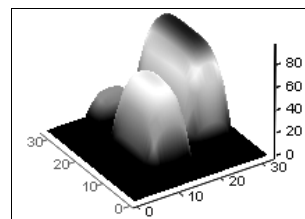


ЭТЮД 3



Концентрация растворов

При моделировании теплофизических свойств рабочих тел и теплоносителей в случае, если они представляют собой многокомпонентные смеси, приходится оперировать понятием *концентрации*¹. Так в работе [1] теплопроводность водного раствора NaCl ² описана как функция давления, температуры и молярности раствора (см. "живой" (интерактивный) сетевой расчет с использованием этой функции здесь — <http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/rbtp/tcon.sol.sod.hl.lf.xmcd>). В связи с этим, а также, конечно, и с тем, что понятие "концентрация" фигурирует и в химической термодинамике, представляется весьма полезным описать в данном этюде нюансы работы с концентрациями в среде Mathcad. Их мы рассмотрим на примере такой задачи. Смешали определенное количество водного раствора NaCl с определенным количеством такого же раствора, но другой концентрации. Известна *молярность* первого раствора и *молярность* второго. Определить параметры смеси. На рис. 3.1 показано решение этой задачи в среде Mathcad 15.

Молярность — это отношение количества³ растворенного вещества к *объему* раствора, а молярность — к *массе* растворителя. Молярность водного раствора может меняться при изменении температуры раствора, а молярность — нет. Для решения задачи, во-первых, нужно знать молярную массу растворенного вещества (NaCl) и, во-вторых, иметь зависимость плотности водного раствора NaCl от его концентрации.

Первое сделать несложно — достаточно заглянуть в периодическую таблицу Менделеева⁴ и просуммировать атомные веса натрия и хлора. Можно также зайти на

¹ Правильнее говорить не "концентрация растворов", "концентрация растворенного вещества".

² Водный раствор этой соли часто применяется как теплоноситель, вернее, хладагент в системах кондиционирования (см. этюд 17). Добавление в воду соли снижает температуру замерзания (см. рис. 3.6).

³ Тут обычно добавляют "выраженного в молях". Почему? Очень часто в литературе можно встретить примерно такое выражение: "Количество взятого вещества — 200 мг". Тут, конечно, нужно писать не "количество", а "масса", но часто эти понятия смешиваются не только на бытовом, но и на научном уровне, о чем мы уже упомянули в этюде 2. Поэтому приходится уточнять.

⁴ За пределами нашей страны тут пишут не "Менделеева", а "химических элементов". Мы (россияне) в связи с этим часто обижаемся — "не признают наш приоритет!". Но, с другой стороны, мы очень редко называем *hs*-диаграмму воды и водяного пара диаграммой Мольте, названной так в честь немец-

сайт, показанный на рис. 3.2, ввести название химического элемента или соединения, получить ответ и перенести его в расчет.

Зависимости плотности и концентрации водных растворов различных солей, кислот и оснований в справочной литературе по аналитической химии обычно даются в виде

Смешали 100 мл 0.2-моляльного и 1 л 2-молярного водного раствора хлористого натрия. Сколько и какой концентрации получилась смесь ?

Объем первого раствора $V_1 := 100$ мл Моляльность первого раствора $m_1 := 0.2 \frac{\text{моль}}{\text{кг}}$ Молярная масса NaCl

Объем второго раствора $V_2 := 1$ л Молярность второго раствора $M_2 := 2 \frac{\text{моль}}{\text{л}}$ $MM := 58.44 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$

Массовый процент первого раствора см. <http://twt.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Chem/CRC.xmcd> $\omega_1 := \frac{m_1 \cdot MM}{1 + m_1 \cdot MM} = 1.1553\%$

Ссылка на облачные функции Reference: <http://twt.mpei.ac.ru/tthb/H2O.xmcdz>

Плотность первого раствора $\rho_1 := \rho_{\text{NaCl}}(\omega_1) = 1.006 \frac{\text{г}}{\text{мл}}$ Масса первого раствора $mass_1 := V_1 \cdot \rho_1 = 100.618$ г

Молярность первого раствора $M_1 := \frac{\rho_1 \cdot \omega_1}{MM} = 0.199 \frac{\text{моль}}{\text{л}}$

Массовый процент второго раствора (рассчитывается методом последовательных приближений) $\omega_2 := \begin{cases} (\omega_2 \leftarrow 10\% \quad \omega_2 \leftarrow 20\%) \\ \text{while } |\omega_2 - \omega_2'| > 0.01\% \\ \omega_2' \leftarrow \omega_2 \\ \omega_2 \leftarrow \frac{MM \cdot M_2}{\rho_{\text{NaCl}}(\omega_2')} \end{cases} = 10.853\%$

Плотность второго раствора $\rho_2 := \rho_{\text{NaCl}}(\omega_2) = 1.077 \frac{\text{г}}{\text{мл}}$ Проверка $\frac{\rho_2 \cdot \omega_2}{MM} = 2 \frac{\text{моль}}{\text{л}}$

Молярность второго раствора $m_2 := \frac{\omega_2}{MM \cdot (1 - \omega_2)} = 2.083 \frac{\text{моль}}{\text{кг}}$ Масса второго раствора $mass_2 := V_2 \cdot \rho_2 = 1076.926$ г

$(mass \quad \omega) := \left(\begin{array}{l} mass_1 + mass_2 = mass \\ mass_1 \cdot \omega_1 + mass_2 \cdot \omega_2 = mass \cdot \omega \end{array} \right) \left| \begin{array}{l} \text{solve, } (mass) \\ \text{float, 7} \end{array} \right. \rightarrow (1.177545 \text{ kg} \quad 0.1002446)$

Ответ $mass = 1177.55$ г $\omega = 10.024\%$

Плотность смеси $\rho := \rho_{\text{NaCl}}(\omega) = 1.071 \frac{\text{г}}{\text{мл}}$ Объем $V := \frac{mass}{\rho} = 1099.296$ мл

Молярность $M := \frac{\rho \cdot \omega}{MM} = 1.837 \frac{\text{моль}}{\text{л}}$ Моляльность $m := \frac{\omega}{MM(1 - \omega)} = 1.906 \frac{\text{моль}}{\text{кг}}$

Рис. 3.1. Задача о параметрах растворов

кого теплотехника Рихарда Мольте (1863–1935). Кстати, периодическая таблица химических элементов вшита в Mathcad, но и там опять же не упомянут Дмитрий Иванович.

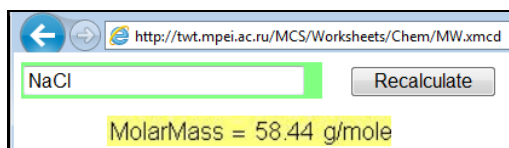


Рис. 3.2. Сайт по расчету молярной массы

таблиц для заданной температуры. Это, как правило, комнатная температура — температура лаборатории, где проводятся химические анализы. С таблицами, как мы уже отметили в *этиде 1*, работать в среде Mathcad неудобно, но по таблицам несложно создать функции, связывающие плотность и концентрацию раствора. На рис. 3.3 показано использование сплайн-интерполяции (встроенной в Mathcad функции cspline^5) для создания двух функций $\rho_{\text{NaCl}}(\omega)$ и $\omega_{\text{NaCl}}(\rho)$, где ρ — это плотность раствора NaCl, а ω — массовый процент, численно равный массе NaCl, выраженной в граммах, растворенного в 100 г раствора (не растворителя!).

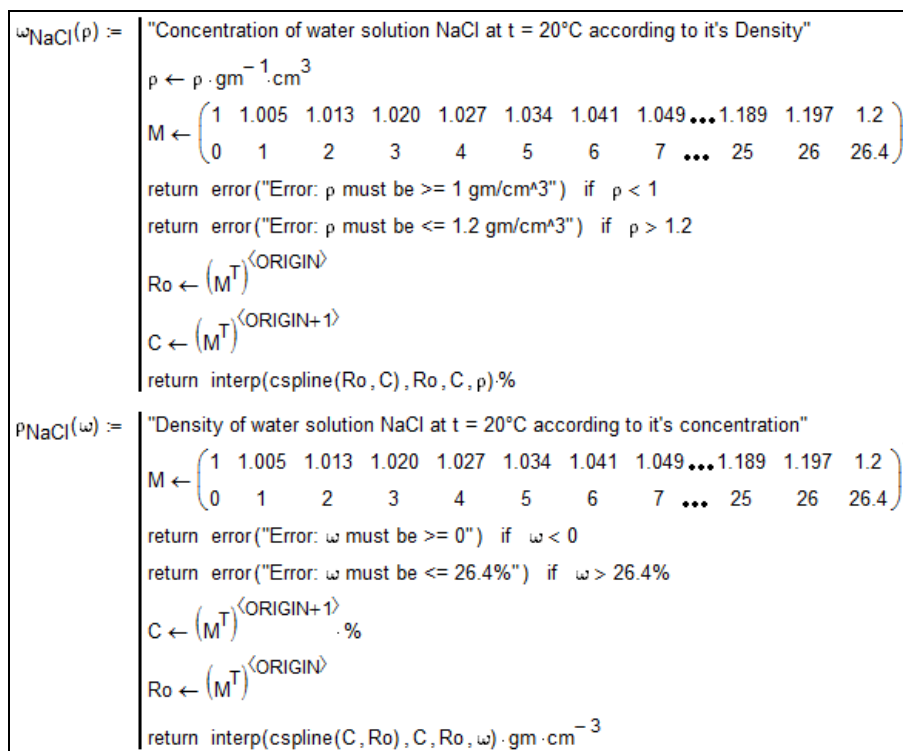


Рис. 3.3. Прямая и обратная функции плотности и концентрации (массового процента) водного раствора NaCl

Задача о смеси двух растворов сводится к решению системы двух линейных алгебраических уравнений, первое из которых — это равенство суммы масс исходных

⁵ Она была задействована в самом первом Mathcad-документе книги — см. рис. 1.1.

растворов и массы смеси, а второе — равенство суммы масс растворенного вещества (NaCl) в исходных растворах и в смеси (закон сохранения вещества). Тут главное привести все значения концентрации к одному виду — к массовому проценту и определить массы растворов.

Массовый процент первого раствора определить несложно. Нужно найти или вывести самому формулу, по которой эта величина рассчитывается в зависимости от моляльности раствора. На рис. 3.4 показан сайт Интернета для таких пересчетов. На нем достаточно указать вид исходной концентрации (T — титр, ω — массовый процент (доля), M — молярность и m — моляльность), численное значение концентрации и вид требуемой концентрации.

Рис. 3.4. Сайт по пересчету концентрации

Сайт, показанный на рис. 3.4, не только выполняет нужные пересчеты, но и показывает формулы, по которым они делаются. Одна из этих формул была перенесена с сайта, показанного на рис. 3.4, в расчет, представленный на рис. 3.1 (расчет массовой доли⁶ первого раствора по его моляльности). Формулы для пересчетов значений концентрации, задействованные в расчете, показанном на рис. 3.4, отличаются от тех, которые приводятся в различных справочниках — бумажных и интернетовских. Дело в том, что в справочниках формулы "обвешены" коэффициентами (1000, 0.01, 10 и т. д.), привязывающими расчеты к фиксированным единицам измерения. Эта особенность Mathcad-расчетов с механизмом единиц измерения описана в *этиоде 2* (см. рис. 2.5–2.7).

⁶ Отношение массы растворенного вещества к массе раствора (ω), которое численно равно количеству граммов растворенного вещества в 100 г растворителя (P). Здесь важно не спутать этот вид концентрации с еще одним — отношением массы растворенного вещества к массе растворителя.

Расчет массового процента второго раствора вычислить сложнее. Во-первых, для этого нужно, чтобы в расчете была доступна функция, возвращающая плотность раствора в зависимости от его массового процента.

Это сделано в расчете, показанном на рис. 3.1, ссылкой на "облачный" файл, где эта функция есть. Во-вторых, рассчитать массовый процент второго раствора можно только последовательными приближениями, т. к. эта величина (ω_2) находится и в левой, и в правой частях уравнения, связывающего массовую долю с молярностью. На рис. 3.4 это сделано программным путем с использованием цикла `while` (цикл пока). Но такие последовательные приближения можно сделать без программирования, реализуя их в ручном режиме, что отображено на рис. 3.5. В ручном режиме мы также будем решать задачу о температурном поле в цилиндрической и плоской стенках (см. рисунки 16.17 и 16.19 в *этюде* 16).

Здесь зафиксирована такая последовательность действий пользователя: задается первое приближение к ω_2 (10%), далее оно уточняется и переносится в первое (предыдущее) приближение. Так делается до тех пор, пока (см. цикл `while` на рис. 3.1) очередная пара значений ω_2 станет (примерно) равна.

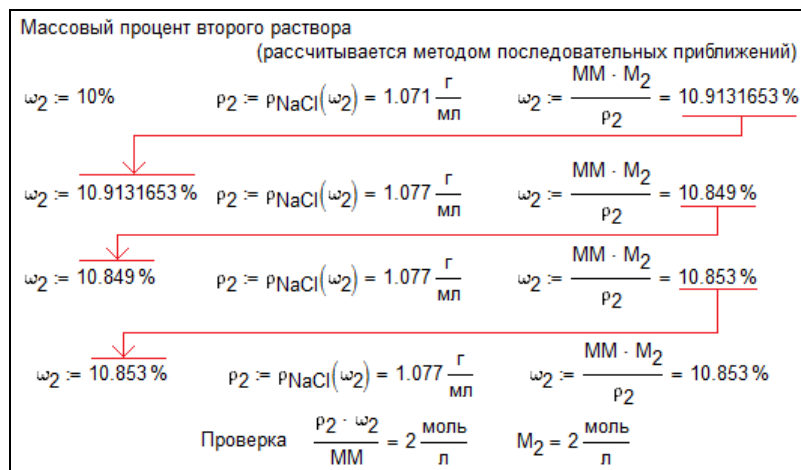


Рис. 3.5. Последовательные приближения в "ручном режиме"

После того как определены массы и массовые проценты исходных растворов, несложно определить искомые параметры смеси. В расчете, показанном на рис. 3.1, для этого была составлена и решена система двух уравнений. Самое интересное то, что объем смеси не равен сумме объемов исходных растворов. Это мы знаем по "феномену водки": 50 мл этанола плюс 60 мл воды дают объем, немного меньший, чем 100 мл. Но там этот эффект объясняется не только зависимостью плотности раствора от его концентрации, но и другими причинами.

Мы уже упомянули в сноске в начале *этюда*, что водный раствор NaCl применяется в качестве теплоносителя (хладагента) из-за того, что температура такого раствора может быть меньше нуля градусов по Цельсию (см. *этюд* 17). На рис. 3.6 показан

сайт Интернета для расчета температуры замерзания некоторых водных растворов (в том числе и NaCl) в зависимости от температуры.

Когда хотят поругать работников тепловых сетей, то обычно жалуются на то, что "батареи в квартире ледяные". Да, зимой это ужасно. Но во время летней жары это было бы очень полезно, т. к. заменило бы кондиционер в комнате. И такие системы кондиционирования уже реализованы. Не с батареями отопления, конечно, а со специальными теплообменниками с вентиляторами, куда зимой подается водный раствор NaCl с плюсовой температурой, а летом этот же раствор, но с минусовой температурой.

Расчет, показанный на рис. 3.1, можно существенно упростить, если использовать функцию, представленную на рис. 3.7. Она также (как и вторая функция, показанная на рис. 3.3) возвращает плотность водного раствора NaCl в зависимости от его концентрации. Но аргументом новой функции может быть не только массовая доля (процент) хлористого натрия, но и другие виды концентраций, а именно: моляльность, молярность (см. рис. 3.1) и титр раствора. Титр — это массовая концентрация, выраженная в миллиграммах на миллилитр или граммах на литр. В функции, показанной на рис. 3.7, центральным элементом является встроенная в Mathcad

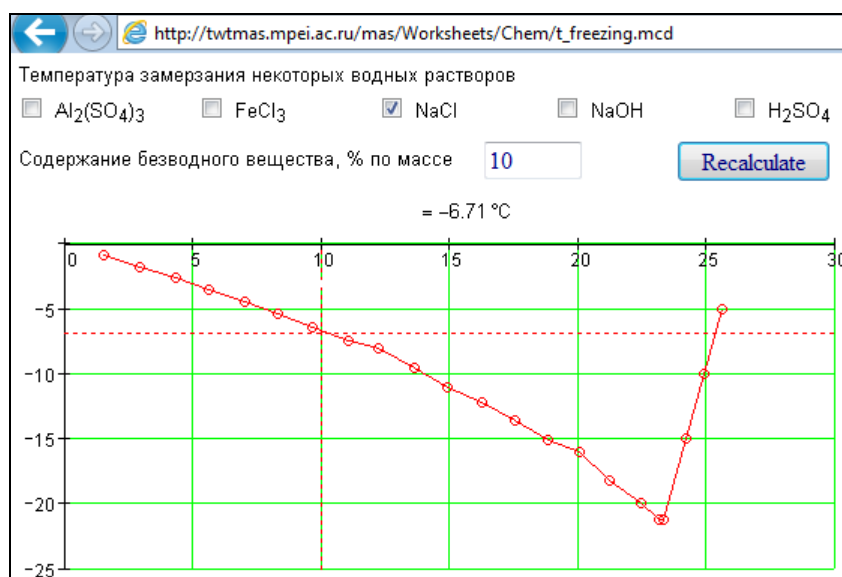


Рис. 3.6. Зависимость температуры замерзания некоторых водных растворов от температуры

```

ρNaCl(c) := "Плотность водного раствора NaCl при t = 20°C в зависимости от его концентрации"
["Молярная масса NaCl" MM ← 58.44  $\frac{gm}{mole}$ ]
ρ(ω) ← "Плотность в зависимости от массового процента (%)"
M ← [1 1.005 1.013 1.020 1.027 1.034 1.041 1.049 1.056 1.063 1.071 1.078 1.086 1.093 1.101 ...]
["Ro ← (MT)(ORIGIN) Ω ← ((MT)(ORIGIN+1))%"]
interп (cspline (Ω, Ro), Ω, Ro, ω)  $\frac{gm}{cm^3}$ 

if SIUnitsOf(c) = 1 | "Массовая доля" | ω ← c
if SIUnitsOf(c) =  $\frac{mole}{kg}$  | "Моляльность" | ω ←  $\frac{c \cdot MM}{1 + c \cdot MM}$ 
if SIUnitsOf(c) =  $\frac{mole}{m^3}$  | "Молярность: mole/L" | ω ← [ω ← 10% ω' ← 20%] while |ω - ω'| > 0.01% | ω' ← ω ω ←  $\frac{MM \cdot c}{\rho(\omega)}$ 
if SIUnitsOf(c) =  $\frac{kg}{m^3}$  | "Титр: mg/mL" | ω ← [ω ← 10% ω' ← 20%] while |ω - ω'| > 0.01% | ω' ← ω ω ←  $\frac{c}{\rho(\omega)}$ 

ρ(ω)
ρNaCl(10.853%) = 1.07693  $\frac{gm}{mL}$  ρNaCl(2  $\frac{mole}{L}$ ) = 1.07693  $\frac{gm}{cm^3}$  ρNaCl(2.0832  $\frac{mole}{kg}$ ) = 1.07693  $\frac{gm}{mL}$  ρNaCl(116.88  $\frac{mg}{mL}$ ) = 1.07693  $\frac{gm}{mL}$ 
    
```

Рис. 3.7. Функция по расчету плотности раствора NaCl при любом виде концентрации

функция SIUnitsOf, возвращающая размерность своего аргумента. Это позволяет нам программно определить, какой вид концентрации (c) ввел пользователь в качестве аргумента функции ω_{NaCl}(c), и сделать соответствующие пересчеты.

Функцию, показанную на рис. 3.7, можно упростить — обойтись без циклического определения массовой доли по молярности или титру, если в матрицу M добавить три дополнительные строки, которые будут хранить дискретные значения концентрации раствора NaCl, выраженной моляльностью, молярностью и титром.

3.1. И еще о концентрации растворов

Грот доказывает еще ту теорию, — бормотал педагог, — что ворота не среднего рода, а мужского. Гм... Значит, писать нужно не красные ворота, а красные... Ну, это пусть он облизнется! Скорее в отставку подам, чем изменю насчет ворот свои убеждения.

А. П. Чехов "В Париж"

Восклицание, приведенное в эпиграфе, можно услышать в наше время в отношении к одной метрологической проблеме: "Международная система (СИ) требует, чтобы количество вещества измерялось только молями. Гм... Значит, жесткость⁷ и щелочность воды нужно выражать в миллимолях на литр, а еще точнее в миллимолях на дециметр кубический, а не в привычных миллиграммах-эквивалентах на литр. Ну, это пусть они (разработчики СИ) облизнутся! Скорее я на пенсию уйду, чем изменю насчет миллиграмм-эквивалентов свои убеждения". Автор слышал это восклицание

⁷ Если питательная вода паротурбинного блока будет иметь повышенную жесткость, то это приведет к отложению накипи в котле.

от одного педагога с тридцатилетним стажем, выпускника химфака МГУ, немного обработал его (не педагога, а восклицание) в стиле чеховского эпитафия, но суть оставил прежней. А она такова. Только-только гидрохимии у нас в стране и за рубежом перестали измерять жесткость воды в градусах⁸ и перешли на мг-экв/л (международное обозначение meq/l или mEq/l), как и эта единица жесткости была объявлена вне закона в буквальном смысле слова — использование СИ почти во всех странах не просто рекомендовано, а узаконено.

Требования СИ не позволяют, например, сказать, что "концентрация кальция в растворе равна 1 г-экв/л". Нет больше такой единицы измерения — грамм-эквивалент. Нельзя также сказать, что "концентрация кальция в растворе равна 1 моль/л". Нужно уточнить, какая концентрация — молярная или нормальная (а точнее, молярная концентрация эквивалентов) здесь имеется в виду, т. е. подчеркнуть, что является *структурной единицей* в данном растворе — ионы кальция или заряды ионов (катионов) кальция⁹. Умолчание (недосказанность) здесь может привести к существенной ошибке: зарядов ионов кальция в единице объема раствора в два раза больше чем самих ионов кальция¹⁰: если молярная концентрация кальция в растворе равна, например, 1 моль/л, то нормальная (эквивалентная) — 2 моль/л. Старый, но не сдающий своих позиций¹¹ способ раскрытия этого умолчания заключался в том, что применялись две группы единиц количества вещества, одинаковые по своей физико-химической сути, но разные (как правило) по значению — моли (вернее, грамм-моли, миллиграмм-моли, грамм-молекулы и др.) и эквиваленты (грамм-эквиваленты, миллиграмм-эквиваленты (мг-экв) и т. д.). Иногда, правда, уточняют, массовая или молярная (нормальная) концентрация имеется в виду. Но этого делать не нужно, если это уточняется в единице концентрации: грамм на литр или моль на литр. Иногда споры перемещаются и в знаменатель. Считается, что в знаменателе нельзя ставить литры (единицы вместимости), их нужно заменять дециметрами кубическими (единица объема, единица длины в кубе). Ведь, концентрация — это отношение чего-то там к объему, а не к вместимости. Когда нашему эмоциональному преподавателю химии сказали, что жесткость воды нельзя измерять не только в миллиграммах-эквивалентах на литр, но и в миллимолях на литр, а лишь в миллимолях на дециметр кубический (в молях на метр кубический), то он не стал это комментировать, а просто лишился дара речи. В теплоэнергетике, где вода (плюс

⁸ Раньше очень многое измерялось градусами: упомянутая жесткость воды, крепость спиртных напитков, твердость металлов, вязкость жидкостей и т. д. Международная система почти полностью изгнала из метрологии все эти градусы, понятные только узким специалистам, заменив их (градусы) на более "физические" единицы измерения. Сейчас нельзя даже сказать "градус Кельвина", если говорить о температуре, — нужно говорить просто "кельвин".

⁹ Для читателей, далеких от химии, этот тезис можно пояснить геометрической аналогией. Нельзя, например, сказать: "Размер окружности равен 20 см". Нужно уточнить, диаметр или радиус окружности тут имеется в виду.

¹⁰ Диаметр окружности в два раза больше ее радиуса (см. предыдущую сноску).

¹¹ В этом легко убедиться, заглянув в книги по водоподготовке и в Интернет, где никак не могут изгнать миллиграммы-эквиваленты в течение уже 30 лет со времен принятия СИ.

водяной пар) является основным рабочим телом, жесткость воды часто относят не к объему (мг-экв/л), а к массе раствора (мг-экв/кг): объем воды сильно меняется при нагреве (а тем более при парообразовании), а масса не меняется.

Международная система упразднила единицы измерения, оканчивающиеся на эквиваленты¹² [2, 3], оставив нам только моли и другой способ указания структурной единицы, учитывающейся при определении концентрации. Теперь, как было уже отмечено выше, нельзя просто сказать, что "концентрация кальция равна тому-то", уточнив структурную единицу в единице (пardon, за тавтологию) концентрации — моль на литр или грамм-эквивалент на литр. Нужно дополнительно уточнить, о какой концентрации молярной (ионной) или эквивалентной (нормальной, "зарядной") идет речь. Другими словами, требования СИ, допускающие только моли и исключаяющие эквиваленты, переносят конкретизацию структурной единицы с единиц измерения на название физической (вернее, химической, физико-химической) величины.

Химико-финансовый дивертисмент. Рассказывают такую историю. В одном договоре стороны не стали проставлять стоимость выполненных работ ни в рублях (боязнь инфляции), ни в долларах США (порыв патриотизма), а в... массе золота: "За выполненные в Договоре работы Заказчик передает Исполнителю 500 (Пятьсот) мкг золота...". При расчете заказчик принес исполнителю полграмма золота (в денежном эквиваленте), но исполнитель не стал их брать, а открыл договор и сказал, что мкг — это не микро (10^{-6}), перемноженные на граммы, а мили (10^{-3}), перемноженные на килограммы. Ведь в СИ основной единицей массы является не грамм, а килограмм, и если к этой единице приписать приставку "м", то получатся не микрограммы, а милликилограммы, т. е. граммы: стоимость договора полкило, а не полграмма золота.

В англоязычных странах единицу измерения мкг/кг пишут по-другому — ppb (part per billion — миллиардная доля). Но здесь тоже таится умолчание: какая это доля — массовая, молярная или объемная?

И еще о недостатках единиц измерения.

Комитет по сбору данных в области науки и техники (www.CODATA.org) каждые четыре года выпускает списки с уточненными значениями ряда физических констант. В список 2010 года, например, вошли уточненные значения ряда констант, в том числе содержащих неопределенность параметров. Так, снижена неопределенность постоянной тонкой структуры (α), которая используется в атомной физике. Кроме того, уточнена постоянная Планка (\hbar), которая связывает величину энергии электромагнитного излучения с его частотой. Изменения затронули также число Авогадро (N_A), показывающее количество частиц в одном моле вещества, и постоянную Больцмана (k), связывающую энергию и температуру.

¹² Заодно были упразднены грамм-моли, миллиграмм-моли, грамм-молекулы, грамм-ионы, миллиграмм-ионы и т. д.

Уточненные значения констант, особенно числа Авогадро и постоянной Больцмана, были восприняты рядом физиков как сигнал для обновления Международной системы единиц (СИ), что обсуждалось в 2014 году. В первую очередь это связано с пятью единицами — ампер, моль, килограмм, кельвин и паскаль.

Предложения уточнить значения большинства из них имеют хорошие перспективы. Камнем преткновения был килограмм, поскольку существует его эталон, хранящийся в Парижской палате мер и весов, но он подвержен изменениям, и это вызывает регулярные споры в научной среде. Ряд экспертов предлагает определять килограмм, исходя из значения постоянной Планка. Кроме того, предлагается дать килограмму новое имя. Дело в том, что килограмм — это единственная основная единица СИ, имеющая множитель — кило (см. выше). Будет объявлен конкурс на лучшее имя для обновленной основной единицы массы, а сама она, как отмечено выше, будет привязана к постоянной Планка, а не к платиново-иридиевому эталону килограмма. Сам же ставший ненужным к этому моменту эталон килограмма планируется вручить победителю данного конкурса. Наиболее вероятно, что будет выбрано название *stein* с сокращением *st* (ш в русской транскрипции) и производными единицами *mst* (мш), *mcst* (мкш, а не мкг — см. выше) и т. д. Слово *Stain*, вернее, *ein Stain* — это по-немецки камень (по-английски *a stone*) — некий объект с массой. С другой стороны, это корень в имени гениального физика Эйнштейна (*Einstain*), не попавшего по разным причинам в "пантеон" единиц измерения — вольт, ампер, ватт, кельвин (цельсий, ренкин, фаренгейт), ньютон, джоуль, паскаль (см. далее), кулон, ом, фарад, вебер, тесла, генри, сименс, беккерель, грей, зиверт. Замена килограмма на *штайн* устранил эту несправедливость.

Второе существенное изменение коснется уже не основной, а производной единицы — единицы давления паскаль. Суть споров тут в том, что эта единица слишком мала и ее почти всегда приходится использовать с множителями кило, мега или гига. Из-за этого в науке и технике до сих пор в ходу альтернативные единицы давления — атмосферы физические, атмосферы технические, бары, метры водяного столба, миллиметры ртутного столба и т. д. Такое многообразие также нередко приводит к ошибкам в расчетах. Планируется провести некую "деноминацию" паскаля — базовой единицей давления будет "новый паскаль", эквивалентный 100 000 старым паскалям. При этом будет установлен некий переходный период, когда можно будет использовать и старые и новые единицы давления, а затем старые паскали будут изъяты из обращения.

Тут можно отметить одно неудобство — работая с ранее выпущенными справочниками, нужно будет всегда фиксировать, старые или новые паскали в них фигурируют. Но теплотехникам и теплофизикам к этому разночтению не привыкать. Ведь существуют температурные шкалы 1968 и 1990 годов со старыми и новыми кельвинами. Интерактивный пересчет по этим шкалам можно вести на сайте <http://twf.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/Thermal/T90-T68.xmcd> (см. рис. 1.17). Разница температур по этим шкалам очень незначительна (доли кельвинов), и из-за этого возникают частые незначительные, но все же ошибки в расчетах. Разница же значений давления в старых и новых паскалях будет существенна, что исключит

ошибки в пересчетах — грубая ошибка сразу видна. Подробнее: <http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/SI>.

Литература

1. Александров А. А., Джураева Е. В., Утенков В. Ф. Теплопроводность водных растворов хлорида натрия // Теплоэнергетика. — 2013. — № 3.
2. Физические величины: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991. URL: <http://twt.mpei.ac.ru/PVHB/pvhb.html>.
3. Степин Б. Д. Применение Международной системы единиц физических величин в химии: практическое пособие. — М.: Высшая школа, 1990.
4. Очков В. Ф., Хуснуллин А. Ш. Единицы жесткости воды и прочие концентрации // Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение. — 2010. — № 6. URL: http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Chem_Units/Water-Conc.pdf.