{ \AA} = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Если отнести полученную энер-

гию к массе атома водорода $m_H = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$, то получим удельную теплоту рекомбинации – приблизительно 1400 МДж/кг. По сравнению с нею удельная теплота испарения воды (самый энергоемкий кухонный процесс) порядка 2,5 МДж/кг представляется малой величиной.

Тут следует сделать замечание. Может быть, не все знают, чему равен этот боровский радиус. Желающие найти его могут воспользоваться условием квантования Бора: на длине устойчивой круговой орбиты радиусом r_n должно укладываться целое число длин волн де Бройля $\lambda = \frac{h}{mv}$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ – постоянная Планка. Иными словами,

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv}, \quad n = 1, 2, \dots$$

Есть наглядная аналогия в макромире: когда проверяют целостность фарфоровой чашки, по ней слегка ударяют палочкой. Хорошая чашка издает долгоживущий мелодичный звук (как сказал бы китаец, звук «као»), а треснувшая чашка отзывается коротким тупым стуком (нарушено условие периодичности Бора!). Теперь у нас достаточно уравнений, чтобы определить все, что нужно, положив $n = 1$ («первый тон»).

В заключение вспомним событие, имевшее место почти три тысячи лет тому назад и очень напоминающее шутку Роберта Вуда: «И взял Илья двенадцать камней... И построил из сих камней жертвенник. И положил дрова... И сказал: наполните четыре ведра воды, и выливайте на всесожигаемую жертву и на дрова... И вода полилась вокруг жертвенника... подошел Илья пророк и сказал... Услышь меня, Господи!... И ниспал огонь Господа и пожрал всеожжение, и дрова, и камни, и прах, и поглотил воду...» (3-я книга Царств).