

Журнал [Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение](#) №7 (18) 2009 г.

*Данной статьей редакция открывает цикл статей по
программированному расчету процессов водоподготовки*

Программированный расчет известкования и коагуляции воды

Д.т.н., профессор МЭИ [Очков В.Ф.](#)

Один из способов снижения щелочности и побочно жесткости¹ воды является *известкование* – дозирование в воду гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Если при этом исходная вода содержит коллоидные органические примеси, то процесс известкования совмещают с процессом *коагуляции* – дозированием в воду сернокислого железа $\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2$.

На рис. 1 показан сайт Интернета, с помощью которого можно рассчитать равновесные концентрации ионов в воде, подвергнутой коагуляции и известкованию [1].

¹ Чтобы существенно снизить и жесткость воды, нужно применить содо-известкование. Но эта технология не получила широкого распространения в водоподготовке из-за дороговизны соды.

Расчет равновесных концентраций ионов в воде после известкования и коагуляции

Состав исходной воды: мг-экв/л мг/л

Na^+ Ca^{2+} Mg^{2+} Проверка
 Cl^- SO_4^{2-} HCO_3^- электронной-
 ральности

Углекислота, мг/л t °C Доза коагулянта, мг-экв/л

pH известкованной воды

Равновесные концентрации ионов после известкования и коагуляции, мг-экв/л

$[\text{Na}^+] = 0.5$ $[\text{Ca}^{2+}] = 1.419$ $[\text{Mg}^{2+}] = 0.487$ $[\text{Cl}^-] = 0.6$ $[\text{SO}_4^{2-}] = 1.4$
 $[\text{HCO}_3^-] = 0.01096$ $[\text{CO}_3^{2-}] = 0.02598$ $[\text{OH}^-] = 0.36949$ $[\text{H}^+] = 7.09661 \times 10^{-8}$

Выпадает: $\text{CaCO}_3 = 5.898$ мг-экв/л $\text{Mg}(\text{OH})_2 = 0.813$ мг-экв/л
 Доза извести = 4.917 мг-экв/л

Проверка расчета

Сумма катионов $[\text{Na}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{H}^+] = 2.4064$ мг-экв/л
 $[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] = 2.4064$ мг-экв/л Сумма анионов

$$K_w(T) = 2.0727 \times 10^{-14} \quad \frac{[\text{H}^+] \cdot f_1}{1000} \cdot \frac{[\text{OH}^-] \cdot f_1}{1000} = 2.0727 \times 10^{-14}$$

$$-\log(K_w(T)) = 13.68$$

$$K_1(T) = 4.7847 \times 10^{-7} \quad \frac{[\text{H}^+] \cdot f_1}{1000} \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot f_1}{1000} = 4.7847 \times 10^{-7}$$

$$K_2(T) = 5.2541 \times 10^{-11} \quad \frac{[\text{H}^+] \cdot f_1}{1000} \cdot \frac{[\text{CO}_3^{2-}] \cdot f_2}{2 \cdot 1000} \cdot \frac{f_2}{f_1 [\text{HCO}_3^-]} = 5.2541 \times 10^{-11}$$

$$\text{ПРСаCO}_3(T) = 3.5997 \times 10^{-9} \quad \frac{[\text{Ca}^{2+}] \cdot f_2}{2 \cdot 1000} \cdot \frac{[\text{CO}_3^{2-}] \cdot f_2}{2 \cdot 1000} = 3.5997 \times 10^{-9}$$

$$\text{ПРМg}(\text{OH})_2(T) = 1.6420 \times 10^{-11} \quad \frac{[\text{Mg}^{2+}] \cdot f_2}{2 \cdot 1000} \cdot \left(\frac{[\text{OH}^-] \cdot f_1}{1000} \right)^2 = 1.6420 \times 10^{-11}$$

Рис. 1. Сайт по расчету известковования и коагуляции

Исходными данными для расчета являются:

- Ионный состав исходной воды; при этом можно вводить как эквивалентные (мг-экв/л)² так и массовые (мг/л) концентрации и при необходимости вести дополнительный контроль за соблюдением правила электронейтральности – сумма эквивалентных концентраций катионов (натрия, кальция и магния) должна быть равна аналогичной сумме по анионам (хлориды, сульфаты и гидрокарбонаты). Эти данные можно брать из сайта, показанного на рис. 2, или непосредственно из анализа воды, которую планируется подвергнуть известкованию и коагуляции;

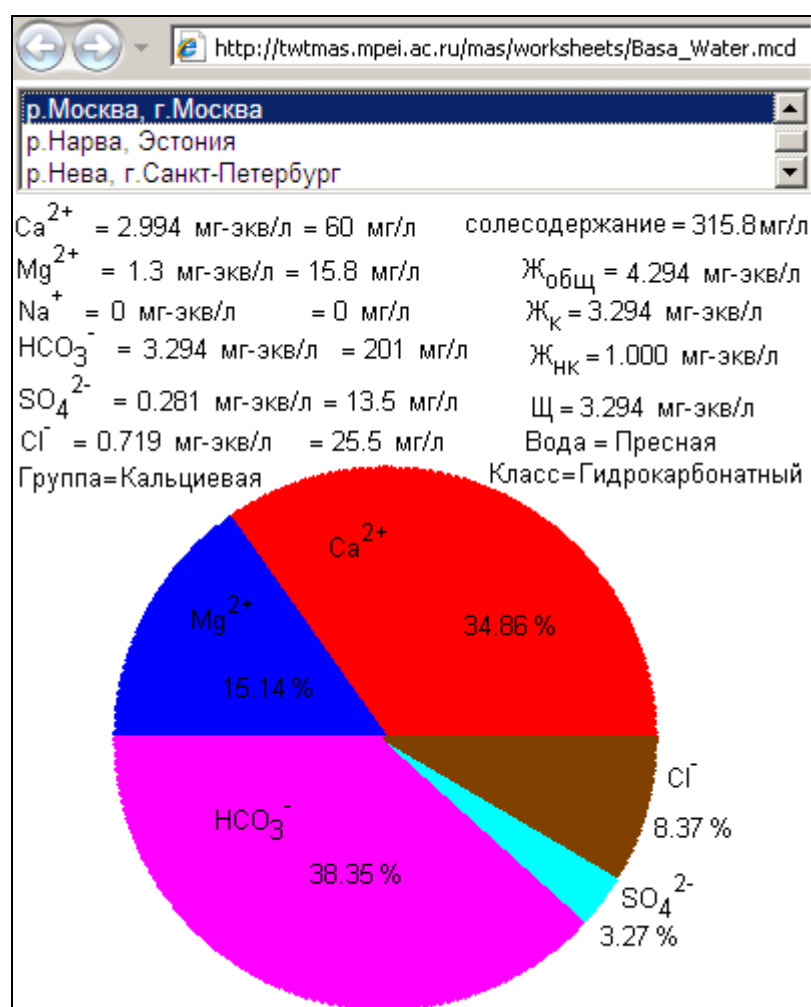


Рис. 2. Сайт по составу вод поверхностных источников

- Концентрация углекислоты в исходной воде (мг/л)³;

² Правильнее, конечно, мг-экв/дм³, но литры тут в ходу и из-за того, что л написать проще, чем дм³.

³ Эта величина зависит от pH и концентрации гидрокарбонатов в воде, но мы условно будем считать концентрацию CO₂ независимой величиной.

- Температура воды, подвергающейся известкованию и коагуляции; для ускорения химических реакций, протекающих при известковании и коагуляции, желательно держать эту температуру более высокой; но тут а) возможны нежелательные тепловые и, следовательно, финансовые потери (воду нужно нагревать, а потом охлаждать), б) известкование и коагуляция это, как правило, этап *предварительной обработки воды*, предшествующий основной обработке ее на ионитах или пропуску через мембраны, где высокая температура нежелательна по условию термостойкости материалов и даже по такому соображению – будет слишком жарко в помещении, где установлены ионитные фильтры и/или мембранные установки. Из-за этого температуру при известковании и коагуляции выбирают на уровне 30 – 40 °С;
- Доза коагулянта, которую рассчитать практически невозможно и которую устанавливают с помощью пробных коагуляций – добавлением в исходную воду разных доз коагулянта и замером остаточной перманганатной окисляемости воды (или ТОС – total organic carbon, общего органического углерода);
- Значение рН известкованно-коагулированной воды. В качестве исходных данных нужно, конечно, брать не эту величину, а дозу извести, но расчет у нас построен так, что доза извести рассчитывается в зависимости от заданного значения рН. Если известкование совмещают с коагуляцией, то в качестве коагулянта используют сернокислое железо и значение рН держат на уровне 10-10,5. Коагуляция при более низких значениях рН (7-8) требует иных коагулянтов – сернокислого алюминия или различных оксихлоридов алюминия.

После ввода новых или корректировки старых исходных данных посетитель сайта, показанного на рис. 1, должен нажать кнопку Recalculate. После этого эти новые данные отправляются на сервер кафедры Технологии воды и топлива МЭИ, там обрабатываются с помощью программы Mathcad Calculation Server [2], а ответ отправляется посетителю сайта – см. цифры на рис. 1 после слов «Равновесная концентрация...» (ниже кнопки Recalculate). Кроме цифр (ионный состав обработанной воды, количество выпадаемого из воды карбоната кальция и гидрата окиси магния, а также доза извести, обеспечивающая заданное значение рН), посетителю сайта выдаются и *графики*, на которых можно видеть изменение параметров процесса в зависимости от дозы извести. На графиках виден излом при

$D_{\text{изв}} \approx 3,9$ мг-экв/л – правее этой точки начинает выпадать гидроокись магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Но если, например, снизить температуру воды с 35°C (см. рис. 1) до 25°C , то точка излома сместиться вправо и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ выпадать не будет. Видны также и точки минимумов, заставляющих думать об оптимизации процесса... Читатель, открыв данный сайт может «поиграть» исходными данными и смоделировать различные ситуации, возникающие при известковании и коагуляции воды.

Посетителю сайта нет особой нужды вникать в технику счета – он может просто убедиться, что расчет ведется правильно. Он сводится к решению довольно сложной системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих следующие химические равновесия в известкованной и коагулированной воде:

- 1) уравнение (условие, равенство) электронейтральности;
- 2) ионное произведение воды, описываемое константой K_w ;
- 3) углекислотное равновесие, описываемое двумя константами K_1 (углекислый газ \leftrightarrow гидрокарбонаты) и K_2 (гидрокарбонаты \leftrightarrow карбонаты);
- 4) растворимость в воде CaCO_3 , описываемое константой PPCaCO_3 ;
- 5) растворимость в воде $\text{Mg}(\text{OH})_2$, описываемое константой $\text{PPMg}(\text{OH})_2$.

Кроме того, нужно учитывать, что в уравнениях присутствуют как концентрации ионов (c) так и их активности (a). Эти параметры растворенных веществ связаны соотношением $a = f \cdot c$, где f – фактор активности, зависящий от ионной силы раствора, заряда растворенного иона и температуры.

На сайте, показанном на рис. 1, посетитель, сравнивая пары цифр, помещенные после слов «Проверка расчета» (заданная константа и ее рассчитанное значение), может убедиться, что вышеописанные уравнения решены правильно: после подстановки в них найденных значений неизвестных (концентрации ионов) уравнения превращаются в тождества⁴.

Как ведется данный расчет!?

Он начинается вводом в расчет функций, возвращающих вышеперечисленные константы K_w , K_1 , PPCaCO_3 и $\text{PPMg}(\text{OH})_2$ в зависимости от температуры, а также значения фактора активности ионов (f) в зависимости от температуры (T), ионной силы раствора (μ) и заряда иона (z) – см. рис. 3.

⁴ В формулах проверки расчета (см. нижнюю часть рис. 1) и в самом расчете (см. далее рис. 5) коэффициенты 1000 и 2 необходимы для пересчетов мг-эквивалентов в эквиваленты и эквивалентов в моли.

$K_w(T) := 10^{\frac{-4780.13}{T \cdot K^{-1}} - 0.019559(T \cdot K^{-1}) + 7.8560}$	Ионное произведение воды
$K_1(T) := 10^{\frac{-2513.98}{T \cdot K^{-1}} - 0.023122(T \cdot K^{-1}) + 8.9632}$	Константы диссоциации углекислоты по двум ступеням
$K_2(T) := 10^{\frac{-3287.20}{T \cdot K^{-1}} - 0.028377(T \cdot K^{-1}) + 9.1324}$	
Произведение растворимости CaCO_3 $\text{PRCaCO}_3(T) := 0.4365 \times 10^{-8} \cdot e^{1478.305 \left(\frac{1}{T \cdot K^{-1}} - 0.003356 \right) - 53.765 \left(\frac{298.15}{T \cdot K^{-1}} - 1 - \ln \left(\frac{298.15}{T \cdot K^{-1}} \right) \right)}$	
Произведение растворимости Mg(OH)_2 $\text{PRMg(OH)}_2(T) := 0.1995 \times 10^{-10} \cdot e^{1476.305 \left(\frac{1}{T \cdot K^{-1}} - 0.003356 \right) - 57.854 \left(\frac{298.15}{T \cdot K^{-1}} - 1 - \ln \left(\frac{298.15}{T \cdot K^{-1}} \right) \right)}$	
$f(T, \mu, z) := 10^{-\left(0.00129 \frac{T}{K} + 0.4794 \right) z^2 \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 1.4 \sqrt{\mu}}}$	Фактор активности ионов

Рис. 3. Константное обеспечение расчетов

Особо следует сказать о константе K_w , о ионном произведении вода $a_{H^+} \cdot a_{OH^-}$. На рис. 3 представлена упрощенная зависимость K_w от температуры при атмосферном давлении. Более полная зависимость K_w как от температуры, так и от давления воды определяется формуляцией Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.org [3]). На рис. 4 показан сайт, где можно изменить значения давления и температуры и получить новое рассчитанное значение K_w , видя заодно все формулы и промежуточные данные.

Ионное произведение воды (формуляция IAPWS)

$0 \leq p \leq 100 \text{ MPa}$ $0 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}$

МПа $^\circ\text{C}$ Recalculate

$T^* := 1\text{K}$ $\theta := T / T^* = 308.15$

$\gamma_0 := 6.141500 \cdot 10^{-1}$ $\gamma_1 := 4.825133 \cdot 10^4$ $\gamma_2 := -6.770793 \cdot 10^4$ $\gamma_3 := 1.010210 \cdot 10^7$

$pK_w^G := \gamma_0 + \frac{\gamma_1}{\theta} + \frac{\gamma_2}{\theta^2} + \frac{\gamma_3}{\theta^3} = 156.83026$

Density = 994.038 kg/m^3 $D^* := 1 \cdot \text{g/cm}^3$ $\rho := \text{Density} / D^* = 0.99404$ $\alpha_0 := -0.864671$

$\alpha_1 := 8659.19$ $\alpha_2 := -22786.2$ $Q := \rho \cdot \exp\left(\alpha_0 + \frac{\alpha_1}{\theta} + \frac{\alpha_2}{\theta^2} \cdot \rho^{2/3}\right) = 5.2723222 \times 10^{11}$

$\beta_0 := 0.642044$ $\beta_1 := -56.8534$ $\beta_2 := -0.375754$ $\beta_3 := -3.488719$

$pK_w := -12 \cdot \left[\log(1 + Q) - \frac{Q}{Q+1} \cdot \rho \cdot \left(\beta_0 + \frac{\beta_1}{\theta} + \beta_2 \cdot \rho \right) \right] + pK_w^G + \beta_3 = 13.68$

Рис. 4. Сайт по расчету K_w воды и водяного пара (скачать Mathcad 14-файл [>>>>](#))

Ядром расчета равновесных концентраций ионов в воде после известкования и коагуляции является пользовательская функция с именем C , показанная на рис. 5.

$$\begin{array}{l}
 \boxed{C(\text{Ион}, pH, T, D_x) = } \\
 Na = \text{Ион}_0, \quad Cl = \text{Ион}_3, \quad SO_4 = \text{Ион}_4 + D_x, \quad CO_{2_ис} = \frac{\text{Ион}_6}{44}, \quad \mu = 0.001, \quad \mu_1 = 2\mu \\
 \text{while } \left| \frac{\mu - \mu_1}{\mu} \right| > 2\% \\
 \left. \begin{array}{l}
 f_1 = f(T, \mu, 1), f_2 = f(T, \mu, 2) \\
 Mg = \left[\begin{array}{l}
 aH = 10^{-pH}, H = 1000 \frac{aH}{f_1}, aOH = \frac{K_w(T)}{aH}, OH = 1000 \frac{aOH}{f_1}, aMg_{рав} = \frac{PRMg(OH)_2(T)}{aOH^2} \\
 Mg_{рав} = 2000 \frac{aMg_{рав}}{f_2} \\
 \text{if}(Mg_{рав} > \text{Ион}_2, \text{Ион}_2, Mg_{рав})
 \end{array} \right. \\
 CO_3 = \left[\begin{array}{l}
 CO_3 = 0.0001, \text{"Первое приближение"} \\
 \text{root} \left(H + \frac{PRCaCO_3(T) 4 \times 10^6}{f_2^2 CO_3} + Mg + Na - OH - Cl - SO_4 - \frac{aH f_2 CO_3}{2 f_1 K_2(T)} - CO_3, CO_3 \right) \\
 Ca = \frac{PRCaCO_3(T) 4 \times 10^6}{f_2^2 CO_3}, HCO_3 = \frac{aH f_2 CO_3}{2 f_1 K_2(T)}, CO_2 = \frac{aH f_1 HCO_3}{K_1(T)} \\
 \mu_1 = \mu, \quad \mu = \frac{0.5}{1000} [2(Ca + Mg + SO_4 + CO_3) + Cl + Na + HCO_3 + H + OH] \\
 CaCO_3 = 2 \left(CO_{2_ис} + \text{Ион}_5 - CO_2 - HCO_3 - \frac{CO_3}{2} \right) \\
 \text{error}(\text{"Исходная щелочность низкая!"}) \text{ if } CaCO_3 < 0 \\
 D_x = Ca + CaCO_3 - \text{Ион}_1 \\
 (Na \quad Ca \quad Mg \quad Cl \quad SO_4 \quad HCO_3 \quad CO_3 \quad OH \quad D_x \quad f_1 \quad f_2 \quad H \quad CO_2 \quad CaCO_3)
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Рис. 5. Пользовательская функция для расчета известкования и коагуляции

Задача решается методом последовательных приближений: задается значение ионной силы раствора $\mu = 0.001$ моль/л и далее определяются следующие величины:

- факторы активности одно- и двухзарядных ионов (f_1 и f_2)
- концентрацию ионов магния (переменная Mg^5) в обработанной воде, которая не может быть выше концентрации магния в исходной воде – см. функции: if (если) в строке 7 на рис. 5; для этого последовательно рассчитываются следующие величины: активность катионов водорода в воде aH , концентрацию катионов водорода в воде H , активность гидроксил-анионов в воде aOH , концентрацию гидроксил-анионов в воде OH , равновесную активность катионов магния в воде $aMg_{равн}$ и, наконец, равновесную концентрацию катионов магния в воде $Mg_{равн}$;

⁵ Эта переменная в нашей Mathcad-программе имеет имя Mg, хотя более правильно писать Mg^{2+} . Такие сложные переменные можно вводить в расчет, заключая их в квадратные скобки (см. рис. 1). Но мы ограничимся упрощенными именами Na, Ca, Mg и т.д. чтобы не загромождать расчет.

- концентрацию карбонат-ионов в обработанной воде CO_3 через решение уравнения электронейтральности – см. функцию `root` (корень) в строке 9 на рис. 5. Функция `root` требует первого приближения ($\text{CO}_3 = 0,001$) и возвращает значение переменной CO_3 , подстановка которое в выражение «сумма катионов минус сумма анионов» даст нуль.
- концентрацию ионов кальция Ca , гидрокарбонатов HCO_3 и углекислого газа CO_2 в обработанной воде.
- ионную силу раствора (воды) μ ; если рассчитанное значение μ_1 будет отличаться от значения μ_1 , заданного ранее или определенного при предыдущем приближении, менее чем на 2%, то расчет будет считаться завершённым. Если же это не так, то оператор `while` (цикл с предпроверкой) заставит повторить расчет – сделать очередное приближение.

По выходу из цикла `while` рассчитывается, сколько выпадает из воды карбоната кальция (переменная CaCO_3). Если исходная щелочность воды слишком низкая, то значение переменной CaCO_3 может оказаться отрицательным, что прервет расчет сообщением об ошибке (`error`). Если же значение переменной CaCO_3 больше нуля, то рассчитывается доза извести (по балансу кальция; количество выпадаемого из воды CaCO_3 рассчитывается по балансу углерода в воде в разных соединениях: углекислый газ, гидрокарбонат-ион и карбонат-ион).

Имея под рукой функцию с именем `C` (см. рис. 5) можно легко построить графики, показанные на рис. 1. Например, график изменения значения жесткости воды в зависимости от дозы извести строится так. Изменяется значение pH от 7.5 до 10.5 с небольшим шагом и по этим значениям строится соответствующий *параметрический* график, график, по оси y которого вызывалась функция `C`, возвращающая сумму Ca^{2+} и Mg^{2+} , а по оси x – $D_{\text{изв}}$.

Процесс известкования и коагуляции воды, как правило, ведется в *осветлителях* – аппаратах со взвешенным слоем осадка (скоагулированная органика, карбонат кальция и гидрат окиси магния⁶), через который снизу–вверх проходит исходная подогретая вода с добавленным и реагирующим коагулянтом и известью.

На

сайте

⁶ Гидрат окиси магния в твердом виде может сорбировать из воды коллоиды окиси кремния. Для усиления этого процесса (обескремнивание воды) в воду дополнительно дозировали магнезит (магнезиальное обескремнивание) в процессе ее подготовки для котлов сверхкритического давления, где кремний строго нормируется из-за его отложения на лопатках турбин.

http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/trenager/Turbines/3DModeles/WPE_CN8.htm размещена трехмерная компьютерная модель осветлителя типа СКБ ВТИ⁷, которую можно вращать, разбирать и т.д.

В настоящее время от осветлителей во вновь сооружаемых водоподготовительных установках стали отказываться по следующим причинам:

- осветлители, как правило, сооружаются полностью на месте, что снижает качество их изготовления, повышает трудозатраты; альтернативные установки предварительной обработки воды (аппараты ультрафильтрации, например) собираются из отдельных полностью готовых модулей заводского изготовления;
- осветлители очень «капризны» и требуют тонкой ручной наладки и в период пуска и при эксплуатации;
- химики-энергетики так и не научились толком автоматизировать осветлители, чтобы они подстраивались под изменение качества исходной воды; раньше можно было держать специальный персонал для этого (лаборанты, аппаратчики), сейчас такая «роскошь» непозволительна;
- осветлители работают строго при постоянной нагрузке, их нельзя остановить на короткое время, на выходные, например;
- остро стоит вопрос об утилизации шлама осветлителей; куда его девать, если электростанция работает на газе, а не на угле, когда шлам можно сбросить в золоотвалы, да и то не всегда;
- гашеная известь плохо растворяется в воде, поэтому приходится готовить не раствор, а суспензию $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (известковое молоко), с которой тоже бывают всякие «заморочки» и др.

Щелочность воды можно снижать двумя «противоположными» методами:

- 1) Повышением значения рН воды и переводом уголекислоты и гидрокарбонатов в карбонаты с последующим осаждением углерода в виде CaCO_3 (см. выше);

⁷ Второй распространенный тип осветлителей – осветлители ЦНИИ МПС. Во времена паровозов требовалось на станциях готовить много умягченной, осветленной воды с низкой щелочностью. Отсюда и такое внимание к осветлителям со стороны железнодорожников. Станционные осветлители вместе с паровозами долго были законсервированы на ж/д станциях. Потом все это пустили в металлолом...

- 2) Понижением значения pH и переводом карбонатов и гидрокарбонатов в углекислый газ с последующим его отдувом из воды. Природную воду можно, например, подвергнуть Н-катионированию или просто подкислить, добавить соляной или серной кислоты, а потом направить в декарбонизатор.

Какой способ лучше?!

Но вот другой, неожиданный аспект этой проблемы!

В настоящее время бушуют научные и политические страсти по поводу выбросов CO₂ в атмосферу (Киотский протокол и прочее⁸).

Так вот в этом отношении перевод углекислоты и гидрокарбонатов природной воды в твердую фазу с последующей ее утилизацией оказывается более предпочтителен, чем отдув углекислоты в декарбонизаторах.

Но проблема углекислоты в атмосфере Земли не так проста и очевидна.

Тут есть два научных, вернее, научно-политических взгляда. Одни ученые утверждают, что техногенный выброс CO₂ является главной причиной роста концентрации этого газа и, следовательно, средней температуры атмосферы через парниковый эффект⁹. Другие же ученые считают, что изменение (рост а настоящий исторический период) температуры атмосферы Земли никак не связано с деятельностью человека, а подчинено своим законам. Рост средней температуры земной атмосферы в свою очередь приводит к повышению температуры воды Мирового океана, что в свою очередь снижает растворимость углекислоты в воде, которая и переходит из воды в атмосферу¹⁰... Кто тут прав, а кто неправ?! Можно вспомнить старую притчу про биолога, который исследовал блоху, положил ее на стол и хлопнул в ладоши. Блоха подпрыгнула. Исследователь задумался и сделал вывод: «Блоха слышит». Да, но где у нее орган слуха? Он оторвал у нее ноги и еще раз хлопнул в ладоши. Блоха не подпрыгнула.

⁸ В конце 2009 г. в Дании планируется подписать новое соглашение по выбросам парниковых газов.

⁹ Еще один парниковый газ – аммиак, «парниковость» которого на порядок выше, чем у углекислого газа. Основным источником аммиака на Земле – пищеварение, пардон, крупного рогатого скота. Аммиак, кстати, используется в водообработке – с его помощью, например, повышают значение pH питательной воды котлов электростанций.

¹⁰ Такой же примерно «подлог» мы совершили в расчете известкования и коагуляции воды: повысить значение pH воды можно за счет дозирования в нее извести. Но мы создали функцию с именем C (см. рис. 5), аргументом которой является не значение дозы извести, а значение pH воды, и которая возвращает дозу извести, создавая ложное впечатление, что рост значения pH приводит к росту дозы извести. В нашем случае легко разобраться, что это не так. Но как разобраться в том, что является причиной/следствием – рост температуры атмосферы Земли/рост концентрации CO₂ в атмосфере?!

Исследователь задумался и сделал вывод: «Орган слуха у блохи в ногах». Так вот, каждая из двух групп исследователей считает, что их оппоненты занимаются вышеописанным «экспериментом с блохой» – из очевидных фактов делают неверные выводы. Ученые давно бы тут уже разобрались, если бы не «мутили воду» политики и большой бизнес. Поставщики органического топлива (нефть/газ/уголь)¹¹, естественно, стоят на стороне тех, кто считает, что человек не виноват в «перегреве» Земли. Другая же группа бизнесменов/политиков инвестируют значительные средства в альтернативные источники энергии. Они, естественно, стоят на стороне тех ученых, которые считают, что именно человека виновен в будущих глобальных земных бедах: повышение уровня Мирового океана, изменение климата и т.д.

Пока суть да дело, персонал, эксплуатирующий осветлители с известкованием, могут утверждать, что они «борются с глобальным изменением климата»! На этом даже можно зарабатывать, если принять во внимание, что в будущем в рамках нового «Киотского протокола» планируют штрафовать на 20-30 US\$ за каждый килограмм CO₂, выброшенного в атмосферу. Так что наши «старые добрые осветлители» могут еще не просто поработать, но и дополнительную прибыль могут приносить ;-)

Методике расчета форм уголекислоты в воде будет посвящена следующая статья данного цикла.

И последнее. В реальной практике известкования никогда нельзя получить остаточную карбонатную щелочность ниже 0,2–0,5 мг-экв/л. У нас же она оказалась на уровне 0,03 мг-экв/л (см. рис. 1). Такая же картина наблюдается и по жесткости воды. Дело в том, что наша модель не учитывает кинетику процесса [4], недостижимость равновесия и др. факторы¹². Расчет реальных концентраций ионов после известкования и коагуляции выложен на сайте http://twt.mpei.ac.ru/mas/worksheets/Calc_IK_Real.mcd. На сайте http://twt.mpei.ac.ru/mas/worksheets/Calc_SI_Ravnov_Progr.mcd представлен расчет содоизвесткования.

Литература:

¹¹ Уголь – это почти чистый углерод, основу же нефти и газа составляют различные углеводороды. Поэтому сжигание газа или жидкого топлива

¹² Такой, например. Из осветлителя с осветленной водой вымывается мелкая фракция кристаллов CaCO₃, которая при титриметрическом определении жесткости и щелочности завышает результаты анализа.

1. Копылов А.С., Очков В.Ф., Чудова Ю.В. [Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчеты](#). М.: [Издательский дом МЭИ](#), 2009
2. Очков В.Ф. [Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия](#). БХВ-Петербург, 2009
3. Bandura A.V., and Lvov S.N. [The Ionization Constant of Water over a Wide Range of Temperatures and Densities](#) // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 35, 2006
4. В.И.Коробов В.И., Очков В.Ф. [Химическая кинетика: введение с Mathcad/Maple/ MCS](#). М.: Горячая линия-Телеком, 2009